



TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Teknik Dergi

Cilt 33 Sayı 6 Kasım 2022

TEKNİK DERGİ YAYIN İLKELERİ

Teknik Dergi, inşaat mühendisliğinin bütün alanlarını içeren, Science Citation Index Expanded (Genişletilmiş Bilimsel Atıf Endeksi) kapsamında bilimsel ve teknik bir dergidir. Ocak, Mayıs ve Eylül aylarında Türkçe, Mart, Temmuz ve Kasım aylarında İngilizce olmak üzere yılda altı sayı olarak yayımlanır. Derginin yayın ilkelerinden başlıcaları aşağıda özetlenmektedir:

1. Yalnızca özgün bilimsel araştırma çalışmalarını ve ilginç mühendislik uygulamaları yansıtan yazılara yer verilir. “Özgünlük” kapsamı içinde, çalışmanın ya yeni bilgi üretmiş olması veya varolan bilgiye yeni bir boyut kazandırmış olması, ya da yeni bir yöntem geliştirmiş veya bilinen bir yöntemi elle tutulur bir ölçüde ilerletmiş olması koşulu aranır.
2. Bilimsel çalışmaların öndeğerlendirme sonuçlarını aktaran yazılar ile bilimsel içeriği makale için yeterli görülmeyen, ancak okuyucuya yararlı bilgi aktarabileceği düşünülen yazılar, “teknik not” olarak yayımlanabilir.
3. Yayın tarihinden başlayarak üç ay içinde, okurlardan alınan tartışma yazıları, Yayın Kurulu’nca değerlendirildikten sonra, yazarın yanıtı ile birlikte yayımlanır.
4. Yayımlanmak üzere gönderilen yazılar iki veya üç danışman tarafından değerlendirilir; kabul-red kararı Yayın Kurulu tarafından verilir. Yazıları değerlendiren danışman adları yazarlara bildirilmez. Yeterli görülmeyen yazıların danışman önerileri doğrultusunda geliştirilmesi genel yaklaşımdır. Amaçlanan düzeye erişilemeyen yazılar reddedilir.
5. Yazardan, yazının daha önce “dergi makalesi veya kitap bölümü olarak yayımlanmamış” olduğunu belirten imzalı bir bildirim alınır. Yayın Kurulu, yazının ufak tefek değişikliklerle başka bir dergide/kitapta yayımlanmış olduğu ya da intihal vb bir başka etik ihlali bulunduğu kanısına ulaşırsa, yalnızca o yazı değil, o yazarın hiçbir yazısı yayımlanmaz.
6. Daha önce bir konferansa bildiri olarak sunulmuş olan bir çalışmayı geliştirerek aktaran yazılar yayımlanabilir. Bu durumda, daha önce sunulduğu konferans, birinci sayfada dip not olarak belirtilir.
7. Ayrıca, yazar(lar) tarafından imzalanmış, yazının telif hakkının TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası’na devredildiğini bildiren bir belgenin yazı ile birlikte gönderilmesi istenir.



TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Teknik Dergi

*Technical Journal
of
Turkish Chamber of Civil Engineers
Volume 33 Number 6 November 2022*

Cilt 33 Sayı 6 Kasım 2022



TMMOB
İnşaat Mühendisleri Odası

Necatibey Cad. No: 57, Kızılay 06440 Ankara
Tel: 0.312.294 30 00 - Faks: 294 30 88
E-posta: imo@imo.org.tr - www.imo.org.tr

Sahibi:

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası adına
Taner YÜZGEÇ

Yazı İşleri Müdürü:

Özer AKKUŞ

Cilt 33 - Sayı 6 - Kasım 2022

İki ayda bir yayınlanır, yerel süreli yayın.

Baskı tarihi: 1 Kasım 2022 / 800 adet basılmıştır.

Yayın Kurulu'nun yazılı onayı olmaksızın alıntı yapılamaz.

ISSN: 1300-3453

Teknik Dergi

- Science Citation Index Expanded
- Scopus
- Journal Citation Reports / Science Edition
- Engineering Index
- Concrete Abstracts (American Concrete Institute)
- National Technical Information Service (US NTIS)
- CITIS
- Ulrich's International Periodical's Directory
- Google Scholar
- TR Dizin

tarafından taranmaktadır.

Teknik Dergi, özgün bilimsel araştırmalar ile ilginç uygulama çalışmalarına yer veren ve bu niteliği ile hem araştırmacılara hem de uygulamadaki mühendislere seslenmeyi amaçlayan hakem sistemini etkin kullanan açık erişimli bir dergidir.

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Teknik Dergi

Editör:

Alper İLKİ

Yardımcı Editörler:

İsmail AYDIN

Özer ÇİNİCİOĞLU

Metin GER

Gürkan Emre GÜRCANLI

Kutay ORAKÇAL

İsmail ŞAHİN

Özkan ŞENGÜL

Tuğrul TANKUT

Emine Beyhan YEĞEN

Dil Editörü:

Metin GER

Yayın Sekreteri:

Cemal ÇİMEN

Danışma Kurulu:

Prof. M. Aral, ABD

Prof. D. Arditi, ABD

Prof. A. Aydilek, ABD

Prof. K. Beyer, İsviçre

Prof. N. Çatbaş, ABD

Prof. M. Çetin, ABD

Prof. M. Dewoolkar, ABD

Prof. T. Edil, ABD

Prof. K. Elwood, Yeni Zelanda

Prof. M. Fardis, Yunanistan

Prof. G. Gazetas, Yunanistan

Prof. P. Gülkan, Türkiye

Prof. J. Han, Türkiye

Prof. I. Hansen, Hollanda

Prof. T. Hartmann, Almanya

Prof. F. Imamura, Japonya

Prof. T. Kang, Kore

Prof. K. Kusunoki, Japonya

Prof. S. Lacasse, Norveç

Prof. R. Al-Mahaidi, Avustralya

Prof. K. Özbay, ABD

Prof. H. Özer, ABD

Prof. G. Özmen, Türkiye

Prof. S. Pampanin, İtalya

Prof. A. J. Puppala, ABD

Prof. M. Saatçioğlu, Kanada

Prof. C. Santamarina, Suudi Arabistan

Prof. S. Sheikh, Kanada

Prof. E. C. Shin, Güney Kore

Prof. J. Smallwood, Güney Afrika

Prof. M. Sümer, Türkiye

Dr. H. A. Şentürk, Türkiye

Dr. S. S. Torisu, Japonya

Prof. E. Tutumluer, ABD

Prof. M. Tümay, ABD

Danışmanlar:

Bu liste, son iki yayın yılında danışmanlık yapmış olan kişileri içerir ve her Ocak sayısında yenilenir.

Şükran AÇIKEL	Halil İbrahim BURGAN	Ilgın GÜLER	Derviş Volkan OKUR	Kerem TAŞTAN
Merve AÇIKGENÇ	Erdem CANBAY	Hamza GÜLLÜ	Mehmet Hakkı	Gökmen TAYFUR
ULAŞ	Zekai CELEP	Gürkan GÜNAY	OMURTAG	Beytullah TEMEL
Stileyman ADANUR	Cihan CENGİZ	Taylan GÜNAY	Engin ORAKDÖĞEN	Rasim TEMÜR
Ali Mardani	Halim CEYLAN	Murat GÜNAYDIN	Şeref ORUÇ	Egemen TEOMETE
AGHABAGLOU	Hüseyin CEYLAN	Samet GÜNER	Akın ÖNALP	Serdal TERZİ
Perviz AHMEDZADE	Ömer CİVALEK	Ülker GÜNER BACANLI	Halil ÖNDER	Berrak TEYMUR
Bülent AKBAŞ	Ayşe COŞKUN BEYAN	Oğuz GÜNEŞ	Jülide ÖNER	Hüseyin Onur TEZCAN
Rağıp AKBAŞ	Melih ÇALAMAK	Mehmet Şükrü GÜNEY	Bihrat ÖNÖZ	Mesut TİĞDEMİR
Sami Oğuzhan AKBAŞ	Gülben ÇALIŞ	Tuba GÜRBÜZ	Ali Hakan ÖREN	Şahnaz TİĞREK
Şeref Doğuşcan AKBAŞ	Süheyla Pelin	BÜYÜKKAYIKÇI	Mustafa ÖZAKÇA	Salih TİLEYLİOĞLU
Rıfat AKBIYIKLI	ÇALIŞKANELLİ	Melike GÜREL	Ceyhan ÖZÇELİK	Vedat TOĞAN
Özge AKBOĞA KALE	Dilay ÇELEBİ	İbrahim GÜRER	Yiğit ÖZÇELİK	Onur Behzat TOKDEMİR
Hüseyin AKBULUT	Tevfik Kutay	Aslı Pelin GÜRGÜN	Gökhan ÖZDEMİR	İrem Dikmen Toker
Sarven AKCELYAN	ÇELEBİOĞLU	İman HAJİRASOULİHA	Osman Nuri ÖZDEMİR	TOKER
Buru AKÇAY	Ahmet Ozan ÇELİK	Soner HALDENBİLEN	Halit ÖZEN	Cengiz TOKLU
ALDANMAZ	Oğuz Cem ÇELİK	Mustafa HATİPOĞLU	Murat ÖZEN	Ali TOPAL
Cihan Taylan AKDAĞ	Semet ÇELİK	Bo-Tao HUANG	Pelin ÖZENER	İlker Bekir TOPÇU
Cem AKGÜNER	Hilmi Berk ÇELİKOĞLU	Zeynep İŞİK	Cem ÖZER	Cem TOPKAYA
Muhammet Vefa	Mahmut ÇETİN	Hande İŞİK ÖZTÜRK	Hasan ÖZER	Kamile TOSUN
AKPINAR	Mecit ÇETİN	Sabriye Banu İKİZLER	Serkan ÖZGEN	FELEKOĞLU
Atakan AKSOY	Gökhan CEVİKBİLEN	Rağıp İNCE	Eren Arman ÖZGÜVEN	Gökçe TÖNÜK
Hafzullah AKSOY	Erdal ÇOKÇA	Recep İYİSAN	Hakkı Oral ÖZHAN	Ülgen Mert TUĞSAL
Hakan AKSU	İsa ÇÖMEZ	Nihat KABAY	M. Hulusi ÖZKUL	Gürsoy TURAN
Tülay AKSU ÖZKUL	İsmail DABANLI	Mehmet Sedat	Zeynep Huri ÖZKUL	Ö. Tuğrul TURAN
Büşra AKTÜRK	Ömer DABANLI	KABDAŞLI	BİRGÖREN	Cüneyt TÜZÜN
Zuhar AKYÜREK	Atilla DAMCI	Mehmet Rifat	ÖZKULA	Eren UÇKAN
Uğurhan AKYÜZ	Yakup DARAMA	KAHYAOĞLU	Ahmet ÖZTOPAL	Ergin ULUTAŞ
Sadık ALASHAN	Osama M.F. DAWOUD	Özkan KALE	Sadık ÖZTOPRAK	Berna UNUTMAZ
Cenk ALHAN	Tayfun DEDE	Volkan KALPAKÇI	Turan ÖZTURAN	Tayfun UYGUNOĞLU
Ayşe Burcu ALTAN	Özgür DEĞERTEKİN	Murat KARACASU	Hasan Tahsin ÖZTÜRK	Halvan Emre UZ
SAKARYA	Abdullah DEMİR	Halil KARAHAN	Mustafa ÖZUYSAK	Nihal UZCAN ERATLI
Sinan ALTIN	Cem DEMİR	Cenk KARAKURT	Ahmet Onur PEHLİVAN	İbrahim Mert UZUN
Adlen ALTUNBAŞ	Emre DEMİR	Mustafa KARASAĞIN	Onur PEKCAN	Deniz ÜLGEN
Ahmet Can ALTUNBAŞ	Munise Didem	Zülküf KAYA	Seval PINARBAŞI	Mehmet ÜLKER
Ahmet Can ALTUNİŞİK	DEMİRBAŞ	Hasan Ahmed KAZMEE	ÇUHADAROĞLU	Mehmet Barış Can
Yalçın ALVER	Ender DEMİREL	Mustafa Kubilay	Elişan Filiz PİROĞLU	ÜLKER
Bahadır ALYAVUZ	Mehmet Cüneyd	KELEŞOĞLU	Selim PUL	Yurdanur ÜNAL
Özgür ANIL	DEMİREL	Elçin KENTEL	Selçuk SAATÇI	Cüneyt VATANSEVER
Necati ARAS	Fatih DİKBAŞ	Havvanur KILIÇ	Selman SAĞLAM	Syed Tanvir WASTI
Yalın ARICI	Seyyit Ümit DİKMEN	Young Hoon KIM	Mehmet SALTAN	Mehmet YAKUT
Yalçın ARISOY	Ali Ersin DİNÇER	Ufuk KIRBAŞ	İlyas SARIBAŞ	Mehmet Cem YALÇIN
Musa Hakan ARSLAN	İsmail DURANYILDIZ	Veysel Şadan Özgür	Metin SARIGÖL	Aslı YALÇIN
Deniz ARTAN İLTER	Selim DÜNDAR	KIRCA	Afşin SARITAŞ	DAYIOĞLU
Şenay ATABAY	Nurhan ECEMİŞ ZEREN	Cem KIRLANGIÇOĞLU	Altuğ SAYGILI	Ahmet Cevdet
Ali Osman ATAHAH	Volkan Ş. EDİGER	Güven KIYMAZ	Serdar SELAMET	YALÇINER
Hakan Nuri ATAHAH	Muhammet Emin	Gökhan KIRKİL	Senem SEYİS	İsmail Özgür YAMAN
Hakan Nuri ATAHAH	EMİROĞLU	Kasım KOÇAK	Alper SEZER	Arcan YANIK
Bekir Özer AY	Murat Altuğ ERBERİK	Salih KOÇAK	Osman ŞİVRİKAYA	Mert Yücel YARDIMCI
Ersin AYDIN	Ali ERCAN	Niyazi Uğur KOÇKAL	Behzad SOLTANBEİĞİ	Ufuk YAZGAN
Gökçe AYDIN	Hakan ERDEM	Mehmet Melih KOŞUCU	Celal SOYARSLAN	Amil YAZICI
Hakan AYGÖREN	Sinan Turhan ERDOĞAN	Baha Vural KÖK	Serdar SOYÖZ	Halit YAZICI
Mustafa Tamer AYVAZ	Ramazhan Cüneyt	Mete KÖKEN	Rifat SÖNMEZ	Seda YEŞİLMEN
İhsan Engin BAL	ERENOĞLU	Şerife Yurdağul KUMCU	Tayfun Altuğ SÖYLEV	Tahsin Alper YIKICI
Selim BARADAN	Esin ERGEN	Murat KURUOĞLU	Erol ŞADOĞLU	İrem Zeynep YILDIRIM
Eray BARAN	PEHLEVAN	Akif KUTLU	Güvenç ŞAHİN	Mehmet
Türkay BARAN	Gökmen ERGÜN	Abdullah KÜRKCÜ	Olcay ŞAHİN	YILDIRIMOĞLU
Bekir Oğuz BARTIN	Bülent ERKMEN	Hilmi LUŞ	Ömer Lütfi ŞEN	Abdülazim YILDIZ
Eyüp Ensar BAŞAKIN	Barış ERKUŞ	Kasım MERMERTAŞ	Burak ŞENGÖZ	Koray Kamil YILMAZ
Özgür BAŞKAN	Tuğba ESKİŞAR TEFÇİ	Mehmet Murat MONKUL	Özkan ŞENGÜL	Mehmet YILMAZ
Niyazi Özgür BEZGİN	Burak FELEKOĞLU	Hamid MORTEZAİE	Aynur ŞENSOY	Mustafa Tolga YILMAZ
Senem BİLİR	Okan FISTIKOĞLU	Yetiş Şazi MURAT	ŞORMAN	Mustafa Tuğrul YILMAZ
MAHÇİÇEK	Abdullah GEDİKLİ	Sepanta NAİMİ	Karın ŞEŞETKAN	İsmail YÜCEL
Gökçen BOMBAR	Ergun GEDİZLİOĞLU	Öcal NECMİOĞLU	Okan ŞİRİN	Ömer YÜKSEK
Burak BOYACI	Ömer GİRAN	Sinan Melih NİĞDELİ	Ali Ünal ŞORMAN	Shaban Isamel Albrka Ali
İlknur BOZBEY	Zehra Canan GİRGİN	Elif OĞUZ	Gülüm TANIRCAN	ZANGENA
Zafer BOZKUŞ	Ilgın GÖKAŞAR	Fuad OKAY	Serhan TANYEL	Abdullah Can ZÜLFİKAR
Atıl BULU	Serdar GÖKTEPE	Umut OKKAN	Yüksel TAŞDEMİR	
Buru BURAK BAKIR	Fazlı Erol GÜLER			

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Teknik Dergi

Cilt: 33 Sayı: 6 Kasım 2022

İÇİNDEKİLER

Ayrılan Editörün Önsözü

Teknik Dergi'ye Umut Işığı Yeni Editör

Önsöz

Kurucu Editörümüze Teşekkürler Teknik Dergi İçin Kilometre Taşları ve Hedefler

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Doğu Akdeniz'deki Tsunamijenik Depremlerin Sosyal Risklerinin
Monte Carlo Yöntemi Değerlendirmesi12741
Cüneyt YAVUZ, Elçin KENTEL

Gömülü Betonarme Boruların Analitik ve Sayısal Yöntemler ile Tasarımı12761
Onur DEMİRCİ, Havvanur KILIÇ, Gökhan YAZICI

Türkiye'de Çıkan Endüstriyel Yan Ürünlerin Dolgu Özellikleri Üzerine
Deneysel Bir İnceleme.....12789
Irem Zeynep YILDIRIM

İnşaat Sektöründeki İş Kazalarının Hata Ağacı Analizi ile Değerlendirilmesi.....12817
Şerife AK, İsmail ZORLUER

Taşkın ve Rüşubat Kontrolünde Yeni Öneri: Gemiburnu Tıp Geçirgen Bent.....12847
Emre AKÇALI

Çok Amaçlı Ardışık Baraj Haznelerinin İşletmesinin HEC-ResSim ile
Simülasyonu12863
Seda SEVER, Recep YURTAL

Doğu Karadeniz Havzası Lokal Meteorolojik Değişkenleri İçin Bir Ölçek
İndirgeme Uygulaması ve Senaryo Esaslı Öngörüler.....12877
Sinan NACAR, Murat KANKAL, Umut OKKAN

Kentiçi Toplu Taşıma Sistemlerinde Performansa Dayalı Ödeme Modelinin
Geliştirilmesi 12913
Sezgin TEKİN, Halim CEYLAN, Sevil KÖFTECİ

İnşaat Sürecinin İş Çizelgelemesi, Yönetimi ve Optimizasyonu 12945
Önder Halis BETTEMİR, Ömer Faruk BULAK

Kozmik Işın Nötron Sayacı ile Ölçülen Toprak Neminin Hidrolojik
Modellerde Kullanımı 12987
Mustafa Berk DUYGU, Zuhale AKYÜREK

Hidrolojik Model Kalibrasyonunda Uydu Tabanlı Aylık Buharlaşma ve
LAI Verilerinin Kullanılması 13013
Muhammet Bahattin AVCUOĞLU, Mehmet Cüneyd DEMİREL

TEKNİK NOT

İnşaat Projelerinde Kalite Performansını Etkileyen Faktörler: Türkiye’de
Bir Alan Çalışması 13037
Merve KURU ERDEM, Gülben ÇALIŞ

Ayrılan Editörün Önsözü

TEKNİK DERGİ'YE UMUT IŞIĞI YENİ EDİTÖR

Teknik Dergi editörlüğünden ayrılmak istediğimi açıkladığımda, yeni editör konusunda bir önerim olup olmadığını sordular kibarca. Yaklaşık yirmi yıllık tanışıklığımız ve beş yıllık işbirliğimiz sırasındaki izlenimlerime dayanarak, Prof. Dr. Alper İlki'yi düşündüm en uygun aday olarak.

Böyle bir öneri konusunda kendisinin rızası olup olmadığını sorduğumda nezaketle kabul etti. İnşaat Mühendisleri Odası Yönetim Kurulu'nun önerimi onayladığını görmekten mutluyum.

* * *

Görev devri sırasındaki kısa konuşmama duygularımı dile getirerek başladım:

"Sevgili kızıyla evlenmek üzere kendisinin rızasını isteyen genç adama (nerede o eski güzel günler) her baba şöyle şeyler söylemek için şiddetli bir arzu duyar içinde:

'Bak evlâdım, bu kız benim gözümün bebeğidir. Sevgi ve şefkat dolu bir kalple yetiştirdim onu. Öylesine narin ve kırılgandır ki, ona olabildiğince sevgi, şefkat ve özenle davranacağına dair söz vermeni talep ediyorum senden. Yoksa...'

Alper gülümseyerek kesti sözümü:

'Demek istediğinizi çok iyi anlıyorum. Gerçekten benim de bir kızım var o yaşa yaklaşmakta olan. Sevgili derginize olabildiğince sevgi, şefkat ve özenle davranacağıma söz veriyorum.'

Tam anlamıyla tatmin oldum. Uluslararası dergi yayıncılığı ilkelerinin değişmekte, işlemlerin ve teknolojinin gelişmekte olduğu günümüz koşullarında, Prof. İlki'nin bu görevi benden daha iyi yapacağından hiçbir kuşku duymuyorum. Tüm kalbimle kendisine başarılar diliyorum.

* * *

Bu fırsattan yararlanarak, Teknik Dergi Yayın Kurulu'nun hem bugünkü hem de önceki üyelerine, Teknik Dergi'yi sürdürme ve geliştirme yolundaki değerli gayretleri için teşekkür ederim.

İnşaat Mühendisleri Odası'nın hem bugünkü hem de önceki Yönetim Kurullarına, yıllar boyu süren işbirliğimiz sırasındaki aralıksız destekleri için minnettar olduğumu belirtmek isterim.

Son olarak, iki eski ve değerli dostumu, Prof. Dr. Metin Ger ile merhum Ender Arkun'u anmak istiyorum. İkisi de işin en başından, 1989'da yaptığımız beyin fırtınası toplantılarından bugüne kadar en güvendiğim danışmanlarım oldular. Teknik Dergi'deki görevini bırakmayı artık çok istemesine rağmen, Prof. Ger Yayın Kurulu'nda kalmaya razı oldu. Teşekkür ederim Metin, desteğin, öğütlerin ve de benimle birlikte devam ediyor olduğun için.

En iyi dileklerle.

Prof. Dr. Tuğrul Tankut

KURUCU EDITÖRÜMÜZE TEŞEKKÜRLER TEKNİK DERGİ İÇİN KİLOMETRE TAŞLARI VE HEDEFLER

Değerli Teknik Dergi Yazar ve Okurları,

Teknik Dergi, kurulduğu 1990 yılından bu yana, mevcut ve önceki yayın kurulu üyeleri, hakemler, danışma kurulu üyeleri, katkıda bulunan yazarların özverili çabaları ve İnşaat Mühendisleri Odası Yönetim Kurulu'nun sürekli ve güçlü desteği ile giderek daha fazla tanınan ve prestijli bir dergi haline gelmiştir. Katkıda bulunanlar değerli kişi ve kurumlar arasında bir ismin özel olarak anılması gerekir; 1989 yılından bu yana Teknik Dergi'nin kurulması ve geliştirilmesi için uğraş veren Orta Doğu Teknik Üniversitesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Tuğrul Tankut. Hocamız, 34 yıl boyunca; liderliği, bilgeliği, disiplini, heyecanı ve çalışkanlığı ile Teknik Dergi'nin başarısının temel unsurlarından olmuştur.

Teknik Dergi, yayın hayatının 33'üncü yılında, editörlüğün ilk nesilden, bir sonraki nesile geçişine tanık oluyor. Kurucu editörümüz Profesör Tuğrul Tankut'un halefi olmak, büyük bir onur olmasının dışında, büyük bir sorumluluk da yüklüyor. Derginin editörünün ismi değişirken, önceki yayın kurulu Teknik Dergi'nin güçlü ve köklü ilkeleri doğrultusunda yüksek kalite standartlarından taviz vermeden çalışmalarına devam edecektir. Ayrıca, Profesör Tankut'un şimdi ve gelecekte Teknik Dergi yayın kurulunda görev yapmaya devam ederek, bizleri desteklemeye devam edecek olması da bizim için bir onurdur. Tuğrul Hocamız ile birlikte, Teknik Dergi'ye kuruluşundan bu yana katkıda bulunan Profesör Metin Ger hocamızın da yayın kurulunda görevine devam edecek olması bizler için ayrı bir mutluluk kaynağıdır.

Bu vesileyle Teknik Dergi'nin kilometre taşlarının bir özeti aşağıda özetlenmiştir:

1990 Ocak; Teknik Dergi'nin ilk sayısı yayımlandı

2004 Ocak; Teknik Dergi'nin tüm sayılarına ücretsiz çevrimiçi erişim imkanı sağlandı

2008 Temmuz; Teknik Dergi, Web of Science Core Collection-Science Citation Index Expanded (SCIE) kapsamında

2017 Ocak; çevrimiçi makale iletimi, iletişim, inceleme ve karar prosedürü uygulanmaya başladı

2017 Ocak; makalelere kabul sonrası hemen DOI ataması yapılması ve makalelerin çevrimiçi yayınlanması

2018 Ocak; iki dilli Teknik Dergi; yılda 3 sayı Türkçe, 3 sayı İngilizce

2019 Ocak; sürdürülebilirlik hedeflerine yönelik; çevrimiçi yayın ve dağıtım (sınırlı kağıt baskı)

2021 Şubat; Dünyanın farklı ülkelerinden seçkin uzmanlardan oluşan danışma kurulunun oluşturulması

2022 Ocak; İngilizce sayıların yılda üçten, dörde çıkarılması

2023 Ocak; Dergi isminin "Turkish Journal of Civil Engineering" olarak değiştirilmesi

2023 Ocak; Tüm sayıların İngilizce olarak basımı (bazı sayılarda sınırlı sayıda Türkçe makale de olabilecek)

Web of Science Core Collection ve Scopus tarafından indekslenen, inşaat mühendisliği alanında Türkiye'nin ilk ve tek dergisi Teknik Dergi için 2023 yılında belirlediğimiz hedefler; gönderilen yazıların daha hızlı değerlendirilmesi, daha fazla uluslararasılaşma, daha geniş tanınma ve dergi sıralaması açısından ileriye gitme. Burada belirtmek gerekir ki, derginin yazarlara ücretsiz açık erişim özelliği 1990 yılından beri olduğu gibi devam edecektir. Teknik Dergi'nin bu eşsiz özelliğinden de gurur duyuyoruz. Gelişen teknolojiye ve son gelişmelere uyum sağlayarak etik ve yerleşik ilkelerini sürekli olarak takip eden bu eşsiz ve ilerleyen dergiye dünyanın dört bir yanından kaliteli katkılar almayı dört gözle bekliyoruz.

Alper İlki

Yayın Kurulu adına

Doğu Akdeniz'deki Tsunamijenik Depremlerin Sosyal Risklerinin Monte Carlo Yöntemi Değerlendirmesi

Cüneyt YAVUZ¹
Elçin KENTEL²

ÖZ

Bu çalışmada tarihteki büyük depremlere benzer bir tsunamijenik depremin Türkiye'nin Doğu Akdeniz kıyısında yer alan kritik bölgelerde yaratacağı olası sosyal riskler analiz edilmiştir. Deprem kaynağı olarak 365 Girit, 1222 Paphos ve 1303 Girit depremlerinden yararlanılarak Monte Carlo yöntemi ile rastgele depremler oluşturulmuş ve Nami-Dance yazılımı kullanılarak deprem kaynaklı tsunamiler modellenmiştir. Türkiye'nin Doğu Akdeniz kıyısında bulunan yerleşim yerleri, tarım alanları, limanlar ve havaalanları gibi kritik bölgeler için tsunami dalga yükseklikleri ve bağıl sosyal risk seviyeleri hesaplanmıştır. Alanya Kıyı Şeridi ve Çukurova Tarım Alanı'ndaki bağıl sosyal riskler her üç deprem lokasyonu için de "Çok Yüksek Sosyal Risk" seviyesinde çıkmıştır. Bu çalışmanın sonuçları ileride yaşanması muhtemel deprem kaynaklı bir tsunamiden korunabilmek için alınacak tedbirlerin belirlenmesi açısından yerel otoriteler ve kamu kurumlarına bilimsel bir kaynak olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Tsunamijenik depremler, monte carlo simülasyonu, sosyal risk analizi.

ABSTRACT

Social Risk Evaluation of Tsunamigenic Earthquakes using Monte Carlo Simulations in the Eastern Mediterranean Sea

A comprehensive social risk analysis is performed in this study to evaluate probable social risks due to a tsunamigenic earthquake similar to the great earthquakes in history. Using 365 Crete, 1222 Paphos and 1303 Crete earthquake locations as earthquake sources, random earthquakes were created with Monte Carlo method and earthquake-triggered tsunamis are modeled using Nami-Dance software. Inundations and relative social risk levels are calculated for each selected critical region such as city centers, agricultural areas, ports, and

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 13 Kasım 2020 günü ulaşmıştır. 13 Ağustos 2021 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Ocak 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.825393>

1 Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İnşaat Teknolojisi Bölümü, Kütahya
cuneyt.yavuz@dpu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-9767-7234>

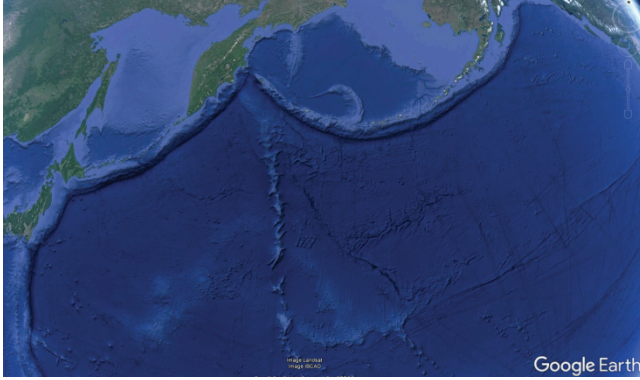
2 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara
ekentel@metu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-7477-0345>

airports located at the Turkish Eastern Mediterranean coastline. Alanya Coastline and Cukurova Agricultural Area are evaluated to have “Extreme Risk Level” according to the relative social risk assessment studies for all tsunamigenic earthquake location. The results of this study will be a reliable scientific source for the local and governmental authorities in planning necessary precautions against a probable tsunami event.

Keywords: Tsunamigenic earthquakes, monte carlo simulation, social risk analysis.

1. GİRİŞ

Faylar yeryüzü kabuğu üzerinde bulunan hatta göz ile görülebilen kırık kısımlardır [1]. Bazı faylar dünya yüzeyinde gözle görünür kırıklar oluşturur, bazıları oluşturmaz. Son 10000 yılda yeryüzünde kırık oluşturan faylar aktif fay olarak isimlendirilir. Diğer kısım faylar ise kör faylardır [2]. Dünya kabuğunda göz ile görülen fay hatlarına en iyi örneklerden biri “Ateş Çemberi” olarak ifade edilen Pasifik Okyanusu tabanında bulunan fay hattıdır (Fotoğraf 1).



Fotoğraf 1 - “Ateş çemberi” ile isimlendirilen Pasifik fay hattı [3]

Bütün depremler tsunami oluşturmazlar. Tsunami oluşması için en önemli kriter, deniz tabanında veya topoğrafyasında oluşan ani değişimlerdir. Deniz içerisinde oluşan depremler, volkanik aktiviteler, toprak kayması, buzul kırılmaları, ve meteor düşmesi gibi nedenler tsunamileri oluşturan başlıca etmenlerdir. En büyük tsunamiler fay hatlarının dalma-batma zonlarında oluşan depremlerden sonra gözlemlenir. Tektonik plakaların çarpışma bölgelerinde meydana gelen yüksek sismik aktiviteler, deniz tabanına yakın bölgelerde yıkıcı depremler oluşmasına neden olur. Plakalar birbirlerine doğru kayarken, deniz tabanında binlerce kilometreyi bulan alanda yer değiştirmeler oluşturur [4]. Deniz tabanında deprem kaynaklı bir atım oluştuğunda, atım üzerinde bulunan tüm su tabakasına büyük bir enerji aktarımı gerçekleşir. Bu enerji deniz yüzeyinde su seviyesinin yükselmesine (tsunami) ve yayılmasına neden olur. Derin denizde tsunami dalgalarının yüksekliği birkaç santimetre olabilirken hızı su derinliği ve yerçekiminin bir fonksiyonu olarak $V = \sqrt{gh}$ formülü ile hesaplanır. Kıyıya yaklaştıkça dalgaların hızı azalır fakat bu durumda dalga yükseklikleri artar ve metrelerce yükseklikteki dalgalar büyük bir enerji ile kıyı şeridinde önemli ölçüde zarar verebilir. Geçmişten günümüze kadar meydana gelen tsunami olayları, kıyı şeridinde

yaşayan insanların ölümüne, tarım alanlarının yok olmasına ve kıyıda yapılmış bir çok önemli yapının zarar görmesine neden olmuştur.

Çizelge 1 - Bu çalışmada kullanılan deprem parametreleri ve tanımları [8]

Parametre	Açıklama	Nami-Dance Girdisi	Bağımlı Parametre mi?	Depremden Depreme Değişim
Batimetri	Deprem ve tsunami simülasyonu için seçilen bölge	Evet	Hayır	Hayır
Izgara Büyüklüğü	Batimetriye bağlı	Evet	Hayır	Hayır
Deprem Büyüklüğü (M_w)	Sismik momentin bir fonksiyonu	Evet	Hayır	Evet
Fokal Derinlik	Deprem iç merkezini (hypocenter) ifade eder. İç merkez ise kabuk kısmında kırılmanın başladığı Hayırtadır.	Evet	Hayır	Evet
Boylam Enlem	Kırılan bölgenin lokasyonu	Evet	Evet	Evet
Doğrultu Açısı	Fayın kuzey yönüne göre açısı	Evet	Evet	Fayın lokasyonuna bağlı
Dalma Açısı	Kırığın yatay düzleme göre açısı	Evet	Evet	Hayır
Eğim Açısı	Kırılma anında fayın hareket eden parçasının fay doğrultusuna olan açısı	Evet	Evet	Fayın türüne bağlı
Atım Miktarı	Fayın önceden belirlenen referans Hayırtasından olan yer değiştirme oranı	Evet	Evet	Deprem büyüklüğüne bağlı
Sismik Moment (M_0)	Kayma modülü, fay uzunluğu, fay genişliği ve atım miktarının bir fonksiyonu	Hayır	Evet	Evet
Fay Uzunluğu (L)		Evet	Evet	Evet
Fay Genişliği (W)		Evet	Evet	Evet

Akdeniz 3900 km uzunluğu, 1600 km maksimum genişliği ve 4400 m ye varan su derinliği ile dünya üzerindeki iç denizlerin en büyüklerinden biridir. Doğu Akdeniz'de günümüzde bile yüksek sismik aktivitenin gözleendiği Helenik ve Kıbrıs batma-dalma zonları bulunmaktadır. Son 3000 yılda bu fay hatları üzerinde oluşan depremlerin bir sonucu olarak en az 96 tsunami olayı kayıtlara geçmiştir [5]. Doğu Akdeniz kıyıları tarih boyunca birçok medeniyetin beşiği olmuştur ve antik dünyanın yedi harikasından dördü Akdeniz kıyı şeridinde inşa edilmiştir. Akdeniz kıyılarında pek çok antik kent insanlık tarafından inşa edilmiş ve başta depremler ve tsunamiler olmak üzere doğal afetler nedeniyle harap olmuştur. Son yıllarda Türkiye'nin Akdeniz sahilleri büyük ticari limanlar, hava limanları, petrol-doğalgaz boru hatları ve enerji tesisleri ile yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır [6]. Bu bölgede olası yeni bir tsunamijenik depremin yaşanması durumunda günümüz koşullarında Türkiye'nin Doğu Akdeniz kıyılarında bulunan kritik bölgelerde oluşacak sosyal risk seviyelerinin detaylı araştırmaları ve değerlendirmeleri bulunmamaktadır.

Bu çalışmada, ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Kıyı ve Liman Laboratuvarı tarafından geliştirilen Nami-Dance tsunami simülasyon programı kullanılmıştır [7]. Birleşik Devletler Jeolojik Araştırma Enstitüsü (USGS) deprem parametrelerinin tanımlarından oluşan kapsamlı bir deprem sözlüğü oluşturmuştur [8]. Deprem simülasyonları için gereken parametreler ve bu parametrelerin USGS tarafından hazırlanmış olan tanımları Çizelge 1'de verilmiştir. Bu çalışmada kaynak olarak kullanılan 365 Girit, 1222 Paphos ve 1303 Girit depremlerinin enlem ve boylamları, doğrultu, dalma ve eğim açıları literatürden elde edilmiştir. Deprem büyüklüğü (M_w) ve *Fokal derinlik* ise her bir Monte Carlo simülasyonunda bu değişkenleri temsil eden olasılık dağılımlarından rastgele seçilmiştir.

2. TEORİK METOT

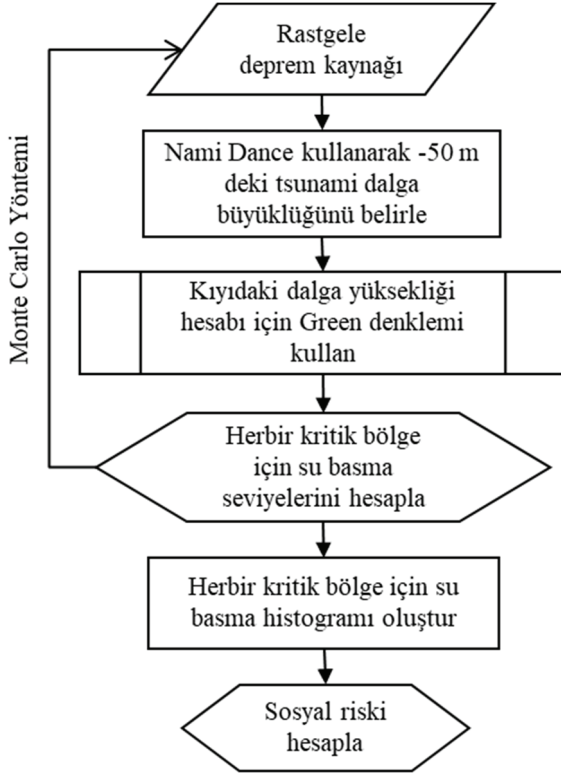
Türkiye'nin Doğu Akdeniz sahillerinde bulunan yerleşim yerleri, tarım alanları, limanları ve havaalanlarının olası bir tsunami tehlikesi durumunda sosyal risk seviyelerinin nasıl hesaplanacağı konusundaki iş akış şeması Çizim 1'de verilmiştir.

Bu çalışmada, üç farklı lokasyon için - 365 Girit, 1222 Paphos ve 1303 Girit depremlerinin lokasyonları – Monte Carlo yöntemi ile probabilistic tsunami simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Her bir tarihsel deprem lokasyonunda Monte Carlo yöntemi kullanılarak farklı büyüklük ve fokal derinliğe sahip 1000'er rastgele deprem kaynağı oluşturulmuş ve olası deprem kaynaklı tsunamilerin Nami Dance Programı kullanılarak simülasyonları yapılmıştır. Simülasyon sonucunda elde edilen tsunami dalgalarından kaynaklı su basma seviyeleri ve seçilen kritik bölgelerdeki kişi sayısı dikkate alınarak da sosyal risk analizi yapılmıştır.

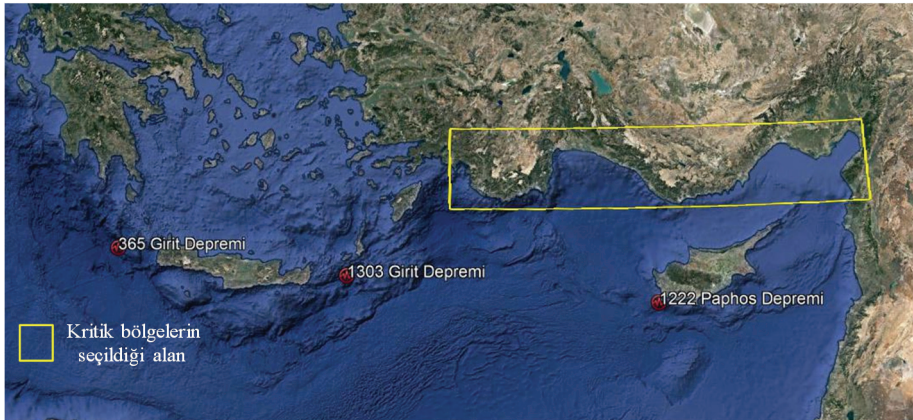
2.1. Çalışma Alanı

Doğu Akdeniz Alp-Himalaya kıta kabuğunun içerisinde yer almaktadır. Bu bölgede dünyada olan depremlerin 15% oluşmaktadır [9]. Bu bölgedeki insanlar tarih boyunca Helenik ve Kıbrıs fayları üzerinde olmuş birçok yıkıcı deprem ve tsunamiler yaşamışlardır. Son 3 bin yılda Doğu Akdeniz'de 90 nın üzerinde tsunami olayı kayıtlara geçmiştir [911]. Bu da ortalama her 30 yılda bir tsunami olayının görülme ihtimali olduğunu ve bölgenin aktif sismik yapısını gözler önüne sermektedir. Doğu Akdeniz çalışma alanı Fotoğraf 2'de

verilmiştir. Çalışma kapsamında seçilen toplam 32 adet kritik bölge, koordinatları, risk analizinde kullanılan alanları ve literatürden elde edilen nüfus yoğunlukları [12] Çizelge 2’de verilmiştir.



Çizim 1 - Bu çalışmada kullanılan sosyal risk analizi adımları



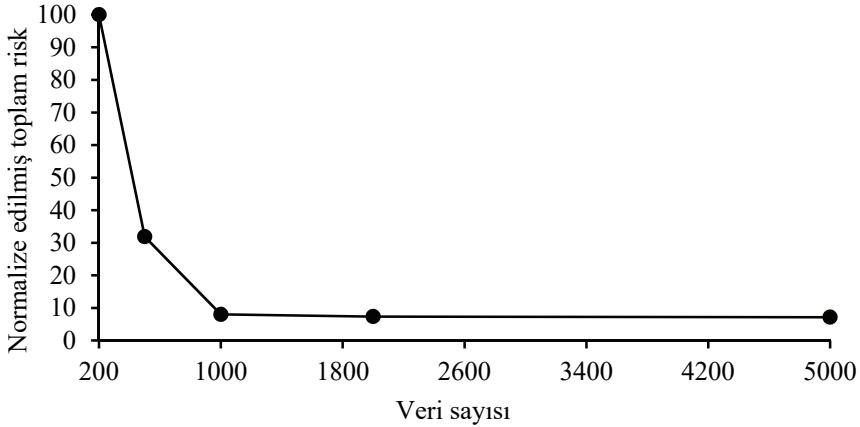
Fotoğraf 2 - Çalışma alanı [3]

Çizelge 2 - Çalışma alanında seçilmiş olan kritik bölgeler

Kritik Bölge	İl	Koordinatlar		Yaklaşık Alan (km ²)	Nüfus yoğunluğu [12] (kişi/km ²)
		Enlem	Boylam		
Akdeniz Tatil Köyleri	Antalya	36.39	34.25	8.22	270
Alanya Kıyı Şeridi	Antalya	36.32	32.02	10.78	186
Anamur Kıyı Şeridi	Mersin	36.03	32.51	2.49	49
Antalya Konyaalti	Antalya	36.51	30.37	10.70	300
Arsuz Tatil Köyleri	Hatay	36.25	35.54	4.66	104
Belek Tatil Köyleri	Antalya	36.51	31.03	27.25	4548
Dalaman Şehir Merkezi	Muğla	36.46	28.48	7.79	60
Demre Şehir Merkezi	Antalya	36.14	29.59	15.59	55
Erdemli Şehir Merkezi	Mersin	36.36	34.18	3.56	65
Fethiye Şehir Merkezi	Muğla	36.39	29.07	12.83	50
Finike Şehir Merkezi	Antalya	36.17	30.08	3.39	73
İskenderun Şehir Merkezi	Hatay	36.34	36.1	15.84	999
Kazanlı Şehir Merkezi	Mersin	36.48	34.45	1.04	65
Kemer Şehir Merkezi	Antalya	36.36	30.33	2.44	102
Kızkalesi Tatil Köyleri	Mersin	36.27	34.08	0.69	14
Manavgat Kıyı Şeridi	Antalya	36.46	31.23	25.24	98
Mersin Şehir Merkezi	Mersin	36.47	34.37	19.02	114
Samandağ Şehir Merkezi	Hatay	36.05	35.58	4.30	267
Sarıseki Şehir Merkezi	Hatay	36.4	36.13	1.16	100
Susanoğlu Tatil Köyleri	Mersin	36.22	34.08	8.32	400
Taşucu Şehir Merkezi	Mersin	36.19	33.53	7.25	45
Türkler Tatil Köyleri	Antalya	36.36	31.49	7.60	4044
Yemişkumu Tatil Köyleri	Mersin	36.29	34.1	0.19	1557
Dalaman Havaalanı	Muğla	36.42	28.47	6.43	10112
İskenderun Limanı	Hatay	36.35	36.11	3.79	137
Mersin Limanı	Mersin	36.48	34.39	4.93	1410
MMK Metalurji Limanı	Hatay	36.46	36.12	0.64	4314
Akdeniz Limanı	Antalya	36.5	30.36	2.25	1198
Tırtar Yat Limanı	Mersin	36.31	34.13	0.15	278
Çukurova Tarım Alanı	Adana	36.45	35.14	2306	1 (kişi/ha)
Dalaman Tarım Alanı	Muğla	36.46	28.48	80	7 (kişi/ha)
Samandag Tarım Alanı	Hatay	36.03	35.58	19	3 (kişi/ha)

2.2. Monte Carlo Yöntemi ile Tsunami Analizi

Monte Carlo yönteminde değerleri ilgili olasılık dağılımından rastgele seçilen parametrenin bağımsız parametreler olmaları esastır. Doğu Akdeniz’de Helenik ve Kıbrıs fayları üzerinde oluşmuş tarihsel depremlerin M_w ve *Fokal derinlik* değerleri dikkate alınarak bu iki bağımsız değişken için olasılık yoğunluk fonksiyonları oluşturulmuştur. M_w ve *Fokal derinlik* için oluşturulan olasılık yoğunluk fonksiyonlarına uygun dağılımlar seçilmiş ve uygunluk derecesi Kolmogorov-Smirnov yöntemi ile test edilmiştir [13]. Güvenilir bir risk analizi yapabilmek için gereken Monte Carlo simülasyon sayısı için Yavuz vd. [13] tarafından yapılan bir çalışma sonucunda yaklaşık 1000 civarında simülasyonun güvenilir bir risk analizi için yeterli olduğu gösterilmiştir (Çizim 2). Dolayısıyla her bir kaynak için (365 Girit, 1222 Paphos ve 1303 Girit lokasyonları) belirlenen dağılımlardan 1000’er adet rastgele deprem verisi üretilmiştir. Deprem kaynağının tanımlanabilmesi için gerekli diğer bağımlı parametreler (doğrultu, eğim ve dalma açıları, enlem ve boylam) literatürden elde edilmiştir (Çizelge 3) [9-11]. Daha sonra, Nami-Dance programı kullanılarak rasgele depremlerden kaynaklı oluşan tsunamiler modellenmiştir.



Çizim 2 - Normalize edilmiş toplam riskin veri sayısı ile değişimi [13]

Çizelge 3 - 365 Girit, 1222 Paphos ve 1303 Girit için bağımlı deprem parametreleri [9-11]

Bağımlı deprem parametreleri	365 Girit Depremi	1222 Paphos Depremi	1303 Girit Depremi
Boylam	24° 48' 00"	32° 36' 00"	27° 00' 00"
Enlem	35° 14' 00"	34° 42' 00"	35° 00' 00"
Doğrultu açısı (°)	295	305	115
Dalma açısı (°)	15	35	45
Eğim açısı (°)	90	110	110

2.3. Deprem Parametrelerinin Hesaplanması

Nami-Dance simülasyon programında kullanılacak deprem verileri Çizelge 1'de verilmiştir. Çizelge 3'te verilen bağımlı parametreler için doğrudan ilgili depremin literatürde verilen değerleri alınmıştır. Ayrıca her bir tarihsel deprem için 1000'er adet rastgele seçilen M_w ve *Fokal derinlik* parametreleri Monte Carlo simülasyonlarında kullanılmıştır. M_w ye bağlı olan diğer deprem parametreleri literatürde yaygın bir şekilde kullanılan ampirik formüller kullanılarak hesaplanmıştır.

Hanks ve Kanamori [14] M_0 nun Çizelge 1'de verilen deprem parametreleri ile depremin büyüklüğünün bir ifadesi olduğunu göstermiştir (Eş. 1).

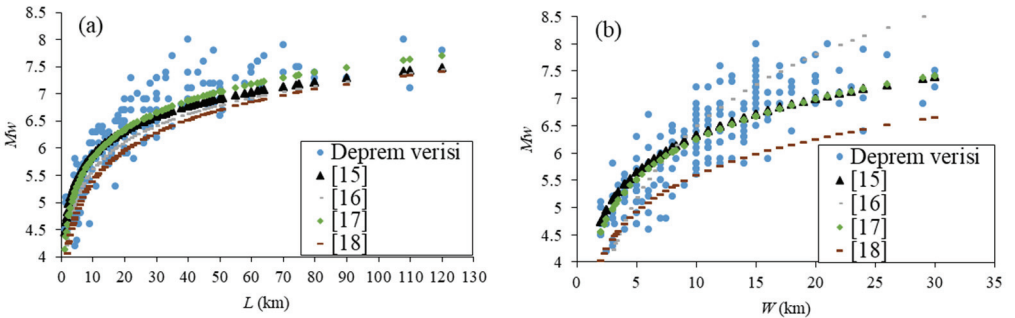
$$M_0 = \mu LWD \quad (1)$$

burada μ kabuğun kayma modülü (malzemenin türüne bağlı), L fay uzunluğu, W fay genişliği, ve D atım miktarıdır.

M_w ve M_0 arasındaki ilişkiyi gösteren ampirik eşitlik ise [14]:

$$M_w = \frac{2}{3} \log(M_0) - 10.7 \quad (2)$$

Hanks ve Kanamori [14] tarafından ortaya konan bu iki eşitlik ile deprem parametreleri hesaplanabilse de M_0 eşitliğindeki parametreler arasındaki nitel farklılığın belirsizliği ve deprem kataloglarında kırılan alanın net olarak belirlenememesi özellikle atım miktarlarının yanlış yorumlanmasına neden olmaktadır. Örneğin L ve W değerleri küçük tutularak D değeri yükseltilmekte ve benzer deprem büyüklükleri için farklı atım miktarları hesaplanabilmektedir. Bu belirsizliği çözmek adına, M_w - L , ve M_w - W arasındaki ilişkiyi belirlemek için farklı çalışmalar incelenmiş ve Çizim 3'te bu çalışmalardaki bulgular aynı deprem büyüklükleri dikkate alınarak gösterilmiştir. Çizim 3'te farklı bilim insanlarının M_w - L , ve M_w - W arasındaki ilişkiyi belirlemek için önermiş oldukları eşitlikler aynı deprem verisi üzerine işlenmiş ve aşağıdaki eğriler elde edilmiştir.



Çizim 3 - Farklı bilimsel kaynaklara göre (a) M_w - L ve (b) M_w - W ilişkileri [13]

İncelenen çalışmalar Wells ve Coppersmith [15] tarafından önerilen ve regresyon analizleri ile desteklenen eşitliklerin M_w-L , ve M_w-W arasındaki ilişkiyi en uygun şekilde ortaya koyduğunu göstermektedir. Buna göre:

$$M_w = 4.38 + 1.49 \log(L) \quad (3)$$

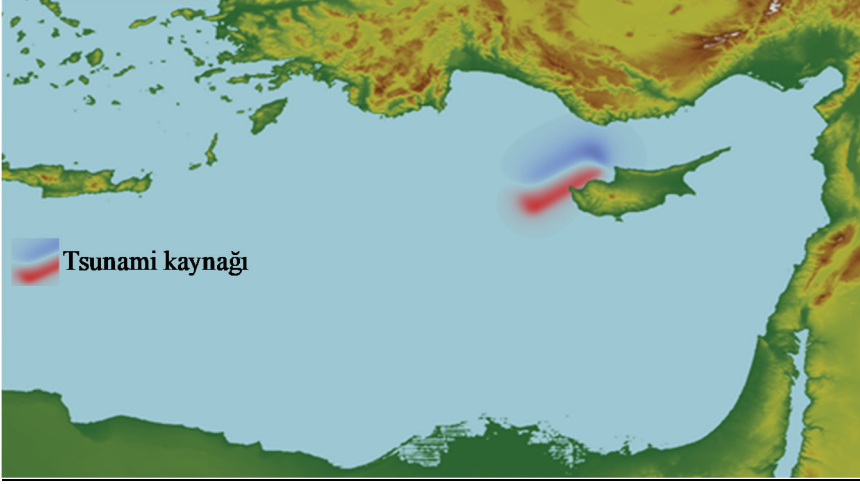
$$M_w = 4.06 + 2.25 \log(W) \quad (4)$$

eşitlikleri bu çalışmada L ve W nin belirlenmesi için kullanılmıştır. Daha sonra D Eş.1 kullanılarak belirlenmiştir. Bu şekilde deprem parametrelerinin herhangi bir yolla yanlış yorumlanıp karmaşık sonuçların çıkmaması sağlanmıştır.

2.4. Tsunami Simülasyonları ve Su Basma Seviyelerinin Hesaplanması

Türkiye'nin Akdeniz sahilleri çok uzun ve çalışma alanı çok büyük olduğu için kıyı şeridinin ve sahil kısımlarının yüksek çözünürlüklü haritaların elde edilme şansı bulunmamaktadır. Bu durum simülasyon sonucunda 0 m deniz seviyesinde tsunami dalga yüksekliğinin doğru bir şekilde hesaplanamamasına neden olmaktadır. Her bir kritik bölge için dalga yükseklikleri -50 m açığa dijital bir ölçek tanımlanıp, bu ölçekten elde edilen dalga yüksekliğinin Green eşitliği kullanılarak -1 m seviyesine taşınması ile çözülmüştür. Bu çalışmada tsunami değerlendirmesi, yayılımı ve su basmalarını simüle edebilen bir kapasiteye sahip olan ve ODTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümü Kıyı ve Liman Laboravuarı öğretim üyelerinin katkılarıyla geliştirilen Nami-Dance programı kullanılmıştır. Nami Dance yazılımı deprem girdilerine dayanarak bir deprem ve tsunami kaynağı oluşturmaktadır. Nami-Dance, deniz yüzeyi ve deniz tabanı topoğrafyasının sınır koşullarını oluşturduğu doğrusal olmayan sığ su denklemleri kullanır [7]. Global bir kütlelenin korunumu denkleminin dikkate alınarak derivasyonları yapılan sığ su denklemleri uzun dalga varsayımı ile tsunami yayılım koşullarını büyük bir kesinlikle sağlamaktadır [7]. Sığ su denklemlerinde deniz derinliği ekseninde değişen düşey hız değişimi olmadığı ve basınç gradiyentinin neredeyse hidrostatik koşullarda olduğu kabulü yapılır. Bu kabuller dikkate alınarak sığ su denklemleri süreklilik ve momentum denklemlerinin birlikte analizi ile Nami-Dance programında derive edilir [7]. Herbir rastgele deprem için parametreler belirlenmiş ve Nami-Dance programına manuel olarak girilmiştir. Nami Dance programı ile çalışma alanında oluşturulmuş örnek bir tsunami kaynağı Fotoğraf 3'te gösterilmiştir.

Karanın iç kısımlarında güvenilir su basma seviyeleri hesaplayabilmek için batimetri ve kritik bölgelerin topoğrafik haritalarının çözünürlüğünün yüksek olması gerekmektedir. Bu tip yüksek çözünürlüklü haritaların elde edilmesi oldukça zor ve tsunami simülasyonları da bu çalışmadaki gibi büyük alanlarda çok uzun süreler almaktadır. Ayrıca bu çalışmanın amacı kritik bölgelerdeki bağıl sosyal risklerin belirlenmesidir. Bu açıdan, simülasyonlarda -50 m'ye yerleştirilmiş dijital ölçeklerden elde edilen verilerin Green eşitliği kullanılarak kıyıya taşınması büyük kolaylık sağlayamaktadır. Aynı yöntem ile tsunami dalgalarının kıyıya taşındığı ve güvenilir sonuçlar elde edilen çalışmalar da vardır [19-20]. Green eşitliği aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir [21]:



Fotoğraf 3 - Nami-Dance kullanılarak oluşturulmuş örnek tsunami kaynağı

$$\frac{H_1}{H_{50}} = \left(\frac{d_{50}}{d_1} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

burada H_{50} ve H_1 sırasıyla 50 m ve 1 m su derinliklerindeki tsunami dalga yüksekliklerini, d_{50} ve d_1 sırasıyla 50 m ve 1 m su derinliklerini göstermektedir. Bu eşitlik ile her bir kritik bölge için 50 m su derinliğinde simülasyondan elde edilen tsunami dalga yüksekliği 1 m su derinliğinin bulunduğu noktalarda hesaplanmaktadır.

2.5. Sosyal Risk Analizi

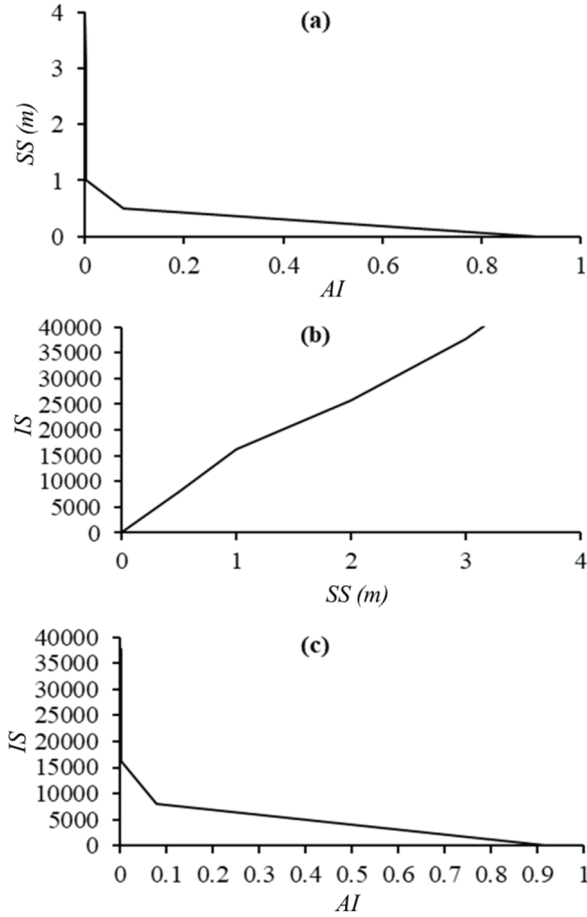
Literatürde risk, bir olayın gerçekleşme olasılığı (beklenen değer) ile o olaya ait sonuçların (gerçekleşen değer) bir bileşimi olarak tanımlanır [22]. Riski bir eşitlik ile ifade etmek gerekirse:

$$Risk = Olasılık * Sonuç \quad (6)$$

bu çalışmada *Sonuç* tsunami sebebiyle su altında kalan bölgedeki sosyal etkileri ifade etmektedir. *Olasılık* ise ilgili olayın olma ihtimalini belirtmektedir.

Bu çalışmadaki sosyal risk hesaplarında sonuç, tsunami nedeniyle zarar gören insan sayısını (*IS*) ifade etmektedir. Bir insana zarar verebilecek tsunami dalga yükseliği literatür incelemelerine dayanarak 0.5 m olarak kabul edilmiştir [23,24,25]. Sosyal risk analizi için 3 aşamalı bir hesaplama yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde, öncelikle Monte Carlo simülasyonlarından elde edilen rastgele deprem kaynağı verilerinin olasılıksal analizinden elde edilen aşılma ihtimali (*AI*) değerleri ile tsunami simülasyonları sonucunda elde edilen su basma seviyeleri kullanılarak aşılma ihtimali (*AI*) - su basma seviyesi (*SS*) eğrileri hazırlanır. Aşılma ihtimalinde dikkate alınan su basma seviyesi, bir insanı fiziksel olarak

etkilebilecek minimum su derinliği (0.5 m) olarak dikkate alınır [23,24,25]. Daha sonra literatüden elde edilen veriler ile tsunami simülasyonlarında elde edilen su basma seviyeleri kullanılarak, her bir su basma seviyesine karşılık zarar göreceği öngörülen insan sayısı belirlenir. Bu sayede her bir su basma seviyesinde zarar göreceği hesaplanan insan sayısı eğrisi ($IS-SS$) belirlenir. Son olarak ilk iki eğrinin kombinasyonundan, verilerinin olasılıksal analizinden elde edilen aşılma ihtimaline karşılık gelen zarar gören insan sayısı eğrisi ($IS-AI$) çizilerek olasılıksal sosyal risk analizi için gerekli girdi elde edilir. Çizim 4'te sosyal risk hesabı için hazırlanmış 3 aşamalı hesaplama yöntemini gösteren örnek eğriler verilmiştir.



Çizim 4 - Sosyal risk hesabında kullanılan örnek (a) $AI-SS$, (b) $IS-SS$ ve (c) $IS-AI$ grafikleri

Doğal veya insan kaynaklı afetlerden dolayı oluşması muhtemel zararların risk analizi yapılırken daha güvenilir veri elde edebilmek için insanların zarar görebilirlik seviyelerinin (C_{zarar}) belirlenmesi benimsenmiştir. İnsanların zarar görebilirlik seviyelerinin

belirlenmesinde literatürde genellikle insanların gelir seviyeleri (I_{gelir}), eğitim seviyeleri ($I_{eğitim}$), sağlık seviyeleri ($I_{sağlık}$) ve altyapı hizmetlerine erişim ($I_{altyapı}$) gibi yaşam endeksi değerleri indikatörler olarak kullanılmaktadır [13, 26-29]. Bu çalışmada da insanların zarar görebilirlik seviyelerinin belirlenmesinde bu dört indikatörün normalize edilmiş değerleri kullanılmıştır. Normalizasyon, seçilen kritik bölgelerin buldukları şehirlerin yaşam endeksi değerinin diğer iller arasında en yüksek değere sahip olan ilin yaşam endeksine bölünmesi ile elde edilir:

$$N_{I_{gelir}} = \frac{I_{gelir_{il}}}{I_{gelir_{En\ yüksek}}}, N_{I_{eğitim}} = \frac{I_{eğitim_{il}}}{I_{eğitim_{En\ yüksek}}}, \quad (7)$$

$$N_{I_{sağlık}} = \frac{I_{sağlık_{il}}}{I_{sağlık_{En\ yüksek}}}, N_{I_{altyapı}} = \frac{I_{altyapı_{il}}}{I_{altyapı_{En\ yüksek}}}$$

burada $N_{I_{gelir}}$ normalize edilmiş gelir seviyesi, $N_{I_{eğitim}}$ normalize edilmiş eğitim seviyesi, $N_{I_{sağlık}}$ normalize edilmiş sağlık seviyeleri, ve $N_{I_{altyapı}}$ normalize edilmiş altyapı hizmetlerine erişim, $I_{gelir_{il}}$ seçilen kritik bölgelerin bulunduğu şehirlerdeki insanların gelir seviyeleri, $I_{eğitim_{il}}$ seçilen kritik bölgelerin bulunduğu şehirlerdeki insanların eğitim seviyeleri, $I_{sağlık_{il}}$ seçilen kritik bölgelerin bulunduğu şehirlerdeki insanların sağlık seviyeleri, $I_{altyapı_{il}}$ ise seçilen kritik bölgelerin bulunduğu şehirlerdeki insanların altyapı hizmetlerine erişim oranıdır. $I_{gelir_{En\ yüksek}}$, $I_{eğitim_{En\ yüksek}}$, $I_{sağlık_{En\ yüksek}}$, ve $I_{altyapı_{En\ yüksek}}$ değerleri ise seçilen kritik bölgelerin bulunduğu şehirler arasında bu indekslerin en yüksek değerlerine sahip il verisidir. Belirtilen illerin ilgili indeksleri Çizelge 4'te verilmiştir. Her bir indikatörün en yüksek değeri gri ile işaretlenmiştir. Bu çalışmada zarar görebilirlik, C_{zarar} bu dört indikatör kullanılarak aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır:

$$C_{zarar} = \frac{1}{4\{N_{I_{gelir}} + N_{I_{eğitim}} + N_{I_{sağlık}} + N_{I_{altyapı}}\}} \quad (8)$$

Çizelge 4 - Kritik bölgelerin bulunduğu şehirlerin zarar görebilirlik indikatörleri [29]

Şehir	Zarar görebilirlik indikatörleri			
	I_{gelir}	$I_{eğitim}$	$I_{sağlık}$	$I_{altyapı}$
Adana	0.3506	0.4477	0.5039	0.6784
Antalya	0.5838	0.6437	0.6249	0.6237
Hatay	0.3536	0.5254	0.5046	0.4223
Mersin	0.2885	0.6418	0.5062	0.5253
Muğla	0.5527	0.6139	0.7042	0.5301

Bu çalışmada Türkiye'nin Doğu Akdeniz sahillerinden seçilen kritik bölgelerin buldukları iller için hesaplanan C_{zarar} değerleri Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5 - Şehirlerin C_{zarar} değerleri

Şehir	C_{zarar}
Adana	1.33
Antalya	1.05
Hatay	1.45
Mersin	1.34
Muğla	1.09

Sosyal risk hesabında insanların kritik bölgenin tamamında homojen bir şekilde dağılım gösterdiği varsayılmaktadır. Tsunami dalga yüksekliğinin 0.50 m ve daha yüksek olarak gözlemlendiği bölgeler sosyal risk hesabına dahil edilmiştir. Her bir kritik bölge için o bölgeye ait $IS-AI$ eğrisinin altında kalan alanın integrasyonu ile sosyal risk hesaplanmaktadır. Sosyal risk eşitliği:

$$Risk_{sosyal} \begin{cases} 0 & SS < 0.5 \text{ m} & ise \\ \sum \Delta P \overline{SZ} & SS \geq 0.5 \text{ m} & ise \end{cases} \quad (9)$$

burada $\Delta P = |P_j - P_{j-1}|$ j ve $j - 1$ olarak ifade edilen iki AI arasında kalan olasılık, $\overline{SZ} = \frac{1}{2} [SZ_j + SZ_{j-1}]$ ise bu iki AI arasındaki sosyal zarar miktarını ifade etmektedir. Her bir SS aralığı için SZ_{SS} değeri ise;

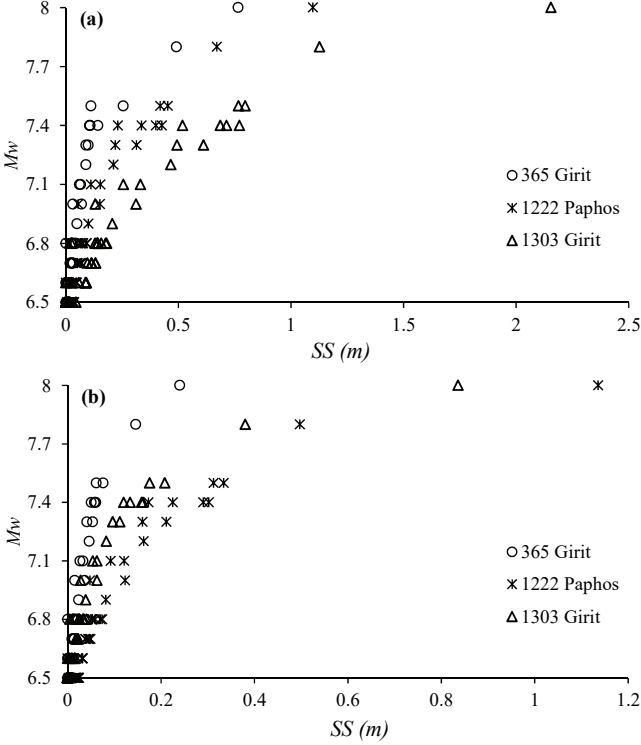
$$SZ_{SS} = \begin{cases} 0 & SS < 0.5 \text{ m} & ise \\ \sum ny A_{SS} IS_{SS} C_{zarar} & SS \geq 0.5 \text{ m} & ise \end{cases} \quad (10)$$

burada C_{zarar} zarar görebilirlik katsayısını, ny kritik bölgedeki nüfus yoğunluğunu, ve A_{SS} ise su basma seviyesinin altında kalan alanı ifade etmektedir. Kritik bölgede 0.50 m su basma seviyesinin altında kalan alanlardaki sosyal risk 0 olarak kabul edilmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada Türkiye'nin Doğu Akdeniz kıyılarında bulunan yerleşim yerleri, tarım alanları, limanları ve havaalanlarının tarihte Doğu Akdeniz'de görülmüş 365 Girit, 1222 Paphos ve 1303 Girit depremleri dikkate alınarak olası bir tsunamijenik depremde karşılaşılabileceği sosyal risk seviyeleri hesaplanmıştır. Monte Carlo yöntemi ile her bir tarihsel deprem için 1000'er adet rastgele deprem kaynağı oluşturulmuş ve tsunami simülasyonları yapılarak tsunami dalga yükseklikleri belirlenmiştir. **Deprem** simülasyonlarından elde edilen verilere göre 3 tarihsel deprem lokasyonunda oluşturulan rastgele depremlerden elde edilen SS değerleri önemli turistik bölgelerin ikisi olan Antalya Konyaaltı plajı ve Fethiye şehir

merkezi için Çizim 5'te verilmiştir. Literatürde tsunami oluşturabilecek deprem büyüklüğü, M_w minimum 6.5 verildiği için grafiklerde bu büyüklükten itibaren elde edilen SS değerleri gösterilmiştir [30]. Diğer seçilen kritik bölgelerdeki her bir deprem için maksimum su basma seviyeleri Çizelge 6'da verilmiştir.



Çizim 5 - (a) Fethiye Şehir merkezi ve (b) Konyaaltı plajı için simülasyonlardan elde edilen olasılıksal M_w -SS değerleri

Çizelge 6 - Seçilen kritik bölgelerdeki her bir deprem için maksimum SS değerleri

Kritik Bölge	İl	Depremin maksimum dalga yüksekliği (m)		
		365 Girit	1222 Paphos	1303 Girit
Akdeniz Tatil Köyleri	Antalya	0.25	1.04	0.44
Alanya Kıyı Şeridi	Antalya	0.15	1.66	1.13
Anamur Kıyı Şeridi	Mersin	0.20	1.70	0.63
Antalya Konyaaltı	Antalya	0.24	1.14	0.84
Arsuz Tatil Köyleri	Hatay	0.10	0.58	0.28
Belek Tatil Köyleri	Antalya	0.21	0.93	0.55

Çizelge 7 - Seçilen kritik bölgelerdeki her bir deprem için maksimum SS değerleri (devam)

Kritik Bölge	İl	Depremin maksimum dalga yüksekliği (m)		
		365 Girit	1222 Paphos	1303 Girit
Dalaman Şehir Merkezi	Muğla	0.33	0.68	1.88
Demre Şehir Merkezi	Antalya	0.15	0.63	0.86
Erdemli Şehir Merkezi	Mersin	0.23	1.12	0.41
Fethiye Şehir Merkezi	Muğla	0.77	1.10	2.15
Finike Şehir Merkezi	Antalya	0.34	0.65	1.12
İskenderun Şehir Merkezi	Hatay	0.11	0.64	0.28
Kazanlı Şehir Merkezi	Mersin	0.12	0.85	0.30
Kemer Şehir Merkezi	Antalya	0.24	0.99	0.68
Kızkalesi Tatil Köyleri	Mersin	0.15	1.18	0.44
Manavgat Kıyı Şeridi	Antalya	0.12	0.93	0.62
Mersin Şehir Merkezi	Mersin	0.12	0.85	0.30
Samandağ Şehir Merkezi	Hatay	0.19	0.82	0.34
Sarıseki Şehir Merkezi	Hatay	0.12	0.62	0.29
Susanoğlu Tatil Köyleri	Mersin	0.13	0.98	0.36
Taşucu Şehir Merkezi	Mersin	0.14	1.27	0.49
Türkler Tatil Köyleri	Antalya	0.19	1.49	0.78
Yemişkumu Tatil Köyleri	Mersin	0.14	1.30	0.45
Dalaman Havaalanı	Muğla	0.33	0.68	1.88
İskenderun Limanı	Hatay	0.11	0.64	0.28
Mersin Limanı	Mersin	0.12	0.85	0.30
MMK Metalurji Limanı	Hatay	0.10	0.74	0.32
Akdeniz Limanı	Antalya	0.24	1.05	0.74
Tırtar Yat Limanı	Mersin	0.15	1.31	0.44
Çukurova Tarım Alanı	Adana	0.10	0.94	0.33
Dalaman Tarım Alanı	Muğla	0.33	0.68	1.88
Samandag Tarım Alanı	Hatay	0.19	0.82	0.34

Olasılıksal hesaplamalardan elde edilen verilere göre bazı kritik bölgeler için tsunami dalga yükseklikleri 2 metrenin üzerine çıkmaktadır. Fakat neredeyse seçilen tüm kritik bölgeler için 1222 Paphos depremi verileri ve lokasyonu kullanılarak yapılan olasılıksal deprem riski analizi bu tarihsel depremler arasında en yüksek tsunami dalga boylarını vermektedir. Bunun nedeni olarak 1222 Paphos depreminin lokasyonunun Doğu Akdeniz'in neredeyse merkezinde yer alması gösterilebilir.

Türkiye'nin Doğu Akdeniz kıyıları boyunca seçilen kritik bölgelerin sosyal risk hesapları kritik bölgeler arasındaki sosyal risk farkının ortaya daha rahat konulabilmesi açısından bağıl risk şeklinde verilmiştir. Bağıl risk her bir risk altındaki bölgenin sosyal riskinin hesaplanan maksimum sosyal riske bölünmesi ile elde edilir (Eş.11). Bağıl risk seviyeleri 5 farklı seviyeye ayrılıp, her bir risk seviyesi Çizelge 7'de farklı bir renk ile gösterilmiştir. Her bir kritik bölge için 365 Girit, 1222 Paphos ve 1303 Girit depremleri referans alınarak hesaplanan bağıl sosyal risk seviyeleri Çizelge 8'de verilmiştir ve Çizelge 7'de sunulan sınıflandırmaya göre renklendirilmiştir.

$$N_Risk_{Sosyal} = \frac{Risk_{Sosyal}}{Risk_{Sosyal,maxs}} \quad (11)$$

Çizelge 8 - Risk seviyeleri

$0.75 \leq$	Çok Yüksek Risk	≤ 1
$0.50 \leq$	Yüksek Risk	< 0.75
$0.25 \leq$	Orta Seviyeli Risk	< 0.50
$0 <$	Düşük Risk	< 0.25
$0 =$	Risk Yok	

Çizelge 9 - 365 Girit, 1222 Paphos ve 1303 Girit depremleri referans alınarak hesaplanan bağıl sosyal risk seviyeleri

Kritik Bölge	İl	Bağıl Sosyal Risk Seviyeleri		
		365 Girit	1222 Paphos	1303 Girit
Akdeniz Tatil Köyleri		0.39	0.43	0.38
Alanya Kıyı Şeridi	Antalya	1.00	1.00	1.00
Anamur Kıyı Şeridi	Antalya	0.00	0.00	0.00
Antalya Konyaaltı	Mersin	0.05	0.05	0.05
Arsuz Tatil Köyleri	Antalya	0.00	0.00	0.00
Belek Tatil Köyleri	Hatay	0.60	0.59	0.58
Dalaman Şehir Merkezi	Antalya	0.00	0.00	0.00
Demre Şehir Merkezi	Muğla	0.00	0.00	0.00
Erdemli Şehir Merkezi	Antalya	0.01	0.01	0.01
Fethiye Şehir Merkezi	Mersin	0.18	0.18	0.23
Finike Şehir Merkezi	Muğla	0.02	0.02	0.02
İskenderun Şehir Merkezi	Antalya	0.01	0.03	0.03
Kazanlı Şehir Merkezi	Hatay	0.01	0.01	0.01

Çizelge 10 - 365 Girit, 1222 Paphos ve 1303 Girit depremleri referans alınarak hesaplanan bağıl sosyal risk seviyeleri (devam)

Kritik Bölge	İl	Bağıl Sosyal Risk Seviyeleri		
		365 Girit	1222 Paphos	1303 Girit
Kemer Şehir Merkezi	Mersin	0.10	0.10	0.10
Kızkalesi Tatil Köyleri	Antalya	0.00	0.00	0.00
Manavgat Kıyı Şeridi	Mersin	0.20	0.20	0.20
Mersin Şehir Merkezi	Antalya	0.00	0.00	0.00
Samandağ Şehir Merkezi	Mersin	0.00	0.00	0.00
Sarıseki Şehir Merkezi	Hatay	0.00	0.00	0.00
Susanoğlu Tatil Köyleri	Hatay	0.36	0.35	0.34
Taşucu Şehir Merkezi	Mersin	0.00	0.00	0.00
Türkler Tatil Köyleri	Mersin	0.08	0.09	0.08
Yemişkumu Tatil Köyleri	Antalya	0.00	0.00	0.00
Dalaman Havaalanı	Mersin	0.08	0.07	0.08
İskenderun Limanı	Muğla	0.00	0.00	0.00
Mersin Limanı	Hatay	0.00	0.00	0.00
MMK Metalurji Limanı	Mersin	0.00	0.00	0.00
Akdeniz Limanı	Hatay	0.17	0.18	0.17
Tırtar Yat Limanı	Antalya	0.00	0.00	0.00
Çukurova Tarım Alanı	Mersin	0.78	0.81	0.77
Dalaman Tarım Alanı	Adana	0.08	0.08	0.09
Samandag Tarım Alanı	Muğla	0.01	0.01	0.01

365 Girit, 1222 Paphos ve 1303 Girit depremleri referans alınarak hesaplanan bağıl sosyal risk hesaplamalarına göre Alanya Kıyı Şeridi ve Çukurova Tarım Alanı “Çok Yüksek Risk” seviyesinde çıkmıştır. Sosyal riskin bu bölgelerdeki yüksek değeri, yüksek nüfus yoğunluğunun bir fonksiyonu olarak açıklanabilir. Ayrıca Belek bölgesindeki tatil köylerinin bağıl sosyal riski “Yüksek Risk”, Akdeniz ve Susanoğlu bölgelerinde bulunan tatil köylerinin sosyal riski de “Orta Seviyeli Risk” çıkmıştır. Her ne kadar farklı depremler için farklı tsunami dalga yükseklikleri elde edilmiş olsa da, düşük seviyelerde oluşan tsunami dalga yüksekliklerinin sayıca fazla olması, bağıl sosyal risk hesaplarında benzer risk seviyelerinin elde edilmesine neden olmuştur. Diğer bölgelerin düşük nüfus yoğunluğu ve 0.50 m’yi aşmayan tsunami dalgalarından dolayı etkilenen insan sayısının azlığından bağıl sosyal risk seviyeleri “Düşük” ve “Risk Yok” şeklinde belirlenmiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Türkiye'nin Doğu Akdeniz sahil şeridinde yerleşim yerleri, tarım alanları, limanlar ve havaalanlarından oluşan 32 kritik bölge için olası bir tsunami tehlikesi durumunda sosyal risk seviyelerinin ne olabileceği hesaplanmıştır. Bağımsız deprem parameteleri için Monte Carlo yöntemi kullanılarak rastgele deprem kaynağı verisi oluşturulmuş, bağımlı parametreler için de Akdeniz'de bulunan Helenik ve Kıbrıs fay hatları üzerinde tarihte yaşanmış 365 Girit, 1222 Paphos ve 1303 Girit depremlerinin bağımlı parametreleri (doğrultu, eğim ve dalma açıları, enlem ve boylam) dikkate alınarak analizler yapılmıştır.

Elde edilen bulgular, her 3 deprem için de seçilen kritik bölgelerin 18'inde çeşitli seviyelerde sosyal riskin bulunduğunu, 14'ünde ise herhangi bir sosyal riskin bulunmadığını ortaya koymaktadır. Fakat burada asıl dikkat edilmesi gereken nokta seçilen kritik bölgelerin sosyal risk seviyelerinin her 3 deprem için de benzerlik göstermesidir. Her ne kadar tsunami dalga yükseklikleri seçilen bölgelerde farklılık gösterse de bu bölgelerin birbirinden farklı olan nüfus yoğunlukları, topoğrafyası ve etkilenen alanın büyüklüğü benzer risk seviyelerinin elde edilmesine sebep olarak gösterilebilir.

Seçilen bölgelerin bir kısmı turistik alanlar olmasına rağmen, aylık nüfus yoğunluğu verisini elde etmek mümkün değildir. Bunun yanı sıra, simüle edilen depremlerin oluşma zamanları için bir tahmin yapılmamıştır. Dolayısıyla bu çalışmada ortaya konulan sosyal risk analizleri, ilgili bölgelerin, mevsimsel farklılıklar ihmal edilerek elde edilen nüfus yoğunluğu verileri ve herhangi bir zamanda oluşabilecek depremler dikkate alınarak hesaplanmıştır. Turistik bir sezonda yaşanabilecek bir tsunami tehlikesinin seçilen bölgelerde bu çalışmada verilen sosyal risk seviyelerinden çok daha büyük bir risk oluşturması kaçınılmazdır. Ortaya konulan verilen ve her bir bölgede görülebilecek olası tsunami dalga yükseklikleri yerel otoritelerin gerekli tedbirleri almasında faydalı olabilecek niteliktedir. Bu çalışmanın amacı kriz yönetiminden ziyade risk yönetimi konusunda bilimsel çevrelere ışık tutabilmektir.

Teşekkür

Yazarlar değerli katkılarından ve önerilerinden dolayı Prof. Dr. Mustafa M. Aral' a teşekkür ederler.

Kaynaklar

- [1] Ring of Fire. <https://www.google.com/earth/> Erişim tarihi: Ağustos 20, 2020.
- [2] Twiss. R. J., Moores. E. M., Structural Geology, WH Freeman and Company, New York, A.B.D., 2007.
- [3] Google Earth Pro v7.3.3.7786 (2020) <http://www.earth.google.com> Erişim tarihi Ekim 20, 2020
- [4] International Tsunami Information Center. How do earthquakes generate tsunamis? http://www.ioc-tsunami.org/index.php?option=com_oe&task=viewDocumentRecord&docID=26561 Yayın tarihi Haziran 30, 2019. Erişim tarihi Ağustos 20, 2020.

- [5] Altinok, Y., Ersoy, Ş., Tsunamis Observed on and Near the Turkish Coast. In: Papadopoulos G.A., Murty T., Venkatesh S., Blong R. (eds) *Natural Hazards*, Springer, Dordrecht, 2000. https://doi.org/10.1007/978-94-017-2386-2_5
- [6] Papadopoulos, G. A., Daskalaki, E., Fokaefs A., Giraleas N., Tsunami hazard in the Eastern Mediterranean Sea: strong earthquakes and tsunamis in the west Hellenic arc and trench system. *Journal of Earthquake and Tsunami*, 4 (03), 145-179, 2010.
- [7] Yalciner, A. C., Pelinovsky, E., Zaytsev, A., Kurkin, A., Ozer, C., Karakus, H., *Nami Dance Manual*. Middle East Technical University, Civil Engineering Department, Ocean Engineering Research Center, Ankara, 2006.
- [8] Earthquake Glossary. <https://earthquake.usgs.gov/learn/glossary/> Erişim tarihi: Ağustos 20, 2020.
- [9] Altinok, Y., Tinti, S., Alpar, B., Yalciner, A. C., Ersoy, Ş., Bortolucci, E., Armigliato, A., The tsunami of August 17, 1999 in Izmit bay, Turkey. *Natural Hazards*, 24(2), 133-146, 2001.
- [10] Yolsal, S., Taymaz, T., Yalciner, A. C., Understanding tsunamis, potential source regions and tsunami-prone mechanisms in the Eastern Mediterranean. *Geological Society, London, Special Publications*, 291(1), 201-230, 2007.
- [11] Yolsal-Çevikbilen, S., Taymaz, T., Earthquake source parameters along the Hellenic subduction zone and numerical simulations of historical tsunamis in the Eastern Mediterranean. *Tectonophysics*, 536, 61-100, 2012.
- [12] TUIK., Yıllara Göre İllerin Yıllık Nüfus Artış Hızı ve Nüfus Yoğunluğu, http://tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1059 Erişim tarihi Eylül 10, 2020.
- [13] Yavuz, C., Kentel, E., Aral, M. M., *Tsunami Risk Assessment: Economic, Environmental and Social Dimensions*. *Natural Hazards*, 2020. DOI: 10.1007/s11069-020-04226-y
- [14] Hanks, T. C., Kanamori, H., A moment-magnitude scale. *J. Geophys. Res.* 84, 2348-2350, 1979.
- [15] Wells, D. L., Coppersmith, K. J., New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the seismological Society of America*, 84(4), 974-1002, 1994.
- [16] Papazachos, B. C., Scordilis, E. M., Panagiotopoulos, D. G., Papazachos, C. B., Karakaisis G. F., Global Relations Between Seismic Fault Parameters and Moment Magnitude of Earthquakes. *Bulletin of the Geological Society of Greece*, 36, 2004.
- [17] Blaser, L., Krüger, F., Ohrnberger, M., Scherbaum, F., Scaling relations of earthquake source parameter estimates with special focus on subduction environment. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 100(6), 2914-2926, 2010.
- [18] Goda, K., Yasuda, T., Mori, N., Maruyama, T., New scaling relationships of earthquake source parameters for stochastic tsunami simulation. *Coastal Engineering Journal*, 58(03), 1650010, 2016.

- [19] Løvholt, F., Glimsdal, S., Harbitz, C. B., Zamora, N., Nadim, F., Peduzzi, P., Smebye, H., Tsunami hazard and exposure on the global scale. *Earth-Science Reviews*, 110(1-4), 58-73, 2012.
- [20] Løvholt, F., Glimsdal, S., Harbitz, C. B., Horspool, N., Smebye, H., De Bono, A., Nadim, F., Global tsunami hazard and exposure due to large co-seismic slip. *International journal of disaster risk reduction*, 10, 406-418, 2014.
- [21] Synolakis, C. E., Green's law and the evolution of solitary waves. *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 3(3), 490-491, 1991.
- [22] ISO 31010, 2009 Risk Management–Risk Assessment Techniques. CENELEC, Brussels, 2010.
- [23] Abt, S.R., Wittler, R. J., Taylor, A., Predicting human instability in flood flows. In *Hydraulic Engineering*, 70-76, 1989.
- [24] Endoh, K., Takahashi, S., Numerically modeling personnel danger on a promenade breakwater due to overtopping waves. *Coastal Engineering*, 1016-1029, 1994.
- [25] Jonkman, S. N., Penning-Rowsell, E., Human instability in flood flows. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 44(5), 1208-1218, 2008.
- [26] Tastan, B., Aydinoglu, A.C., Çoklu afet risk yönetiminde tehlike ve zarar görülebilirlik belirlenmesi için gereksinim analizi. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 31, 366-397, 2015.
- [27] Cobanyılmaz, P., Yuksel, Ü.D., Kentlerin İklim Değişikliğinden Zarar Görebilirliğinin Belirlenmesi: Ankara Örneği. *Journal of Natural & Applied Sciences*, 17(3), 2013.
- [28] Ozceylan, D., Coskun, E. Türkiye'deki illerin sosyo-ekonomik gelişmişlik düzeyleri ve afetlerden sosyal ve ekonomik zarar görülebilirlikleri arasındaki ilişki. *Istanbul University Journal of the School of Business Administration*, 41(1), 2012.
- [29] Gelir, Eğitim, Sağlık ve Altyapı Değerleri, Web: <https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Gelir,-Yasam,-Tuketim-ve-Yoksulluk-107>
- [30] USGS, What is it about an earthquake that causes a tsunami? https://www.usgs.gov/faqs/what-it-about-earthquake-causes-a-tsunami?qt-news_science_products=0#qt-news_science_products Erişim tarihi Eylül 10, 2020.

Gömülü Betonarme Boruların Analitik ve Sayısal Yöntemler ile Tasarımı

Onur DEMİRCİ¹
Havvanur KILIÇ²
Gökhan YAZICI³

ÖZ

Gömülü betonarme borular, kentsel altyapının kritik bileşenleridir. Tasarımlarında, boru özellikleri, boruyu çevreleyen dolgu zemin, yataklama koşulları ve etki eden dış yükler dikkate alınarak ampirik veya sayısal yöntemler kullanılır. Bu çalışmada, uygulamada yaygın olarak kabul gören ampirik ve sayısal analiz yöntemleri dikkate alınarak yapılan tasarım hesaplarındaki farklılıklar geri dolgu malzeme türü, dolgu yüksekliği ve boru çapı değişimi dikkate alınarak parametrik analizler ile incelenmiştir. Çalışma sonuçları, sayısal analizlerde zemin-boru etkileşiminin gerçekçi olarak dikkate alınması nedeniyle hesaplanan gerekli donatı alanlarının geleneksel tasarım yöntemlerinden elde edilen değerlere göre daha düşük olduğunu göstermektedir.

Anahtar Sözcükler: Gömülü betonarme boru tasarımı, dolaylı tasarım, doğrudan tasarım, zemin-yapı etkileşimi, sayısal analiz.

ABSTRACT

Design of Buried Reinforced Concrete Pipes with Analytical and Numerical Methods

Buried reinforced concrete pipes are critical components of urban infrastructure. Their design can be conducted using empirical or numerical methods, which consider the properties of the pipes, backfill surrounding the pipe, bedding conditions and loads acting on the pipes. In this paper, a parametric study taking into account different backfill materials, burial depths, and pipe diameters was utilized to investigate the differences in design calculations obtained from widely accepted empirical and numerical analysis methods. Results indicate that required

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 28 Kasım 2020 günü ulaşmıştır. 6 Ekim 2021 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Ocak 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.832727>

1 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
onurdemirci1094@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-3385-3056>

2 Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
kilig@yildiz.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-9455-1687>

3 İstanbul Kültür Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
gokhanyazici@iku.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-6719-9152>

reinforcement areas calculated using numerical analyses are smaller than those obtained from traditional design methods due to realistic consideration of soil-pipe interaction.

Keywords: Buried concrete pipe design, indirect method, direct method, soil-structure interaction, numerical analysis.

1. GİRİŞ

Kent yaşamının sürdürülebilmesinde önemli rolü olan gömülü boru hatları, tasarım ve inşaat aşamalarında mühendislik hizmeti almalıdır. Tasarımda boru cinsi, gömülme tipi, yerel zemin koşulları, geri dolgu malzemesi türü ve boru üzerine etkiyecek statik ve dinamik etkiler dikkate alınarak zemin-yapı etkileşimi problemi olarak incelenmelidir. Uygulamada, rijit betondan esnek plastik malzemelere kadar çok çeşitli boru cinsleri mevcuttur. Boru üretiminde genellikle rijit ve esnek boru olmak üzere 2 tip sınıflama yapılmıştır. Esnek boru, yenilme ve göçme belirtileri göstermeden %2'den fazla şekil değiştirebilen borular, bu özelliklere sahip olmayan borular ise rijit boru olarak tanımlanmaktadır [1]. Rijit borular, üzerine aktarılan gerilmeleri kendi rijitliği ile karşılamakta, çevresindeki geri dolgu zeminden de beton boru üzerine yük aktarılmaktadır. Rijit borular donatılı, donatısız beton borular ve sırlı kil boruları içermektedir. Çekme donatısı ile birlikte rijit borular basınç borusu olarak iyi hizmet sunabilmektedir [2].

Dairesel kesitli betonarme boru (RCP) bir asır boyunca kullanılmakta ve birçok durumda güvenilir, uzun vadede dayanımlı su iletme yapısı olarak bilinmektedir. Boru en kesitinde düşey ekseninde merkezden geçen çizgiye merkez çizgisi, yatay ekseninde merkezden geçen çizgiye yatay simetri çizgisi denir. Borunun üst noktası taç, alt noktası taban ve yatay simetri çizgisinin kestiği noktalar ise yan duvar olarak adlandırılmaktadır. Boru duvarı et kalınlığı ise boru dış çapı ile iç çapı arasındaki farktır [3]. Gömülü boruya iletilen toprak yükü büyük oranda gömülme durumuna bağlıdır.

Bu çalışmada, gömülü betonarme boru tasarımında kullanılan yöntemler incelenerek boru çapı, dolgu yüksekliği, geri dolgu özelliği ve yatak malzemesi vb. değişimlerin boru tasarımına etkileri değerlendirilmiştir. Bu kapsamda tipik bir hendek durumunda gömülü betonarme boru problemi önce konvansiyonel yöntemler olarak adlandırılan dolaylı ve doğrudan tasarım yöntemleri ile daha sonra da zemin-yapı etkileşim problemlerinin çözümünde yaygın olarak kullanılan sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak sayısal analizler ile incelenmiş ve elde edilen hesap sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Dolaylı ve doğrudan tasarım yöntemlerinin sayısal analizlere göre gerekli donatı alanlarında daha konservatif sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Dolaylı tasarım yönteminde boru gömülme derinliği ile geri dolgu malzemesinin birim hacim ağırlığı arttığında 0.01 inç (0.254mm)'lik çatlama kriterine denk gelen tasarım yüklerinin arttığı ve daha yüksek bir boru sınıfı ve donatı alanı gerektiği tespit edilmiştir. Özellikle, 1m'den daha küçük iç çaplı boru kullanıldığında, 12m gibi yüksek dolgular altında elde edilen çatlama kriterine denk gelen tasarım D-Yükleri ASTM C76 Şartnamesinde belirtilen doruk D-Yüklerini (175 kN/m/m) aştığı belirlenmiştir. Böylelikle, 12m gibi yüksek dolgu yüklerine maruz kalacak uygulamalarda, boru iç çapı 1m'den küçük borular için dolaylı tasarım yönteminin kullanılması önerilmemektedir. Doğrudan tasarım yönteminin ise Heger basınç dağılımlarında kullanılmakta olan ve kurulum tiplerine göre kısmen değişen düşey kemerlenme faktörlerinin (VAF) borunun gömülme yüksekliği artırıldığında zemin kemerlenme etkisini yansıtmadığı için konservatif

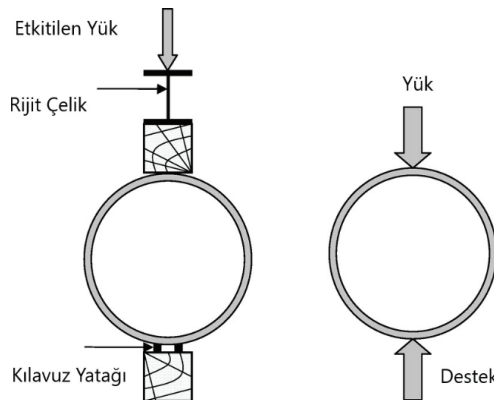
sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Doğrudan tasarım yöntemi, boru tasarımında kullandığı standart kurulum tipleri, boyutsuz katsayılar ve limit durum yaklaşımıyla boru-zemin etkileşimini dikkate alırken, ampirik dolaylı tasarım yöntemine göre önemli ölçüde gelişmeler sunmuş fakat sofistike sonlu elemanlar yöntemi çözümü kadar gerçekçi olmadığını düşünölmektedir.

2. BETONARME BORU TASARIM YÖNTEMLERİ

Günümüzde gömölü betonarme boruların tasarımında, dolaylı tasarım ve doğrudan tasarım yöntemi olmak üzere iki ana tasarım yöntemi mevcuttur. Tarihsel sürece bakıldığında, 1900'lü yıllardan itibaren boruların tasarımı için arazide gerçek boyutlu deneysel çalışmalar, laboratuvarında model deneyler ve iki boyutlu ve üç boyutlu sayısal analizler yapılmış ve halen günümüzde de çalışmalar sürdürölmektedir. Marston (1930)'da zemin mekaniği temel ilkelerini dikkate alarak gömölü borular üzerine etkiyen zemin yüklerinin hesaplanması için bir yöntem geliştirmiştir [4]. Bu yaklaşımda, boru üzerine etkiyen düşey yüklerin, borunun üstündeki zemin prizması ve ilave hareketli yükten oluştuğu kabul edilmiş ve hendek yan duvarları ve geri dolgu malzemesi arasındaki sürtünme nedeniyle düşey basıncın bir miktar azaldığı dikkate alınmıştır. Spangler (1933) ise çalışmalarında standart laboratuvar deneyi olarak rijit borunun dayanımını ölçen üç-kenarlı deneyi (TEB) kullanmıştır. Spangler'in araştırmasının amacı, bu üç-kenarlı deney (TEB) ile elde edilen boru dayanımını arazi koşullarındaki boru dayanımına oranlamaktır. Spangler (1933)'de, bu oranı bir yük faktörü gibi dikkate alınmış ve sonraki çalışmalarda bu yük faktörü geliştirilerek yataklama katsayısı olarak kullanılmıştır [5].

2.1. Dolaylı Tasarım Yöntemi

Marston ve Spangler'in çalışmaları, hala günümüzde kullanılmakta olan dolaylı tasarım yönteminin temellerini oluşturmuştur. Dolaylı tasarım yöntemi, boruya etkiyen toplam zemin ve yüzey yüklerinin ampirik yöntemler ile hesaplanmasına dayanmaktadır. Bu yöntem, üç-kenarlı deneyde oluşan 0.01 inç (0.254mm)'lik çatlama kriteri ile beton boru dayanımının elde edilmesi esasına dayanmaktadır. Bu deneyin şematik gösterimi Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1 - Üç Kenarlı Deney (TEB) ve boru yükleme durumu [6]

Yönteme göre, hendekte boru taç bölgesi üzerine etkiyen gerilmeler boru tarafından taşınmaktadır. Borunun mukavemeti, eşdeğer üç-kenarlı deney yükü olarak da bilinen toplam yükün yataklama katsayısına oranı ile elde edilen yük ile belirlenir. Zemin yükü, eşdeğer üç-kenarlı deney (TEB) yüküne bir yataklama faktörü B_f ve güvenlik katsayısı F.S ile dönüştürülmektedir.

Üç-kenarlı deney yükü betonarme boru tasarımı için temsili bir değerdir ve deneyde borunun göstereceği performans kalite kontrol kriteri olarak değerlendirilir. Bu yöntemde, tasarım yükü (D-Yükü) Denklem 1 ile hesaplanır. Bu eşitlikte, W toplam yük, B_f yataklama katsayısı, F.S güvenlik katsayısı (1.25 ve 1.5 arasında alınabilir) ve D_i boru iç çapıdır.

$$D_{yükü} = \frac{W}{B_f} \frac{F.S}{D_i} \quad (1)$$

Yataklama katsayısı, gömülü borunun destekleyici mukavemetinin üç-kenarlı deneyden hesaplanan boru mukavemetine oranıdır. Dolaylı tasarım yönteminde Marston (1930)'un geliştirdiği 4 adet geleneksel kurulum sınıfları kullanılır. Bu kurulum sınıfları, yataklama kalitesine göre en elverişsiz durum olan D sınıfından en kaliteli yataklama sınıfı A'ya doğru sıralanmaktadır. Dolaylı tasarım yönteminde Denklem 1'de görüldüğü üzere gerekli destekleyici dayanım yükü; yataklama faktörü, toplam yük ve güvenlik sayısının bir fonksiyonudur. Elde edilen bu yük üç-kenarlı deney (TEB) yüküdür. Bu yük, D-yükü olarak da bilinen tasarım mukavemeti yükü, boru iç çapına (D_i) bölünerek dönüştürülmektedir. D-yüküne göre ASTM C76 Şartnamesinden ilgili boru sınıfları, beton dayanımları, boru duvar kalınlıkları ve donatılardırma gereksinimleri seçilmektedir. Yaygın sınıflamalar arasında 50D, 65D, 100D ve 140D yer almaktadır. Elde edilen boru sınıflarına ve D-Yüküne göre boru et kalınlıkları, boru çapları, gerekli donatı alanları gibi tasarım parametreleri elde edilir. Boru sınıflarına karşılık gelen 0.01 inç (0.254mm) çatlama D-Yükleri ve doruk çatlama D-Yükleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1 - Boru Sınıflarına Göre D-Yükleri [7]

Boru Sınıfları	0.01 İnç Çatlama D-Yükleri (kN/m/m)	Doruk Çatlama D-Yükleri (kN/m/m)
I	40	60
II	50	75
III	65	100
IV	100	150
V	140	175

2.2. Doğrudan Tasarım Yöntemi

Amerikan Beton Boru Derneği (ACPA) 1970'li yıllarda, Marston ve Spangler'in geliştirdiği kurulum tiplerine yeni bir bakış kazandırma ve modernleştirme amacı ile zemin-boru etkileşimini de işin içine katarak yeni bir tasarım yöntemi çalışması yürütmüştür. Bu çalışmalar kapsamında, gömülü boru ile onu çevreleyen zeminin etkileşimi incelenmiş ve

Heger (1988), bu araştırmalar sonucunda SPIDA (Zemin-Boru Etkileşimi Tasarımı ve Analizi) adlı sonlu elemanlar yazılımını geliştirmiştir. Paris (1921) ve Olander (1950) tarafından geliştirilen basınç dağılımları geçmişte kullanılmış olup, bugün geniş kitlelerce daha yaygın olarak Heger (1988) basınç dağılımı kullanılmaktadır. ACPA önderliğinde geliştirilen SPIDA yazılımı, Heger basınç dağılımının ortaya çıkması ve toprak yüklerinin hesabında önemli rol oynayarak Doğrudan tasarım yönteminin başlangıcı olarak belirtilmiştir [8]. ACPA'nın araştırma programı sayesinde, Marston ve Spangler'in geleneksel A, B, C ve D kurulum tipleri, yerini Heger'in geliştirdiği SPIDA yazılımı ile 4 adet yeni ve modern Tip 1, Tip 2, Tip 3 ve Tip 4 kurulum tiplerine bırakmıştır. Bu kurulum tipleri ve Heger basınç dağılımları, Amerikan İnşaat Mühendisleri Derneği (ASCE) tarafından incelenmiş ve "Gömülü Öndökümlü Beton Boruların Doğrudan Tasarımı İçin Standart Kurulumlar (SIDD)" olarak ASCE 15-98 Şartnamesi halinde birleştirilmiştir. Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi (USCS) ve Amerikan Karayolları Birliği (AASHTO)'nin doğrudan tasarım için uygun gördüğü zemin tipleri ve sınıfları Tablo 2'de gösterilmiştir. Bu sınıflandırmalara göre I ve II numaralı kategoriler iri daneli zeminleri, III numaralı kategori ise ince daneli zeminleri ifade etmektedir. IV numaralı kategori CH (yüksek plastisiteli kil) zemin kullanıldığında, boru kurulumunda yatak malzemesi kullanılmaması gerektiği belirtilmiştir.

Tablo 2 - SIDD (Doğrudan Tasarım) Zemin Belirlemesi için Eşdeğer USCS ve AASHTO Zemin Sınıflandırmaları [10]

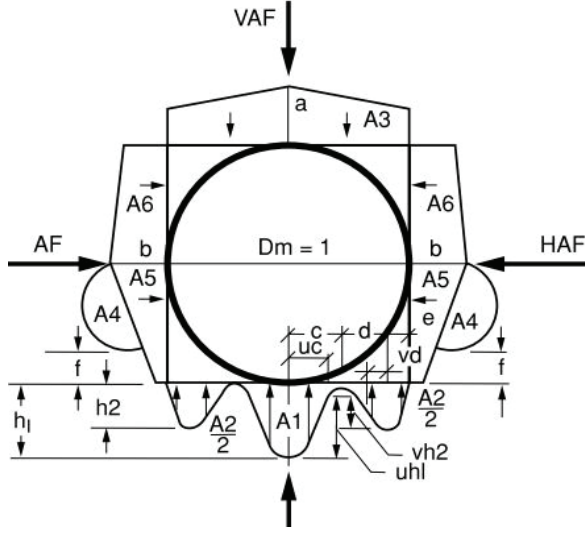
SIDD Zemini	USCS Zemin Sınıflandırma Sistemi	AASHTO Zemin Sınıflandırma Sistemi	Sıkıştırma Derecesi (%)	Modifiye Sıkıştırma Derecesi (%)
Çakıllı Kum (Tip I)	SW, SP, GW, GP.	A1, A3	100, 95, 90, 85, 80, 61	95, 90, 85, 80, 75, 59
Kumlu Silt (Tip II)	GM, SM, ML ve #200 No'lu elekten geçenler %20'den az olmak koşuluyla GC, SC.	A2, A4	100, 95, 90, 85, 80, 49	95, 90, 85, 80, 75, 46
Siltli Kil (Tip III)	CL, MH, GC, SC.	A5, A6	100, 95, 90, 85, 80, 45	90, 85, 80, 75, 70, 40
Yüksek Plastisiteli Kil (Tip IV)	CH	A7	100, 95, 90, 45	90, 85, 80, 40

Doğrudan tasarım yönteminde, standart kurulum tipini belirlemek için boru kurulum inşaat kalitesi çok önemlidir. Tip 1 en yüksek boru kurulum kalitesini gerektirmekte, Tip 2 ve Tip 3'e doğru boru kurulum kalitesi giderek azalmaktadır. Tip 4 ise neredeyse hiçbir kurulum kalite koşulu gerektirmezken buna karşılık olarak yüksek boru mukavemeti gerektirmektedir. Tablo 3'te doğrudan tasarım için standart kurulum tipleri ve en düşük kompaksiyon

gereksinimleri belirtilmiştir. Burada D_0 boru dış çapını ifade etmektedir. Doğrudan tasarım yönteminde yukarıda bahsedildiği üzere Tablo 2’de verilmiş zemin kategorileri ve Tablo 3’te verilmiş olan standart kurulum tipleri için Heger toprak basıncı dağılımları kullanılmaktadır. Heger toprak basıncı dağılımları, her standart kurulum tipi için belirli bir terminolojide zemin içerisine gömülmüş boruya etkiyen yüklerin ve gerilme dağılımlarının hesaplanmasında kullanılmaktadır (Şekil 2). Burada A1-A6 katsayıları toprak basıncının boyutsuz düşey ve yatay bileşenleri, a-v ise boyutsuz düşey ve yatay ölçüleri tanımlamak için kullanılan katsayılar olup, kurulum tipine göre hesaplanan düşey kemerlenme faktörü (VAF) ve yatay kemerlenme faktörü (HAF) doğrudan tasarım yönteminde toprak yüklerinin ve gerilmelerinin hesaplanmasında kullanılmaktadır [9]. Diğer katsayılar d, h1 ve h2 aşağıda belirtildiği gibi Denklem 2, 3 ve 4 ile hesaplanabilir. Doğrudan tasarım yöntemindeki Standart 4 adet kurulum tiplerine göre Heger zemin basıncı ve kemerlenme faktörü katsayıları Tablo 4’te verilmiştir.

Tablo 3 - SIDD (Doğrudan Tasarım) için Standart Kurulum Tipleri ve En Düşük Kompaksiyon Gereksinimleri [10]

Kurulum Tipi	Yatak Kalınlığı	Boru Alt Yan Kısımındaki Malzeme	Hendek Duvarı Alt Kısımındaki Malzeme
Tip 1	75 mm’den küçük olmamak kaydıyla $D_0/24$. Tabanda kaya bulunuyorsa 150 mm’den küçük olmamak kaydıyla $D_0/12$.	%95 Kategori I	%90 Kategori I %95 Kategori II %100 Kategori III
Tip 2	75 mm’den küçük olmamak kaydıyla $D_0/24$. Tabanda kaya bulunuyorsa 150 mm’den küçük olmamak kaydıyla $D_0/12$.	%90 Kategori I veya %95 Kategori II	%85 Kategori I %90 Kategori II %95 Kategori III
Tip 3	75 mm’den küçük olmamak kaydıyla $D_0/24$. Tabanda kaya bulunuyorsa 150 mm’den küçük olmamak kaydıyla $D_0/12$.	%85 Kategori I %90 Kategori II %95 Kategori III	%85 Kategori I %90 Kategori II %95 Kategori III
Tip 4	Yatak gerekmez (taban bölgesinde kaya yoksa). Eğer taban bölgesinde kaya bulunuyorsa 150 mm’den küçük olmamak kaydıyla $D_0/12$.	Kompaksiyon gerekmez. (Kategori III kullanılması dışında) %85 Kategori III	Kompaksiyon gerekmez. (Kategori III kullanılması dışında) %85 Kategori III



Şekil 2 - Heger Zemin Basıncı Dağılımları [10]

Tablo 4 - Standart Kurulum Tiplerine Göre Heger Zemin Basıncı ve Kemerlenme Faktörü Katsayıları [10]

Katsayılar	Kurulum Tipleri			
	Tip 1	Tip 2	Tip 3	Tip 4
VAF	1.35	1.40	1.40	1.45
HAF	0.45	0.40	0.37	0.30
A1	0.62	0.85	1.05	1.45
A2	0.73	0.55	0.35	0.00
A3	1.35	1.40	1.40	1.45
A4	0.19	0.15	0.10	0.00
A5	0.08	0.08	0.10	0.11
A6	0.18	0.17	0.17	0.19
a	1.40	1.45	1.45	1.45
b	0.40	0.40	0.36	0.30
c	0.18	0.19	0.20	0.25
e	0.08	0.10	0.12	0.00
f	0.05	0.05	0.05	-
u	0.80	0.82	0.85	0.90
v	0.80	0.70	0.60	-

$$d = 0.5 - c - e \quad (2)$$

$$h1 = \frac{(1.5A1)}{c(1+u)} \quad (3)$$

$$h2 = \frac{(1.5A2)}{[d(1+u)+2e]} \quad (4)$$

Boru üzerine etkileyen toplam düşey ve yatay yükler, SPIDA yazılımıyla zemin-yapı etkileşimi dikkate alınarak elde edilen kemerlenme katsayılarının boru üzerindeki prizma yükü (PL) ile çarpılmasıyla bulunur. Prizma yükü, Denklem 5'teki gibi hesaplanmaktadır.

$$PL = \frac{wD_0}{100} \left(H + \frac{0.107D_0}{1000} \right) \quad (5)$$

Burada; PL Prizma yükü, w zemin birim hacim ağırlığı (kN/m³), D₀ borunun dış çapı (m), H ise borunun üst kısmındaki dolgu yüksekliği (m)'dir. Boru üzerindeki toplam düşey zemin yükü, prizma yükü ile düşey kemerlenme faktörü (VAF)'nin çarpımıyla elde edilir. Toplam düşey zemin yükü, Denklem 6 ile hesaplanmaktadır.

$$W = PL \times HAF \quad (6)$$

Toplam düşey zemin yükü bulunduktan sonra ASCE 15-98'de belirtilen her standart kurulum tiplerine göre (I-IV) belirlenmiş olan boru taban bölgesi, yatay simetri çizgisi bölgesi, taban ve taç bölgeleri içerisindeki kritik kesme bölgeleri ve taç bölgeleri için moment, eksenel kuvvet ve kesme kuvvetleri hesabı doğrultusunda belirlenmiş boyutsuz katsayılar ile Denklem 7, 8 ve 9 ile tesir kuvvetleri hesaplanıp donatılar belirlenmektedir (ASCE 15-98 Tablo C-3.1, 3.2, 3.3, 3.4).

$$M_i = \Sigma \frac{C_{m_i} W_i D_m}{2} \quad (7)$$

$$N_i = \Sigma c_{n_i} W_i \quad (8)$$

$$V_i = \Sigma C_{v_i} W_i \quad (9)$$

Burada; C_{mi} Moment hesabı için boru analiz katsayısını, C_{ni} Eksenel kuvvet hesabı için boru analiz katsayısını, C_{vi} Kesme kuvveti hesabı için boru analiz katsayısını, W_i Boru üzerine gelecek yüklerin toplamını, D_m ise boru ortalama çapını temsil etmektedir. Doğrudan tasarım yönteminde, gömülü beton boruların donatı hesabında ASCE 15-98 Şartnamesi'nde belirtilen Denklem 10 kullanılmaktadır. Bu denklemde; A_s birim uzunluk için gerekli eğilme donatısı alanı, g = 0.85b²f_c, b hesapta kullanılan genişliği (m), h boru duvar kalınlığını ve d ise pas payını göstermektedir. Beton malzemesinin dayanımı ve donatı akma dayanımı f_c ve f_y ile ifade edilmektedir. Eğilme donatısı için direnç faktörü Φ = 0.9 alınmakta ve M_u, N_u sırası ile b genişliğine etkileyen tasarım momenti ve tasarım eksenel kuvvetini ifade etmektedir.

$$A_s = \frac{g\Phi f_d - N_u - \sqrt{g[g(\Phi f_d)^2 - N_u(2\Phi f_d - h) - 2M_u]}}{f_y} \quad (10)$$

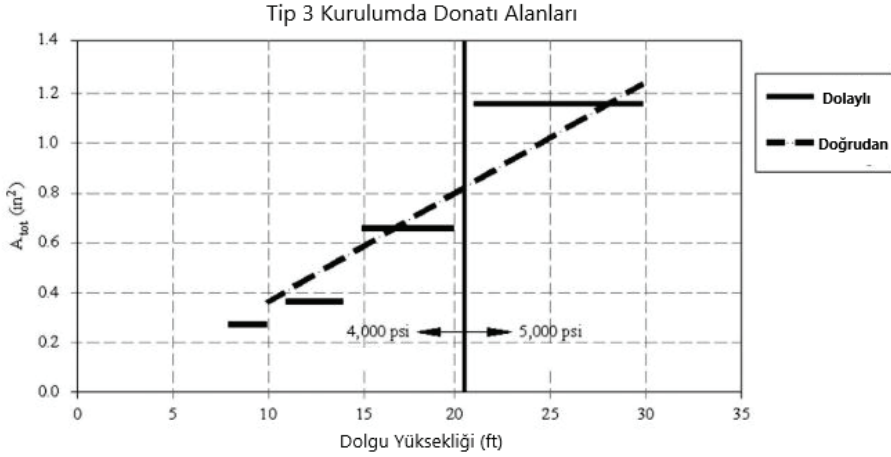
Doğrudan tasarım yöntemi kapsamında, zemin parametrelerine ve standart kurulum tiplerine bağlı olarak Heger basınç dağılımları kullanılarak gömülü boruya etkiyen zemin yükleri ve basınç dağılımları belirlenerek, kesit tesirleri ve gerekli boru donatısı hesaplanmaktadır.

Bu araştırma makalesinin amacı, konvansiyonel yöntemlerin (dolaylı ve doğrudan tasarım) gömülü betonarme boru tasarımında kullanımının yeterliliğini sonlu elemanlar analizleri ile karşılaştırarak sorgulamaktır. Böylece konvansiyonel yöntemlerin sayısal yöntemlerle karşılaştırılması sonucu, tasarımda ne ölçüde konservatif davrandığı ve boru-zemin etkileşimini irdelemekte ne kadar başarı sağladığı incelenmiştir. Kurdziel ve McGrath (1991), yaptıkları çalışmada dolaylı ve doğrudan tasarım arasındaki farklılıkları gömülü betonarme boru tasarımında yapısal performans ve maliyet açısından değerlendirmişlerdir. Çalışmada, toplam donatı ihtiyacında dolaylı tasarım yönteminin doğrudan tasarım yöntemine göre konservatif davrandığı belirtilmiştir [11].

Zhao ve Daigle (2001), yaptıkları çalışmada SIDD (Doğrudan tasarım) boru kurulumunu ve Ontario eyaletine ait standartları (OPSS) teknik gelişim, inşaat özellikleri ve maliyetleri açısından karşılaştırmış ve birbirlerine alternatif olarak düşünülebileceklerini ortaya koymuştur. Rijit (betonarme) borularda OPSS, geleneksel dolaylı tasarım (Marston-Spangler) yöntemi baz alınarak ortaya çıkmıştır. Güvenlik katsayıları kıyaslanacak olursa, SIDD yönteminde limit durum tasarımı yaklaşımı dikkate alınırken OPSS yönteminde tekil güvenlik katsayısı yaklaşımı kullanılmıştır. Bu bağlamda, SIDD yöntemi daha tutarlı bir güvenlik yaklaşımı sunmaktadır. Çalışma sonuçlarına bakıldığında geleneksel Marston-Spangler teorilerini baz alan yöntemin hala geçerli olduğunu fakat daha rasyonel bir yaklaşım için SIDD (Doğrudan Tasarım) yönteminin bir alternatif olarak düşünülmesi gerektiğini belirtmişlerdir [12].

Erdoğan ve Tadros (2006), gömülü betonarme boruların davranışı ve tasarımı üzerinde çalışmalar yaparak kısa ve uzun vadeli amaçlar belirtmişlerdir. Çalışmalarının kısa vadeli amaçlarına göre tasarım yöntemlerini karşılaştırarak, betonarme borular için bir tasarım kriteri ve rehberi oluşturmuşlardır. Çalışmalarının uzun vadeli amaçlarını ise beton boruların yapısal davranışını teorik olarak etkin bir şekilde çözümlenmek, tasarım kriterlerini geliştirmek ve daha rasyonel, ekonomik ve güvenli tasarım yöntemleri elde etmek olarak belirtmişlerdir. Dolaylı ve doğrudan tasarım yöntemlerini karşılaştırarak Şekil 3'te görüldüğü gibi SIDD Tip III kurulumunda 48inç (1200mm) çaplı boruda dolaylı ve doğrudan tasarım yöntemlerine göre hesaplanan donatı alanları sunulmuştur [13]. Şekil 3'te dolgu yüksekliğine (1ft = 0.304m) ve beton malzeme dayanımı (4000psi = 27.57MPa, 5000psi = 34.47MPa) artışına bağlı olarak doğrudan tasarım yöntemine göre belirlenen donatı alanı sürekli bir artış göstermiş, dolaylı tasarım yönteminde ise kademeli bir artış olmuştur.

Erdoğan ve Tadros (2009)'da üç-kenarlı deneylerin boruların gömüldüğü zemin içerisindeki davranışı doğru yansıtmadığını belirterek, boru tasarımında doğrudan tasarım yönteminin kullanılması gerektiğini ve üç-kenarlı deneyin (TEB) ve 0.01inç (0.254mm)'lik çatlama kontrol limitinin hiçbir teknik kökene sahip olmadığını bu nedenle limit kontrolü olarak kullanılmaması gerektiği belirtilmiştir. Doğrudan tasarım yönteminin dolaylı tasarım yöntemine göre malzeme davranışlarını ve limit durumlarını ayarlama daha gelişime açık olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, 36inç (914mm)'ten daha küçük çaplı borularda doğrudan tasarım yönteminin dolaylı tasarım yöntemine göre daha muhafazakar sonuçlar verdiği ve mutlaka yeniden gözden geçirilerek tasarımların yapılması gerektiği belirtilmiştir [14].



Şekil 3 - Tip III Kurulumda Dolgu Yüksekliği ve Donatı Alanı Karşılaştırması [13]

Allard ve Naggar (2016), yaptıkları çalışmada doğrudan tasarım (SIDD) yönteminde kullanılan Heger basınç dağılımlarının zemin-yapı etkileşimi kapsamında doğruluğu ve uygulanabilirliğini parametrik sayısal analizler (Plaxis 2D) ile araştırmışlardır. Çalışmada elde edilen en yüksek eğilme momenti değerlerinin borunun taban bölgesinde, en yüksek normal kuvvet değerlerinin ise yan duvar bölgesinde olduğu belirtilmiştir. Ayrıca gömülme derinliği arttıkça pozitif zemin kemerlenmesinin arttığı, Heger basınç dağılımlarında kullanılmakta olan düşey kemerlenme faktörünün sabit tutulmasının konservatif sonuçlar doğurduğu ve genel olarak Heger yönteminin sonlu elemanlar yöntemine göre konservatif sonuçlar verdiği belirlenmiştir [15].

Beakley ve DelloRusso (2020) dolaylı ve doğrudan tasarım yöntemlerinin karşılaştırılması sonucunda, tasarımda gerekli donatı alanı ihtiyacında farklılıklar olduğunu ve her iki yöntemin de yeterince konservatif sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Dolaylı tasarım yönteminin daha basit bir kurulum yöntemi olduğundan ve yaklaşık 70 yıllık kanıtlı performansa dayandığından kullanımının hala yaygın olduğu, ancak doğrudan tasarım yönteminin kullanımının daha efektif ve ekonomik olabileceğini vurgulamışlardır. Özellikle 48inç (1200mm) ve üzeri boru çaplarında dolaylı tasarım yönteminin tasarımda etkisini yitirmeye başladığını belirtmişlerdir [16].

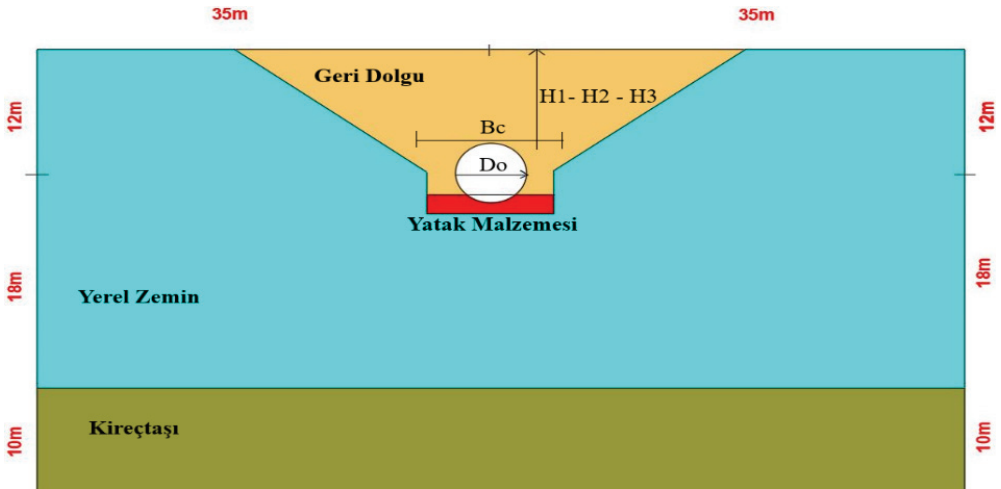
3. VAKA ANALİZİ

Bu çalışma kapsamında incelenen problemde, borunun gömülme yükseklikleri H1-H2-H3 (m) olarak sırasıyla 3m, 6m ve 12m dikkate alınmıştır. Boru dış çapı değişimi Ø800-Ø1800 mm aralığındadır. Analizlerde kullanılan beton boru malzeme parametreleri Tablo 5'te, zemin parametreleri ise Tablo 6'da sunulmuştur. Yerel zemin, yatak ve geri dolgu malzemeleri için Pekleşen Zemin Modeli (HS Model) ve Kireçtaşı tabakası için ise Mohr-Coulomb (MC) bünye modeli kullanılmıştır. Doğrudan tasarım ve dolaylı tasarım yöntemleri kullanılarak yapılan analitik analizlerde zemin birim hacim ağırlıkları G1-G2-G3 olarak

belirtilmiş olup sırasıyla 18, 20 ve 23 kN/m³ olarak dikkate alınmıştır. Değişen parametrelere göre boru tasarımı için gerekli olan donatı alanları hesaplanarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Problemin model geometrisi Şekil 4'te gösterilmiştir. Burada D_o boru dış çapını ve B_c hendek genişliğini ifade etmektedir. Analitik çalışmada konvansiyonel tasarım yöntemleri irdelendiği için yerel zemin ve yatak malzemesinin rijitlik parametreleri analizlerde kullanılmamıştır, dolayısıyla analitik çalışmada yalnızca geri dolgu malzemesinin rijitliği ve dolgu yüksekliklerinin etkileri dikkate alınabilmektedir.

Tablo 5 - Analitik ve sayısal analizlerde kullanılan beton boru özellikleri

Parametreler	Birim	Analitik Analiz	Sayısal Analiz
Boru İç Çapı (Di)	mm	1500	1500
Duvar Kalınlığı (h)	mm	120-200	120-200
Elastisite Modülü (E _c)	GPa	30	30
Eksenel Rijitliği (EA)	kN/m	-	6.4x10 ⁶
Eğilme Rijitliği (EI)	kNm ² /m	-	21.33x10 ³
Basınç Dayanımı (f' _c)	MPa	45	45
Donatı Akma Dayanımı (f _y)	MPa	485	485
Yoğunluğu (γ _c)	kN/m ³	24	24
Poisson Oranı (ν)	-	0.15	0.15
Ağırlık (w)	kN/m/m	-	2.80



Şekil 4 - Problem model geometrisi

Tablo 6 - Sayısal analizlerde kullanılan zemin özellikleri

Zemin Tipi	γ (kN/m ³)	E_{50}^{ref} (MPa)	E_{oed}^{ref} (MPa)	E_{ur}^{ref} (MPa)	c^{ref} (kPa)	ϕ (°)	E (MPa)
Yatak (HS)	17	10	10	30	5	25	-
Yerel Zemin (HS)	19	20	20	60	10	32	-
Geri Dolgu 1(HS)	18	15	15	45	5	32	-
Geri Dolgu 2(HS)	20	15	15	45	10	32	-
Geri Dolgu 3(HS)	23	20	20	60	10	32	-
Kireçtaşı (MC)	24	-	-	-	50	35	15x10 ³

Not: HS Pekleşen Zemin, MC Mohr Coulomb, γ Zemin Birim Hacim Ağırlığı, E Elastisite Modülü, E_{50}^{ref} Referans Elastisite Modülü, E_{oed}^{ref} Referans Ödometre Modülü, E_{ur}^{ref} Referans Yükleme Boşaltma Modülü, c^{ref} Kohezyon, ϕ İçsel Sürtünme Açısı, ν_{ur} (Poisson Oranı) 0.2, *Kireçtaşı 0.3.

Çalışmada, dolaylı tasarım yöntemi için geometri, kurulum tipi ve boru çaplarına bağlı olarak minimum yataklama faktörleri (Bf_o), yatak katsayıları (Bf_c) ve ana yatak katsayıları (Bf_v) Beton Boru Tasarım Rehberi (ACPA, 2011)'den alınmıştır (Tablo 7). Problemden henek genişliği 3.5m'dir. Doğrudan tasarım yöntemi için borunun taban, yan duvar ve taç bölgeleri için boru tabanından itibaren taban bölgesi 0°, yan duvar bölgesi 90°, taç bölgesi 180° olmak üzere bu açılara denk gelen eksenel kuvvet, kesme kuvveti ve moment hesap katsayıları ASCE 15-98 Şartnamesinden alınmıştır.

Tablo 7 - Dolaylı tasarım yönteminde kurulum tipleri ve yataklama katsayıları [17]

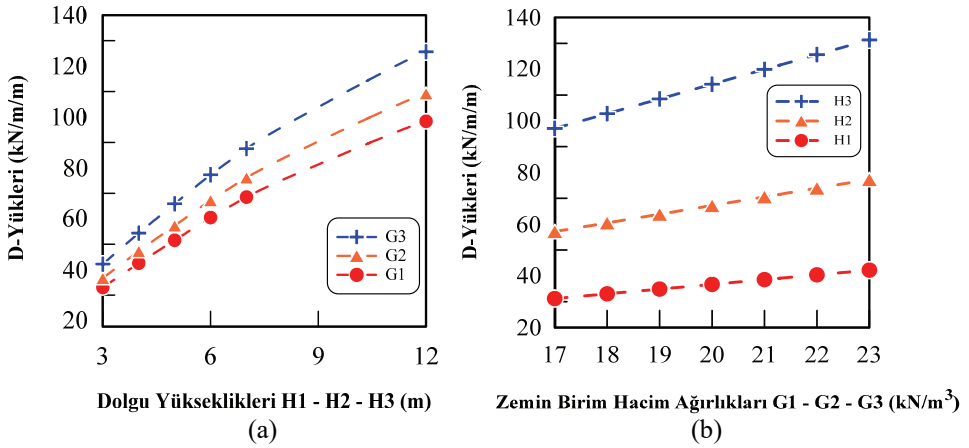
Standart Kurulum Tipleri	Minimum Yataklama Katsayısı (Bf_o)	Yataklama Katsayısı (Bf_c)	Ana Yataklama Katsayısı (Bf_v)
Tip 1 (T1)	2.3	3.76	2.74 – 3.62
Tip 2 (T2)	1.9	2.8	2.17 – 2.71
Tip 3 (T3)	1.7	2.2	1.85 – 2.15
Tip 4 (T4)	1.5	1.7	1.56 – 1.68

3.1. Konvansiyonel Yöntemler ile Hesaplamalar

3.1.1. Dolaylı Tasarım Yöntemi

Dolgu yüksekliğinin ve zemin birim hacim ağırlığının çatlama D-Yüküne olan etkisini hesaplamak için, Tip 1 standart yükleme koşulları dikkate alınarak yapılan analizlerde boru iç çapı 1.5m ve et kalınlığı 0.2m olarak sabit tutularak, dolgu yükseklikleri H1, H2 ve H3 sırasıyla 3m, 6m ve 12m'dir. Grup 1 (G1), Grup 2 (G2) ve Grup 3 (G3) sırasıyla 18, 20 ve 23 kN/m³ zemin birim hacim ağırlıklarını ifade ederken, artan dolgu yüksekliklerinin çatlama D-Yüküne olan etkisi incelenmiştir (Şekil 5). Şekil 5a'da Grup 1 için H1, H2 ve H3 örtü

derinliklerinde sırasıyla 33, 62 ve 102.5 kN/m/m D-Yükleri hesaplanmıştır. Grup 2 ve Grup 3 için aynı derinliklerde sırasıyla 37, 67 ve 113.9 kN/m/m ve 42, 77 ve 131 kN/m/m çatlama D-Yükleri elde edilmiştir. Görüldüğü gibi, hesaplanan en yüksek D-Yükleri kıyaslandığında G3 zemin grubundaki kurulumda G2 ve G1'e göre sırasıyla %15 ve %28 daha fazladır. Dolaylı tasarım yönteminde, dolgu yüksekliği arttıkça (H1 - H2 - H3) betonarme boruda oluşan çatlama D-Yüklerinde artış meydana gelmiştir. Ayrıca, aynı dolgu yüksekliğinde zemin birim hacim ağırlığındaki artış (G1 - G2 - G3) nedeniyle D-Yüklerinin az da olsa arttığı belirlenmiştir. Zemin birim hacim ağırlığındaki artışın (Şekil 5b) D-Yüklerini artırdığı ve artış oranının dolgu yüksekliği arttıkça daha fazla oranda gerçekleştiği tespit edilmiştir. Şekil 5b'den görüldüğü gibi D-Yüklerindeki artış, H3 dolgu yüksekliğindeki kurulumda H2 ve H1'e göre sırasıyla %69 ve %311 daha fazladır.

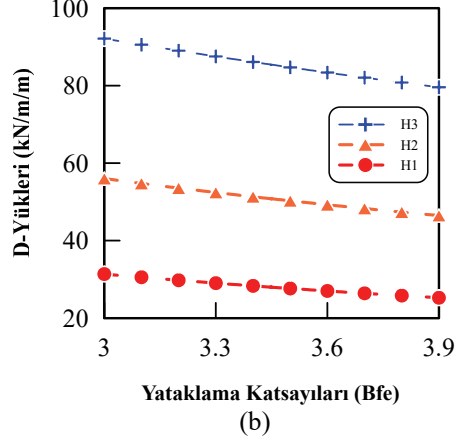
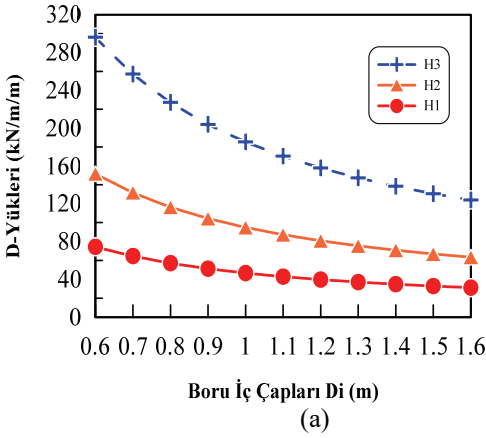


Şekil 5 - a) Dolgu Yüksekliklerindeki Değişimin D-Yüklerine Etkisi, b) Zemin Birim Hacim Ağırlıklarındaki Değişimin D-Yüklerine Etkisi

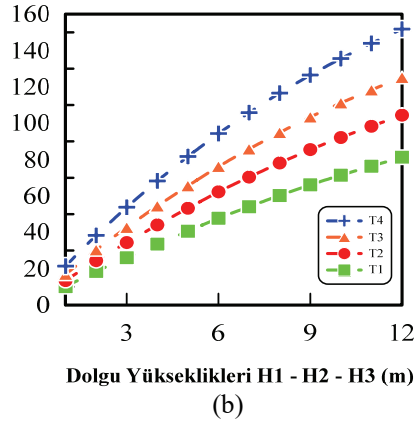
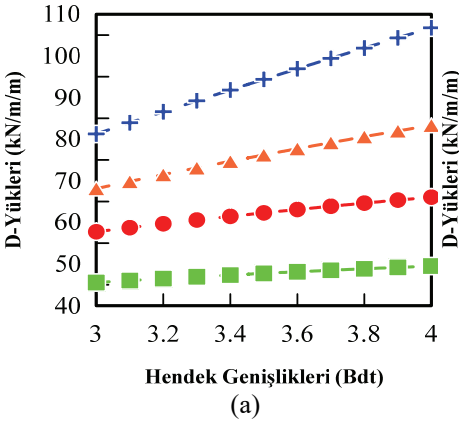
H1, H2 ve H3 dolgu yükseklikleri için boru iç çapları (D_i) 0.6m ve 1.6m arasında kademeli olarak artırılarak, farklı dolgu yükseklikleri ve boru iç çapındaki değişimlerin çatlama D-Yüklerine olan etkisi incelenmiştir. Şekil 6a'da gösterildiği gibi, betonarme boru iç çaplarının artmasının borudaki çatlama D-Yüklerini azalttığı görülmektedir. 0.6m iç çapa sahip betonarme boruda D-Yükleri, H1 ve H2 dolgu yüksekliklerinde boru çatlama D-Yükleri kabul edilebilir seviyelerde iken, H3 dolgu yüksekliğinde ise 310 kN/m/m gibi çok yüksek bir değere çıkmıştır. H3 dolgu yüksekliğinde boru çapı 0.6m'den 1.6m'ye yükseltildiğinde azalış oranı %58 iken, H2 dolgu yüksekliğinde %57 ve H1 dolgu yüksekliğinde ise %56'dır. Böylece, dolaylı tasarım yönteminde nispeten yüksek dolgular altında kalacak betonarme boruların çapları 1m'den az olmaması gerektiği tespit edilmiştir. Ayrıca, yüksek dolgu yüklerine maruz kalacak boruların çap artışına bağlı olarak D-Yüklerindeki azalma oranının düşük dolgu yüklerine göre daha fazla olduğu belirlenmiştir.

H1, H2 ve H3 dolgu yüksekliklerini belirtirken, değişken yataklama katsayılarının boruda oluşan çatlama D-Yüklerine olan etkisini incelemek için analizler yapılmıştır. Analizlerde standart kurulum tipi T1 olup minimum yataklama faktörü ($B_{f0}=2.3$), boru iç çapı 2m, boru et kalınlığı 0.2m ve hendek genişliği 3.5m olarak alınmıştır. Yataklama katsayıları (B_{fe}) 3 ve

3.9 arasında kademeli olarak artırılmış ve hesap sonuçları Şekil 6b’de sunulmuştur. Görüldüğü gibi yataklama katsayıları kademeli olarak arttıkça boruda meydana gelen çatlama D-Yüklerinde azalma meydana gelmiştir. Bu azalmanın oranı H3 dolgu yüksekliğinde %14, H2 dolgu yüksekliğinde %17, H1 dolgu yüksekliğinde ise %19.5’tir.



Şekil 6 - a) Boru İç Çapı Değişimin D-Yüklerine Olan Etkisi, b) Yataklama Katsayısı Değişimin D-Yüklerine Olan Etkisi



Şekil 7 - a) Hendek Genişliği ve Kurulum Tipindeki Değişimin D-Yüklerine Etkisi, b) Dolgu Yüksekliği ve Kurulum Tipindeki Değişimin D-Yüklerine Etkisi

Dolaylı tasarım yönteminde Tip 1, 2, 3 ve 4 boru kurulumlarında hendek genişliği değişiminin D-Yüklerine olan etkileri incelenmiştir. Analizler, H2 (6m) dolgu yüksekliği dikkate alınarak ve 18 kN/m³ zemin birim hacim ağırlığına sahip olan G1 zemin için yapılmıştır. Hendek genişlikleri (B_{dt}) ise 3m ve 4m arasında değişim göstermekte ve boru iç çapı 2m, duvar kalınlığı ise 0.2m olarak alınmıştır (Şekil 7). Şekil 7a’da, tüm kurulum

tiplerinde hendek genişliği arttıkça D-Yüklerinde artış meydana gelmiş ve bu artış oranı Tip 1 kurulumda %8, Tip 2 kurulumda %15.7, Tip 3 kurulumda %22.3 ve Tip 4 kurulumda yaklaşık %30'dur. H1, H2 ve H3 dolgu yüksekliklerini belirtirken, boru kurulumunda standart kurulum tiplerindeki (T1- T4) farklılıklarının borudaki çatlama D-Yüklerine olan etkisi analiz edilmiş ve sonuçları Şekil 7b'de gösterilmiştir. Dolgu yüksekliğindeki artışın borudaki çatlak D-Yüklerini artırdığı ve aynı zamanda Tip 1'den 4'e doğru boru kurulum tipi değiştirildiğinde borudaki çatlama D-Yüklerinde de artış olduğu tespit edilmiştir. Tip 1'den Tip 4 kurulumuna doğru H1, H2 ve H3 dolgu yükseklikleri için sırasıyla %106, %97 ve %86 oranlarında artış meydana gelmiştir.

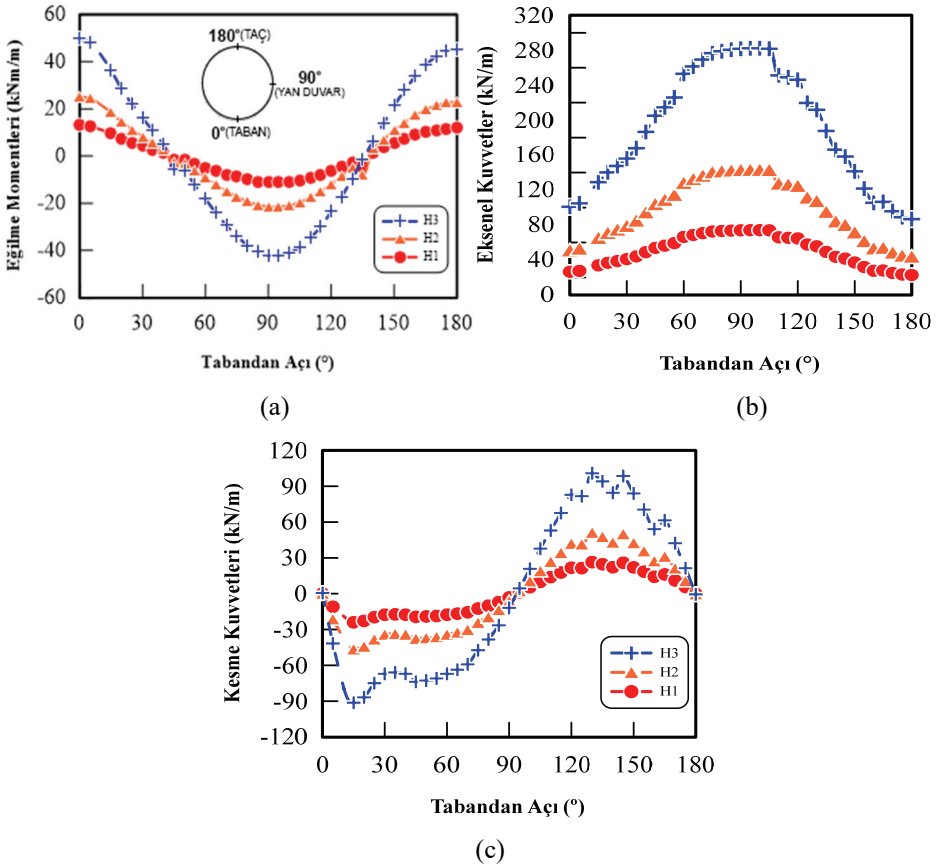
3.1.2. Doğrudan Tasarım Yöntemi

Doğrudan tasarım yönteminde dolgu yüksekliğinin boru kesitinde oluşan iç kuvvetlere olan etkisini belirlemek için, Tip 1 kurulumda Grup 1 (G1) 18 kN/m³ birim hacim ağırlığında zemin kullanılmış, boru iç çapı 1.5m ve et kalınlığı 0.2m olarak sabit tutulmuş ve dolgu yükseklikleri H1, H2 ve H3 için hesaplar yapılmıştır. Elde edilen eğilme momenti, eksenel kuvvet ve kesme kuvveti değerleri sırasıyla Şekil 8a, b ve c'de sunulmuştur. Şekil 8'de, dolgu yüksekliği artışının eğilme momenti, eksenel kuvveti ve kesme kuvveti değerlerini artırdığı ve en yüksek eğilme momenti değerinin boru tabanında (0°), en yüksek eksenel kuvvet değerinin ise borunun yan duvarında (90°) olduğu tespit edilmiştir. Eğilme momenti artış oranına bakıldığında dolgu yükseklikleri H1'den H3'e artırıldığında borunun taban bölgesinde yaklaşık %281'lik bir artış hesaplanmıştır (Şekil 8a). Şekil 8b'de gösterilen eksenel kuvvet değerleri incelendiğinde, borunun taban bölgesinde (0°) sırasıyla 3m, 6m ve 12m dolgu yüksekliklerinde, sırasıyla 26 kN/m, 51 kN/m ve 100 kN/m değerlerine kadar artmıştır. En yüksek eksenel kuvvet değeri borunun yan duvar bölgesinde 281 kN/m olarak hesaplanmıştır. Borunun taç bölgesinde (180°)'de ise 3m, 6m ve 12m dolgu yüksekliklerinde sırasıyla 22 kN/m, 44 kN/m ve 86 kN/m olarak elde edilmiştir. Böylece doğrudan tasarım yönteminde, boru üzerindeki dolgu yüksekliği arttıkça eksenel kuvvet değerlerinde de artış olduğu tespit edilmiştir. Eksenel kuvvetlerin artış oranına bakıldığında borunun yan duvar bölgesinde dolgu yükseklikleri H1'den H3'e artırıldığında yaklaşık %270'lik bir artış belirlenmiştir. Şekil 8c'de borunun taban ve taç bölgesinde (0°, 180°) kesme kuvveti değeri oluşmadığı, borunun yan duvar bölgesine (90°) doğru gidildiğinde ise kesme kuvveti değerlerinde artış meydana gelmiştir. Yan duvar bölgesinde 26.48 kN/m'lik kesme kuvveti oluşmuş ve en yüksek kesme kuvveti değeri 120°'lik açıda 100 kN/m olarak hesaplanmıştır. Dolgu yüksekliklerindeki artış kesme kuvveti değerlerini de artırmıştır.

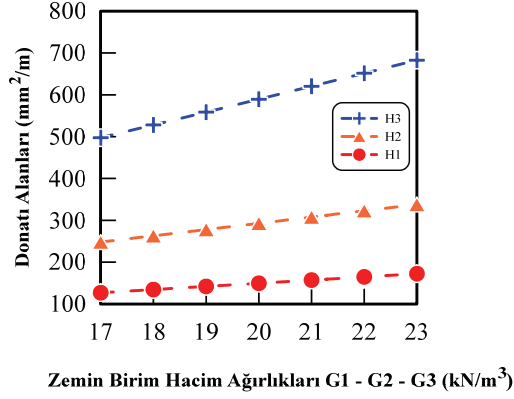
Doğrudan tasarım yönteminde G1, G2 ve G3 zemin birim hacim ağırlıklarını ifade ederken, Şekil 9'da artan dolgu yüksekliğine karşılık gerekli donatı alanlarındaki değişim gösterilmiştir. Dolgu yüksekliği arttığında gerekli donatı alanlarında da artış meydana gelmiştir. Bu artışın oranı, H3 dolgu yüksekliğinde %37, H2 dolgu yüksekliğinde %36.2, H1 dolgu yüksekliğinde ise %35'tir.

Doğrudan tasarım yönteminde zemin birim hacim ağırlıklarının boru kesitinde oluşan iç kuvvetlere olan etkisi, Tip 1 kurulumda boru iç çapı 1.5m ve et kalınlığı 0.2m sabit tutularak incelenmiştir. Şekil 10a, Şekil 10b ve Şekil 10c'de birim hacim ağırlık değişiminin sırasıyla moment, normal kuvvet ve kesme kuvvetine etkileri sunulmuştur. Şekil 10a'da, en yüksek eğilme momenti beklendiği gibi borunun taban bölgesinde oluşmuş ve eğilme momenti

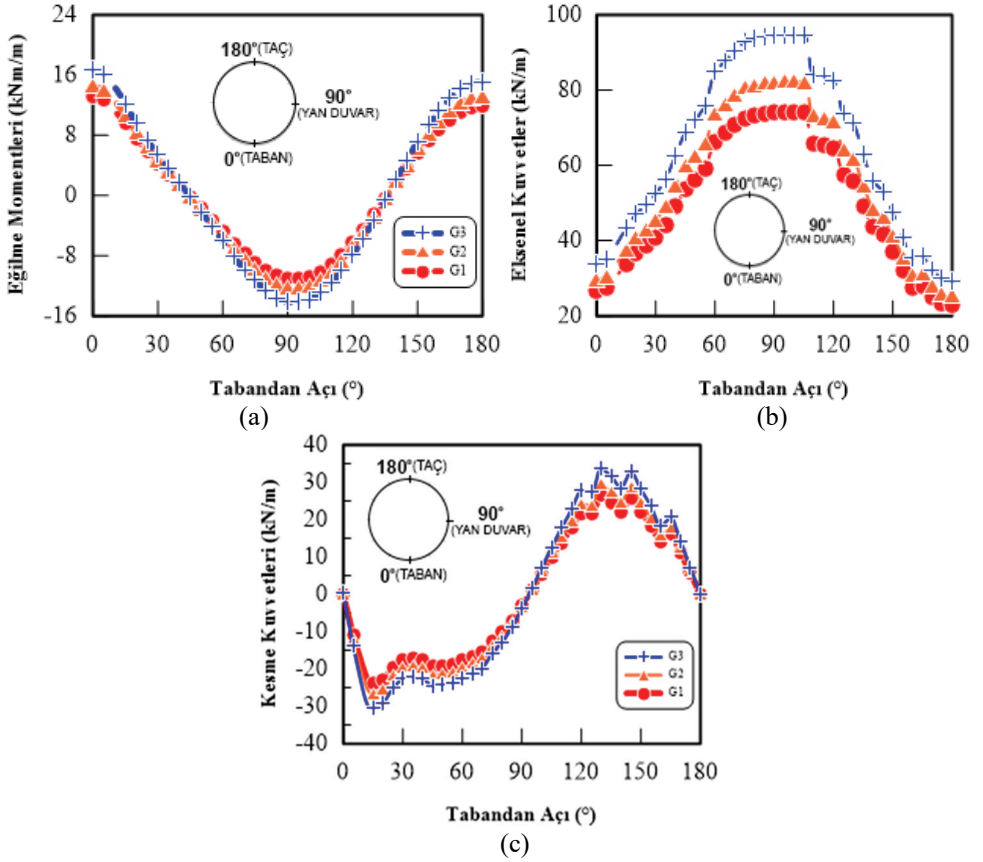
değerlerinin zeminin birim hacim artışına bağlı olarak değişim gösterdiği tespit edilmiştir. G1 zemin grubundan G3 zemin grubuna değişimde borunun taban bölgesinde elde edilen eğilme momentlerinde %27'lik bir artış olmuştur. Şekil 10b'de, borunun taban bölgesinde (0°) G1 zemin grubunda 26 kN/m eksenel kuvvet hesaplanırken, G2 zemin grubunda bu değer 29 kN/m ve G3 zemin grubunda ise 33.8 kN/m'dir. En yüksek eksenel kuvvet değeri borunun yan duvar bölgesinde (90°) G3 zemin grubunda 94.5 kN/m olarak hesaplanmıştır. Yan duvarda en yüksek değerden boru taç bölgesine doğru gidilirken eksenel kuvvet değerleri hızlıca azalmıştır. G1 zemin grubundan G3 zemin grubuna değişimde borunun yan duvar bölgesinde elde edilen eksenel kuvvetlerde %28'lik bir artış meydana gelmiş ve eksenel kuvvet değerlerinin zemin birim hacim artışıyla doğru orantılı olarak artış gösterdiği belirlenmiştir. Şekil 10c'de, borunun taban ve taç bölgesinde (0°, 180°) kesme kuvveti değeri görülmezken, en yüksek kesme kuvveti değeri borunun tabanından yaklaşık (125°)'lik açıda G3 zemin grubunda 33.8 kN/m olarak hesaplanmıştır.



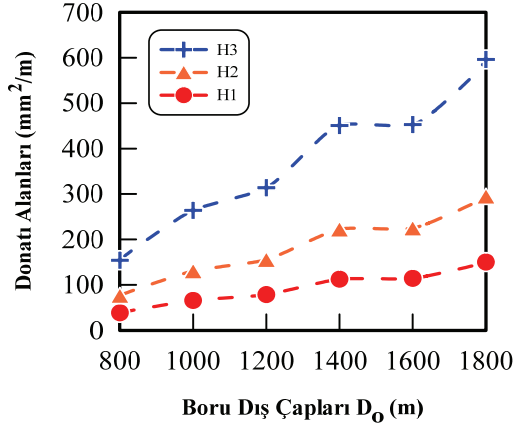
Şekil 8 - Dolgu Yüksekliği Etkisi a) Eğilme Momenti, b) Eksenel Kuvvet, c) Kesme Kuvveti



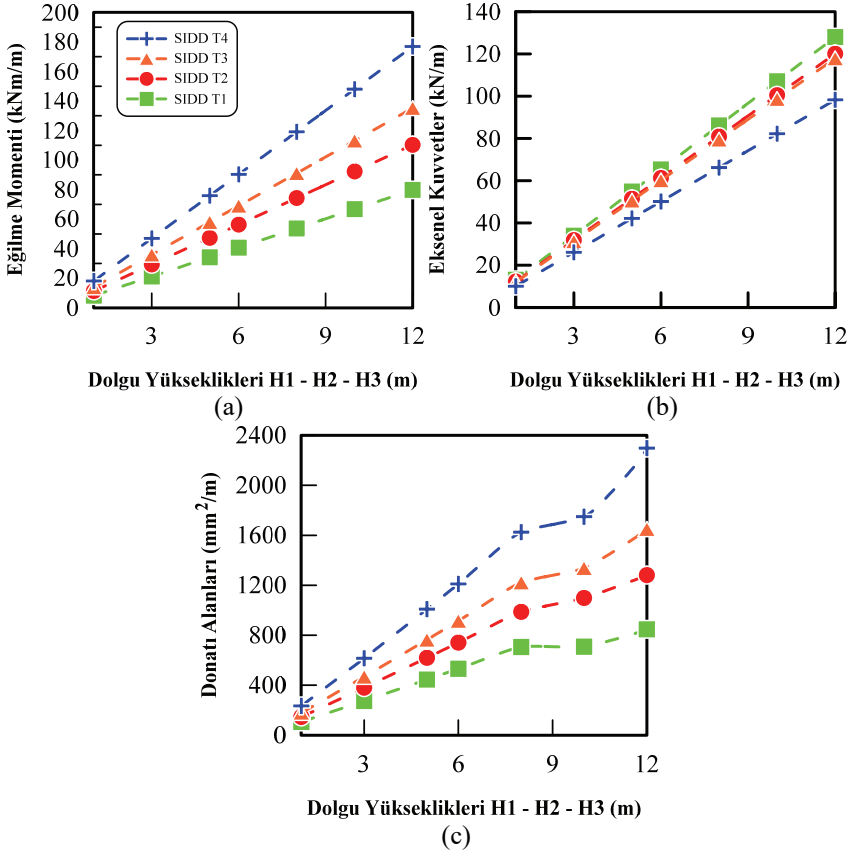
Şekil 9 - Dolgu Yüksekliğinin Gerekli Donatı Alanına Etkisi



Şekil 10 - Zemin Birim hacim ağırlığı değişimi etkileri a) Eğilme Momenti, b) Eksenel Kuvvet, c) Kesme Kuvveti



Şekil 11 - Boru Dış Çapı Değişimin Gerekli Donatı Alanına Etkisi



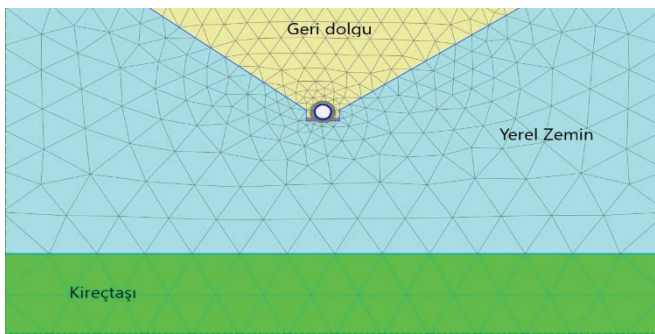
Şekil 12 - SIDD Kurulum Tiplerine Göre a) Eğilme Momenti b) Eksenel Kuvvet c) Gerekli Donatı Alanı

Doğrudan tasarım yönteminde H1 dolgu yüksekliğinde ve 1.5m iç çaplı boru kullanılarak yapılan analizlerde, G1, G2 ve G3 zemin birim hacim ağırlıklarını ifade ederken birim hacim ağırlığı artışının, gerekli donatı alanlarını da arttığı tespit edilmiştir (Şekil 11).

Doğrudan tasarım yönteminde tasarımlarda, boruların dış çapı arttıkça gerekli donatı alanı ihtiyacı da artmaktadır. SIDD’de Heger toprak basıncı dağılımlarını (Şekil 2) belirlerken düşey kemerlenme faktörü (VAF) Standart Kurulum Tipleri (T1-T4)’ne göre değişmektedir. Analizlerde düşey kemerlenme faktörü VAF, T1 için 1.35, T2 ve T3 için 1.40, T4 için ise 1.45 alınmıştır (Tablo 4). Boru iç çapı 2m ve G1 zemin için H1, H2 ve H3 dolgu yükseklikleri dikkate alınarak yapılan analizlerin sonuçlarına göre kesit tesirleri hesaplanmış ve Şekil 12’de sunulmuştur. SIDD Tip 1’den Tip 4’e doğru kurulum tiplerine göre eğilme momenti, normal kuvvet ve donatı alanı değişimleri sırasıyla Şekil 12a, Şekil 12b ve Şekil 12c’de sunulmuştur. Şekil 12a’da SIDD Tip 1’den Tip 4’e doğru kurulum doğru eğilme momentlerinin arttığı görülmektedir. Tip 1’den Tip 4 kurulumuna geçildiğinde H1, H2 ve H3 dolgu yükseklikleri için artış oranı sırasıyla %122, %121 ve %120’dir. Şekil 12b’de eksenel kuvvetler SIDD Tip 1’den Tip 4 kurulumuna doğru azalmaktadır. Tip 1’den Tip 4 kurulumuna geçildiğinde H3 dolgu yüksekliğinde eksenel kuvvetlerde %23 oranında bir azalma meydana gelmiştir. Fakat bu azalışın Tip 2 ve 3 arasında %1.85 oranında olduğu görülmüştür. Bunun sebebi ise her iki tip kurulumda da düşey kemerlenme faktörleri (VAF) değeri 1.40’tır. Şekil 12c’de SIDD Kurulum Tipi 1’den Tip 4’e doğru gerekli donatı alanının arttığı belirlenmiştir. Tip 1’den Tip 4 kurulumuna doğru gerekli donatı alanlarında H1, H2 ve H3 dolgu yüksekliklerinde sırasıyla %124, %128 ve %171 oranlarında artış hesaplanmıştır.

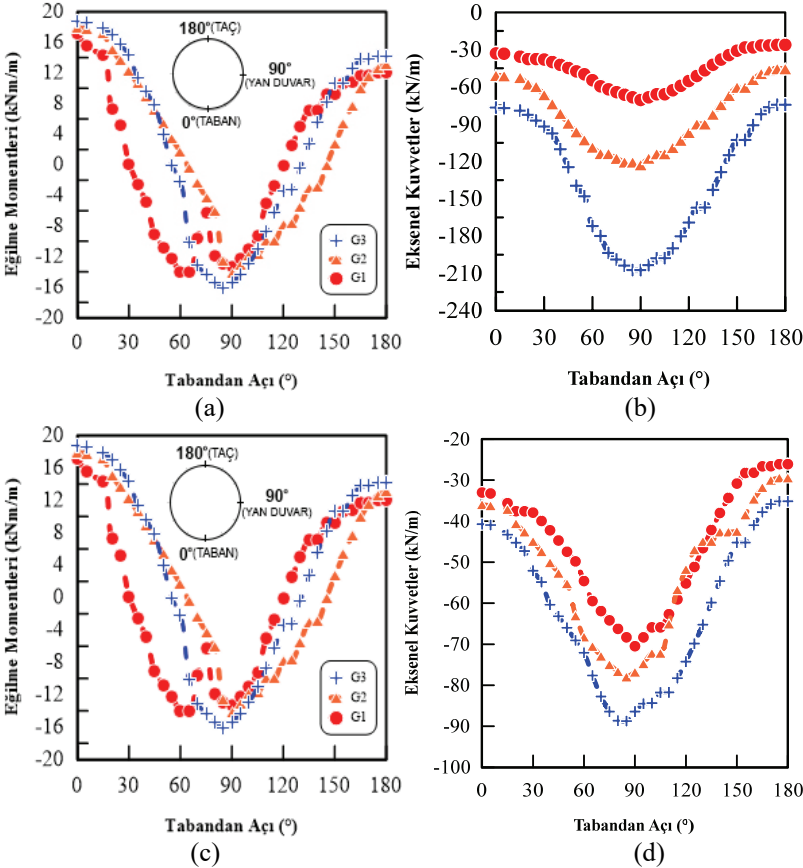
3.2. Sayısal Analizler

Hendek ortamında gömülü betonarme boru için Şekil 4’te gösterilen model geometrisi dikkate alınarak ve Tablo 5 ve 6’da verilen malzeme parametreleri kullanılarak sayısal analizler yapılmıştır. Analizlerde H1-H2-H3 dolgu yükseklikleri, G1-G2-G3 geri dolgu zeminin birim hacim ağırlıkları ve Ø800-Ø1800mm aralığında boru çapı değişimlerinin etkileri incelenmiştir. Beton borunun taban, taç ve yan duvar bölgelerindeki eğilme momenti, eksenel ve kesme kuvvetleri ve gerekli donatı alanı ihtiyaçları yapılan parametrik sayısal analizlerden hesaplanmıştır. Şekil 13’te sayısal analizlerde kullanılan zemin-boru etkileşim probleminin sonlu elemanlar ağı gösterilmiştir. Dolgu yüksekliklerinin ve zemin grubundaki değişimlerinin hesap sonuçları Şekil 14’te sunulmuştur. Sayısal analiz sonuçlarının analitik analizlerle karşılaştırılması Tablo 8 ve 9’da verilmiştir.



Şekil 13 - Sayısal analiz modeli

Dolgu yükseklikleri H1'den H3'e artırıldığında Şekil 14a'da eğilme momenti artışı borunun taban bölgesinde yaklaşık olarak %173 ve Şekil 14b'de eksenel kuvvet yan duvar bölgesinde yaklaşık %194 olarak hesaplanmıştır. Şekil 14c'de en yüksek eğilme momenti beklendiği gibi borunun taban bölgesinde oluşmuştur. Eğilme momenti değerlerinin zeminin birim hacim artışına bağlı olarak değişim gösterdiği tespit edilmiştir. G1 zemin grubundan G3 zemin grubuna değişimde borunun taban bölgesinde elde edilen eğilme momentlerinde %9'luk bir artış meydana gelmiştir. Şekil 14d'de en yüksek eksenel kuvvet değeri borunun yan duvar bölgesinde (90°) G3 zemin grubunda 82.4 kN/m olarak hesaplanmıştır ve boru taç bölgesine doğru gidilirken eksenel kuvvet değerleri hızla azalmıştır. Böylece, dolgu yüksekliği artışının eğilme momenti, eksenel kuvvet ve kesme kuvveti değerlerini artırdığı ve en yüksek eğilme momenti değerinin boru tabanında (0°), en yüksek eksenel kuvvet değerinin ise borunun yan duvar bölgesinde (90°) oluştuğu tespit edilmiştir. G1 zemin grubundan G3 zemin grubuna değişimde borunun yan duvar bölgesinde eksenel kuvvetlerde %22'lik bir artış hesaplanmıştır. Sayısal analizlerde boru bölgelerindeki iç kuvvetlerin dolgu yükseklikleri ve zemin gruplarına bağlı olarak değişim etkilerinin SIDD (Doğrudan tasarım) yöntemine göre yüzdesel olarak daha düşük olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 14 - Sayısal analiz sonuçları a) dolgu yüksekliği - momentler b) dolgu yüksekliği - eksenel kuvvetler c) zemin grubu - momentler d) zemin grubu - eksenel kuvvetler

3.3. Yöntemlerin Karşılaştırması

Günümüzde yaygın olarak boru tasarımında kullanılan geleneksel yöntemlerin (dolaylı ve doğrudan tasarım) ne kadar konservatif davrandığını incelemek için sayısal analizlerden elde edilen hesap sonuçları ile kıyaslanmıştır. Dolaylı tasarım yöntemi yaklaşık 70 yıldır uygulanan ampirik bir yöntemdir ve bu yöntem kolay uygulanabilirliğe sahip olduğundan günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğrudan tasarım yöntemi ise limit durum tasarımının uygulandığı, Heger basınç dağılımlarının kullanıldığı ve 1970’li yılların çeşitli bilgisayar yazılımları (SPIDA) ile geliştirilen daha az ampirik bir yöntemdir. Bu yöntemlerin günümüzde kabul edilebilirliğinin sorgulanması ve avantaj/dezavantajlarının sofistike sonlu elemanlar yöntemleri ile kıyaslanması ekonomi ve fizibilite açısından gerekmektedir. Çalışma sonucunda elde edilen veriler literatür kısmında verilen çalışmalardaki sonuçlar ile uyumludur.

Doğrudan tasarım yöntemi ile hesaplanan iç kuvvet değerleri Tip 1 standart kurulum içindir ve dolayısıyla sayısal analizlerde de sağlıklı bir kıyaslama için bu kurulum tipine göre malzeme özellikleri seçilmiş ve analizler yapılmıştır. Farklı bir kurulum tipi olan Tip 4 kurulum ile gömülü betonarme boru tasarımı için Kılıç ve Demirci (2022)’de analitik yöntemler ve sayısal analiz sonuçları karşılaştırılarak parametrik bir çalışma yapılmıştır [18]. Sayısal analiz (sonlu elemanlar yöntemi) ile analitik analiz (dolaylı ve doğrudan tasarım yöntemi) sonuçlarının karşılaştırılması Tablo 8 ve 9’da sunulmuştur. Analiz sonuçları en yüksek iç kuvvetleri ve donatı alanlarını veren H3 dolgu yüksekliğinde değerlendirilmiştir. Tablo 8, 9 ve Şekil 15 incelendiğinde, dolaylı tasarım yöntemi ve doğrudan tasarım yöntemlerinin sayısal analizlere göre konservatif sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Dolaylı tasarım yöntemi dikkate alınarak yapılan parametrik analizlere göre elde edilen D-Yüklerine göre ASTM C76 Şartnamesinden gerekli boru sınıfları ve donatı alanları belirlenmiştir. Şekil 6a ve Şekil 15’te görüldüğü gibi dolaylı tasarım yönteminde 1.8m dış çapa sahip boruda 136.7 kN/m/m’lik D-Yüküne karşılık gelen boru sınıfı IV olarak seçilmiş ve buna karşılık gelen gerekli donatı alanı $8.7 \text{ cm}^2/\text{m} = 870 \text{ mm}^2/\text{m}$ olarak belirlenmiştir (ASTM C76 M-05, Tablo 5).

Tablo 8 - Boru bölgelerindeki iç kuvvetlerin farklı analiz yöntemleri ile karşılaştırılması

İç Kuvvet	Boru Bölgeleri	Doğrudan Tasarım (SIDD)			Sayısal Analiz (PLAXIS 2D)			Değişim Oranı (H3)
		H1	H2	H3	H1	H2	H3	
Durum 1: Dolgu Yüksekliklerinin Değişimi								
M (kNm/m)	Taban (0°)	13	25	49	17.1	28	46.9	%4.5
	Yan Duvar (90°)	-11	-21	-42	-13.2	-22.9	-40.6	%3.5
	Taç (180°)	11	23	44	12	21.1	38.4	%14.5
N (kN/m)	Taban (0°)	26	51	100	33	50.9	76.6	%30.5
	Yan Duvar (90°)	74	143	281	70.3	120.3	207.9	%35.1
	Taç (180°)	22.7	44.1	87	26.1	45.4	74.3	%17.1

Tablo 8 - Boru bölgelerindeki iç kuvvetlerin farklı analiz yöntemleri ile karşılaştırılması (devamı)

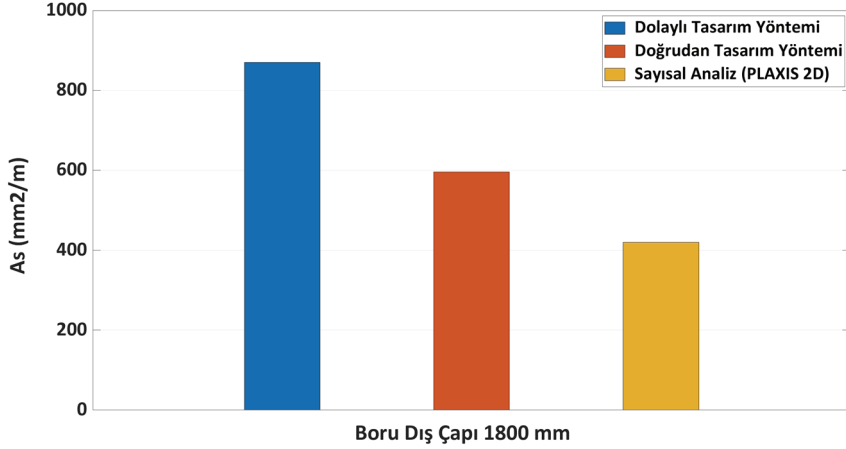
İç Kuvvet	Boru Bölgeleri	Doğrudan Tasarım (SIDD)			Sayısal Analiz (PLAXIS 2D)			Değişim Oranı (H3)
V (kN/m)	Taban (0°)	0.15	0.29	0.56	-0.3	-0.73	-1.5	%168
	Yan Duvar (90°)	10.06	19.48	38.31	9.85	13.4	24.2	%58
	Taç (180°)	-0.15	-0.29	-0.56	-0.17	-0.57	-1.2	%114
Durum 2: Zemin Birim Hacim Ağırlıklarının Değişimi								
		G1	G2	G3	G1	G2	G3	
M (kNm/m)	Taban (0°)	13	14.5	16.7	17.1	17.9	18.6	
	Yan Duvar (90°)	-9	-11	-14	-13.2	-14.2	-15.3	
	Taç (180°)	11	13	15	12	13	14.1	
N (kN/m)	Taban (0°)	26	29.4	33.8	33	35.9	40.7	
	Yan Duvar (90°)	73.2	81.3	94	70.3	77	82.4	
	Taç (180°)	22.7	25.3	29.1	26.1	29.4	35.2	
V (kN/m)	Taban (0°)	0.15	0.16	0.19	-0.3	-0.27	-0.37	
	Yan Duvar (90°)	10.06	11.17	12.85	9.85	10.4	10.54	
	Taç (180°)	-0.15	-0.16	-0.19	-0.17	-0.2	-0.32	

Not: M; Eğilme Momenti, N; Eksenel Kuvvet, V; Kesme Kuvveti

Tablo 9 - Analitik ve sayısal analizlerde boru çaplarına göre elde edilen donatı alanları

Boru Dış Çapları (mm)	800	1000	1200	1400	1600	1800
Duvar Kalınlıkları (mm)	120	120	140	140	170	170
Paspayları (mm)	90	90	110	110	140	140
Dolgu Yüksekliği (m)	H3	H3	H3	H3	H3	H3
Analiz Yöntemi	SIDD	SIDD	SIDD	SIDD	SIDD	SIDD
	SAY*	SAY*	SAY*	SAY*	SAY*	SAY*
As,	154.2	264	313.9	450.8	452.9	596.2
Donatı Alanları (mm ² /m)	36.3*	113.1*	156.1*	268.5*	290.2*	419.3*
Donatı Alanı Değişimi (%)	%324	%133	%101	%68	%56	%42

Not: SIDD Doğrudan Tasarım Yöntemi, SAY* Plaxis 2D ile yapılan sayısal analizler.



Şekil 15 - Analitik analizlerden ve sayısal analizlerden belirlenen donatı alanları

4. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

1-) Yapılan parametrik çalışma sonucunda, dolaylı tasarım yönteminde betonarme borunun gömülme yüksekliğinin artırılmasının, betonarme borudaki 0.01 inç (0.254mm)'lik çatlama kriterine denk gelen D-Yüklerini artırdığı tespit edilmiştir. Dolgu yüksekliği arttıkça daha yüksek bir boru sınıfı ve donatı alanı gerekmektedir. Borunun gömüldüğü zemin malzemesinin birim hacim ağırlığı arttığında da D-Yükleri artmıştır. Bu artışın oranı, dolgu yüksekliği arttıkça daha da belirgin hale gelmiştir. Betonarme boru iç çapı arttığında, boru dış çapı da artacağı için kullanılan yataklama katsayısı azalmakta ve böylece borudaki çatlama D-Yükleri de azalmıştır. Özellikle 1m'den daha küçük iç çaplı borular 12m gibi yüksek dolgu yüklerine maruz kaldığında, çatlama kriterine denk gelen tasarım D-Yükleri ASTM C76 Şartnamesinde belirtilen doruk D-Yüklerini (175 kN/m/m) aşmıştır. Bu nedenle 12m gibi yüksek dolgu yüklerine maruz kalacak uygulamalarda, iç çapı 1m'den küçük borular için dolaylı tasarım yönteminin kullanımı önerilmemektedir.

2-) Dolaylı tasarım yönteminde yataklama katsayıları kademeli olarak artırıldığında D-Yüklerinde tatmin edici bir oranda azalış meydana geldiği görülmektedir. Betonarme borunun kurulduğu hendek genişlikleri kademeli olarak artırıldığında ise Tip 1 (T1) kurulumda D-Yüklerinin artışı nispeten düşük bir orandayken Tip 4 (T4) kurulumda ise D-Yükleri yüksek bir oranda artış göstermiştir. Standart kurulum tipleri Tip 1'den Tip 4 kurulumuna doğru D-Yükleri de doğru orantılı olarak artmıştır.

3-) Doğrudan tasarım yöntemine sonuçlarına göre, betonarme borunun gömülme yükseklikleri arttıkça borudaki iç kuvvetlerin arttığı hesaplanmıştır. En yüksek eğilme momenti değerinin borunun taban bölgesinde oluştuğu tespit edilmiştir. Dolgu yüksekliklerindeki artış, gerekli eğilme donatısı alanlarını da arttırmıştır. Dolgu zeminin birim hacim ağırlıklarındaki artışla birlikte iç kuvvetler de artış göstermiş olup gerekli donatı alanları da artmıştır. Boru dış çapları arttıkça elde edilen iç kuvvetler ve gerekli donatı alanları çok fazla artış göstermiştir.

4-) Doğrudan tasarım yönteminde, SIDD Tip 1'den Tip 4 kurulumuna doğru eğilme momentlerinde artış ve aksel kuvvetlerde azalma belirlenmiştir. Bu azalmanın oranı Tip 1

(SIDD T1) - Tip 2 (SIDD T2) ve Tip 3 (SIDD T3) - Tip 4 (SIDD T4) arasında oldukça fazla iken Tip 2 (SIDD T2) ve Tip 3 (SIDD T3) arasında nispeten daha azdır. Bunun nedeni ise her iki kurulumda da düşey kemerlenme faktörünün ($VAF=1.40$) aynı olmasıdır. Bu durum özellikle sayısal analizler ile kıyaslandığında doğrudan tasarım yönteminin sonuçlarının konservatif kalmasında önemli bir etkidir. SIDD Kurulum Tipi 1'den Tip 4 kurulumuna doğru gerekli donatı alanı ihtiyacının arttığı belirlenmiştir. Bu durum, SIDD Tip 1 kurulumun en kaliteli kurulum tipi olduğunu göz önünde bulundurulduğunda beklenen bir sonuçtur. Özellikle SIDD Tip 4 kurulum için çok yüksek donatı alanı gereksinimi mevcuttur.

5-) Plaxis 2D 2019 sonlu elemanlar yazılımı ile yapılan sayısal analizlerde Şekil 14'te görüldüğü gibi dolgu yükseklikleri artırıldığında boru bölgelerindeki iç kuvvetlerin ve gerekli donatı alanlarının arttığı belirlenmiştir. Geri dolgu zemininin özellikleri değiştirildiğinde boru bölgelerindeki iç kuvvetlerin ve donatı alanlarının nispeten daha düşük oranda arttığı tespit edilmiştir. Sayısal analizlerde dolgu yüksekliklerinin değişiminin donatı alanlarına etkisinin zemin grubu değişimine göre daha baskın olduğu görülmektedir. Sayısal analizlerde boru dış çapları artırıldığında gerekli donatı alanları da artmıştır.

6-) Sayısal analizlerde boru bölgelerindeki iç kuvvetlerin dolgu yüksekliklerine ve zemin gruplarına bağlı olarak değişiminin etkilerinin SIDD (Doğrudan tasarım) yöntemine göre yüzdesel olarak daha düşük olduğu belirlenmiştir.

7-) Konvansiyonel tasarım yöntemleri olarak bilinen dolaylı ve doğrudan tasarım yöntemlerinde yerel zemin etkisi ve yatak malzemesinin rijitliği analizlerde dikkate alınmamakta, yalnızca boruyu çevreleyen geri dolgu malzemesinin rijitliği dikkate alınabilmektedir. Elde edilen sonuçlar sayısal analizlere göre oldukça muhafazakar tarafta kalmaktadır. Şekil 15'teki grafik incelendiğinde donatı alanları kıyaslandığında dolaylı tasarım yönteminin sayısal yöntemle göre %107 oranında, doğrudan tasarım yönteminin ise %42 oranında daha fazla donatı alanı gerektirdiği tespit edilmiştir. Gömülü betonarme boru tasarımı yapılırken arazideki yükleme koşullarına uygun olacak şekilde zemin-rijit boru etkileşiminin ve geri dolgu malzemesinin rijitliğinin dikkate alınabildiği sayısal analizlerin de yapılması önerilmektedir.

Semboller

RCP	: Dairesel kesitli betonarme boru
TEB	: Üç-kenarlı deney
B_f	: Yataklama katsayısı
F.S	: Güvenlik katsayısı
W	: Toplam yük
D_i	: Boru iç çapı
D_o	: Boru dış çapı
VAF	: Düşey kemerlenme faktörü
HAF	: Yatay kemerlenme faktörü

d	: Paspayı
PL	: Prizma yükü
H	: Dolgu yüksekliği
w	: Zemin birim hacim ağırlığı
As	: Birim uzunluk için gerekli eğilme donatısı alanı
g	: $0.85bf_c$
b	: Birim genişlik
h	: Duvar kalınlığı
h_1, h_2	: Heger toprak basıncı katsayıları
f_c	: Beton malzeme dayanımı
f_y	: Donatı malzeme dayanımı
Φ	: Direnç faktörü
M_u	: Birim genişliğe etkiyen tasarım momenti
N_u	: Birim genişliğe etkiyen tasarım aksel kuvveti
HS	: Pekleşen zemin modeli
MC	: Mohr Coulomb zemin modeli
E_c	: Elastisite modülü
γ_c	: Beton malzeme yoğunluğu
E_{50}^{ref}	: Referans elastisite modülü
E_{oed}^{ref}	: Referans ödometre modülü
E_{ur}^{ref}	: Referans yükleme boşaltma modülü
m	: Üstel malzeme sabiti
c^{ref}	: Kohezyon
C_{mi}	: Moment hesabı için boru analiz katsayısı
C_{ni}	: Aksel kuvvet hesabı için boru analiz katsayısı
C_{vi}	: Kesme kuvveti hesabı için boru analiz katsayısı
W_i	: Boru üzerine gelecek yüklerin toplamı
D_m	: Boru ortalama çapı
ϕ_u	: İçsel sürtünme açısı
ν_{ur}	: Poisson oranı
p^{ref}	: Referans gerilme

R_f	: Göçme oranı
Bf_o	: Minimum yataklama katsayıları
Bf_e	: Yataklama katsayıları
Bf_v	: Ana yatak katsayıları
G	: Zemin grupları
M	: Eğilme Momenti
N	: Eksenel Kuvvet
V	: Kesme Kuvveti
T	: Standart kurulum tipleri
B_{dt}	: Hendek genişliği

Kaynaklar

- [1] Moser A.P, Folkman S, “*Buried Pipe Design*”, McGraw – Hill, 2008.
- [2] Watkins R.K, “*Structural Mechanics of Buried Pipes*”, 2000.
- [3] Mada, H., “*Numerical Modelling of Buried Pipes with Flowable Fill as a Backfill Material*”, MSc. Thesis, College of Engineering and Mineral Sources at West Virginia University, 2005.
- [4] Marston, A.”*The Theory of External Loads on Closed Conduits in the Light of the Latest Experiments*”, Paper presented at the Proceedings of the Highway Research Board 30, Washington, D.C, 1930.
- [5] Spangler, M.G, “*The Supporting Strength of Rigid Pipe Culverts*”, Bulletin 112, Iowa State College, 1933.
- [6] Erdogmus, E., Skourup, N.B, Tadros, M, “*Recommendations for Design of Reinforced Concrete Pipe*”, Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice, ASCE, 1,1, 25-32, 2010.
- [7] ASTM C76-11, “*Standard Specification for Reinforced Concrete Culvert, Storm Drain, and Sewer Pipe*”, ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA, 19428-2959 USA, 2011.
- [8] Heger, F.J, “*New Installation Design for Buried Concrete Pipe, Pipeline Infrastructure*”, Proceedings of the Conference Sponsored by the Pipeline Division of the American Society of Civil Engineers, 1988.
- [9] Heger, F.J., Liepins A.A., Selig, E.T, “*SPIDA: An Analysis and Design System for Buried Concrete Pipe. Advances in Underground Pipeline Engineering*”, Proceedings of the International Conference Sponsored by the Pipeline Division of the American Society of Civil Engineers, 1985.

- [10] ASCE 15-98, “ *Standard practice for direct design of buried precast concrete pipe using standard installation (SIDD)*”, 1993.
- [11] Kurdziel, J. M., McGrath, T.J., “*SPIDA method for reinforced concrete pipe design*”, J.Transport.Eng, 1991.
- [12] Zhao, J. Q., Daigle, L., “*SIDD pipe bedding and Ontario Provincial Standards. Institute for Research in Construction*”, National Research Council Canada, Ottawa, Canada, 2001.
- [13] Erdogmus, E., Tadros, M., “*Behavior and Design of Buried Concrete Pipes*”, Nebraska Department of Roads Research Reports, Paper 54, 2006.
- [14] Erdogmus, E., Tadros, M., “*Behavior and Design of Buried Concrete Pipes Phase II*”, Nebraska Department of Roads Research Reports, 75, 2009.
- [15] Allard, E., Naggar, E., “*Pressure Distribution around Rigid Culverts Considering Soil-Structure Interaction Effects*”, Int. J. Geomech., ASCE, 2016.
- [16] Beakley, J., DelloRusso, S., “*Indirect and Direct Design Methods for Design of Reinforced Concrete Pipe*”, Journal of the Transportation Research Board, Vol.2674 (9), 575-585, 2020.
- [17] ACPA, “*Concrete Pipe Design Manual*”, American Concrete Pipe Association, 2011.
- [18] Kılıç, H., Demirci, O., “*Tip 4 Kurulum ile Betonarme Boru Tasarımı*”, Teknik Dergi, 33(3), DOI:10.18400/tekderg.832738., 2022.

Türkiye’de Çıkan Endüstriyel Yan Ürünlerin Dolgu Özellikleri Üzerine Deneysel Bir İnceleme

Irem Zeynep YILDIRIM¹

ÖZ

Çelik cürufu ve uçucu kül sırasıyla çelik üretim tesislerinde ve termik santrallerde katı partiküller halinde ortaya çıkan endüstriyel yan ürünlerdir. Bu çalışmada dolgu uygulamalarında kullanılabilmesi için, uçucu kül ve ağırlıkça %20 uçucu kül içeren çelik cürufu-uçucu kül karışımının özellikleri incelenmiştir. Uçucu kül ve çelik cürufu, özgül ağırlık, elek, hidrometre ve Atterberg limitleri deneyleriyle karakterize edilmiştir. Kompaksiyon davranışı standart Proktor deneyleriyle belirlenen yan ürünlerin ve karışımın hidrolik iletkenlik katsayıları düşen seviyeli permeabilite deneyleriyle belirlenmiştir. Yan ürünlerin ve karışımın kayma dayanımı parametreleri %100 Standart Proktor sıkılığında hazırlanan numuneler üzerinde yapılan kesme kutusu deneylerinin sonuçlarına göre değerlendirilmiştir. pH ve elektrik iletkenliği ölçümleri ve sızıntı suyu analizleri yapılarak malzemelerin kullanımıyla oluşabilecek çevresel risklerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Kompaksiyon deneylerinde %80 çelik cürufu-%20 uçucu kül karışımı için elde edilen kuru birim hacim ağırlığı çelik cürufuna göre daha yüksek, karışma ait optimum su muhtevası çelik cürufuna göre daha düşüktür. Kesme kutusu deney sonuçlarına göre, deney-sonu sürtünme açısı (ϕ_{ds}), çelik cürufu ve uçucu kül için sırasıyla 40.1° ve 28.9°’dir. %80 çelik cürufu-%20 uçucu kül karışımının deney-sonu sürtünme açısı ise 37.8°’dir. Karışımın pik kayma dayanımı çelik cürufu için elde edilen değerlerin üst sınırı ile karşılaştırılabilir. pH ve elektrik iletkenliği ölçümleri, kullanılan yan ürünlerin korozif özellikler gösterebileceğine işaret etmektedir. Çelik cürufu ve uçucu kül numuneleri için yapılan sızma suyu analiz sonuçları çevre etkilerinin üretilen karışım için araştırılması gerektiğine işaret etmektedir.

Anahtar Kelimeler: BOF çelik cürufu, uçucu kül, kompaksiyon, permeabilite, kayma dayanımı, çevresel riskler.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu’na 27 Aralık 2020 günü ulaşmıştır. 20 Eylül 2021 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Ocak 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.847828>

¹ Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul
zyildirim@boun.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-1820-2607>

ABSTRACT

An Experimental Investigation on the Fill Properties of Industrial By-Products Generated in Turkey

Steel slag and fly ash are particulate industrial by-products generated in steel plants and power plants, respectively. In this study, the properties of steel slag, fly ash and a steel slag-fly ash mixture that contain 20% fly ash (by weight) were investigated for their possible use as fill material. Fly ash and steel slag were characterized through specific gravity, sieve, hydrometer and Atterberg limits experiments. Compaction behavior of the industrial by-products and their mixture were evaluated through standard Proctor compaction, and their hydraulic conductivity were determined through falling-head permeability experiments. The shear strength parameters of the industrial by-products and their mixtures, prepared at 100% Proctor compaction, were evaluated based on direct shear experiments. pH and electrical resistivity measurements were taken, and leachate analysis were performed on fly ash and steel slag samples to determine the possible environmental risks that can arise from their use. The maximum dry unit weight values recorded for the 80% steel slag - 20% fly ash mixture was higher, on the other hand, the optimum moisture content of the mixture was lower compared to that of steel slag sample. Based on direct shear experiments, the end-of-test friction angles are 40.1° and 28.9° for steel slag and fly ash, respectively. The end-of-test friction angle for the 80% steel slag-20% fly ash mixture is 37.8°. The peak shear strength of the mixture is close to that of steel slag and comparable to the higher end of the range obtained for natural sands that are used as fill material. The pH and electrical resistivity measurements indicate that these by-products may possess corrosive nature. The results of the leachate analysis point toward the need for further analysis of the mixture for the environmental effects.

Keywords: BOF steel slag, fly ash, compaction, permeability, shear strength, environmental risks.

1.GİRİŞ

Tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de nüfus artışı ve beraberinde gelen endüstrileşmenin bir sonucu olarak atık sorunu büyümekte, çevreye duyarlı ve sürdürülebilir bir sistem kurmak her geçen gün daha da önem kazanmaktadır. Gelişmiş ülkelerde çeşitli malzemelerin faydalı kullanım oranları Türkiye’ye kıyasla çok daha yüksektir. Bu oranın ülkemizde yükselmesi ancak endüstrinin ihtiyaçlarını karşılayan akademik çalışmalarla yerel malzemelerin daha iyi anlaşılması ve uygulama projelerinde kullanılması sonucu mühendislerin deneyim kazanmasıyla mümkün olabilir. Bu açıdan bakıldığında akademi ile endüstri arasında birbirini besleyen bütünleşik bir yapı kurulmasının önemi ortaya çıkmaktadır. Son yıllarda Avrupa Birliği’nin ve ülkemizin desteği ile geri dönüşüm konusu ile ilgili başlatılan çağrılı araştırma programları ve desteklenen araştırma projeleri umut vericidir.

Hızlı sanayileşme tüm endüstriyel yan ürünlerin faydalı kullanılması ihtiyacını doğurmuştur. Sıfır atık hedefinin gerçekleşmesi ancak yerel yan ürünlerin doğru karakterize edilmesi ile mümkündür. Bu aşamada bazen birden fazla yan ürünü birlikte kullanarak istenen mühendislik özelliklerine sahip karışımlar elde etmek daha uygun bir kullanım stratejisi olabilir. Türkiye’deki yüksek üretim rakamları nedeniyle, endüstriyel yan ürünler arasından

çelik cürufu ve uçucu kül, faydalı kullanılması gereken malzemeler arasında öne çıkmaktadır. Çelik cürufu, metal üretim tesislerinde, uçucu kül de termik santrallerde ortaya çıkan parçacıklardan oluşan yan ürünlerdir. Bu yan ürünlerin faydalı kullanılmayan fazlası, önce yığınlar halinde bekletilmekte, atık olarak kontrollü olarak düzenli depolama sahalarında gömülmekte ya da hiç tercih edilmeyen bir yöntemle çeşitli alanlarda kontrolsüz gömülmektedir. Bu vahşi depolama yöntemi nedeniyle oluşabilecek çevre problemlerinin ortadan kalkması ve doğal kaynaklarımız arasında olan zeminlerin ve kayaçların korunması için bu yan ürünlere inşaat malzemesi olarak değer kazandırmak ülkemizde önemli bir ihtiyaç haline gelmiştir [1-3].

Çelik cürufunun kullanılmasıyla ilgili çalışmaların çoğunluğu, çelik cürufunun asfalt agregası [4-7], beton agregası [8-12], çimento katkı malzemesi [14-19], ve klinker malzemesi [19-21] olarak değerlendirilmesine yöneliktir. Çelik cürufunun geoteknik özellikleri ile ilgili çalışmalar ise son beş yıl içinde hız kazanmıştır. Çelik cürufunun en temel iki geoteknik uygulama şekli: (i) zemin stabilizasyon malzemesi [22-24], ve (ii) yol dolgu malzemesi [25-27] olarak kullanılmasıdır. Temel amacın çok miktarda çelik cürufunun faydalı kullanılması olduğu düşünülürse, yol dolgu malzemesi uygulamaları yüksek hacimlerde çelik cürufunun değerlendirilmesi açısından stabilizasyon uygulamalarına kıyasla oldukça avantajlıdır. Çelik cürufunda bulunan kireç (CaO) ve periklas (MgO), suya erişimleri sağlandığında, şişmeye ve hacimsel dengesizliğe sebep olabilecek şekilde hidrasyon geçirirler. Özellikle bu bileşenlerin çelik cürufunda serbest halde bulunması durumunda, su varlığında şişme miktarları da göz ardı edilmesi zor düzeylere ulaşabilmekte bu da kullanımını kısıtlamaktadır [28-30].

Faydalı kullanım öncesinde seçilen yan ürünlerin kimyasal yapılarının, sızma suyuna metal salım özelliklerinin incelenmesi ve çevresel risklerin belirlenmesi gerekmektedir. Belirlenen riskler için uzun-sürelili çevresel etkilerin değerlendirilmesi ve potansiyel olumsuz etkileri azaltacak stratejiler belirlenmesi gerekir. Ancak uzun-sürelili çevresel etkilerin de değerlendirildiği bütünsel bir yaklaşımla bu yan ürünlerin faydalı kullanılması mümkün olabilir.

2. TÜRKİYE'DE ÇELİK CÜRUFU VE UÇUCU KÜL ÜRETİMİ

Yan ürünlerin faydalı kullanılması; üretim aşamasından itibaren doğru sınıflandırılmaları, işleme aşamalarının ve depolamanın takibi, depodan çıkan yan ürünlerin satış, bertaraf ve faydalı kullanım miktarlarının belirlenmesi ve son olarak kullanıldıkları uygulamaların sürekli takibi ile mümkün olabilir. Birçok ülkede olduğu gibi Türkiye'de de yan ürün takibinin getirdiği ek maliyetler ve geçmişten süregelen kontrolsüz yüksek bertaraf rakamları, özellikle de küçük işletmelerde yan ürün kontrol kültürünün gelişmesini yavaşlatmaktadır.

2.1. Çelik Cürufu

Çelik cürufu üretim metoduna bağlı olarak bazik oksijen ocağı (BOF) çelik cürufu, elektrik ark ocağı (EAF) çelik cürufu ve pota ocağı (LF) çelik cürufu olmak üzere üç ana kategoride sınıflandırılır [29]. 2017 senesindeki verilere göre, 37.5 milyon ton'luk (Mt'luk) çelik üretimiyle, çelik üreten ülkeler arasında Türkiye Dünya'da 8. sırada ve Avrupa'da da 2.

sırada yer almıştır. Çelik ihraç eden ülkeler arasında ise 15 Mt’lik çelik ihracatıyla 10. sırada yer almıştır [31]. Ekonomik dalgalanmalar nedeniyle 2019 yılının ilk sekiz (8) aylık döneminde yıllık ham çelik üretimi %10 düşse de Türkiye 2018 yılı verilerine göre ham çelik üretimi miktarları sıralamasında ilk on (10) ülke arasındadır [32,33].

Türkiye Çelik Üreticileri Derneği (TÇÜD) tarafından yayımlanan bilgilere göre Türkiye’de yaklaşık 30 tane çelik üretim tesisi faaliyet göstermekte ve bu tesisler Marmara, Karadeniz, İzmir ve İskenderun olmak üzere dört bölgede yoğunlaşmaktadır. Bu tesislerden sadece üç (3) tanesi bütünleşmiş demir çelik (BOF) tesisiyken, geri kalan 24 tanesi elektrik ark ocaklı (EAF) ve üç (3) tanesi de indüksiyon ocaklıdır. EAF tipi üretim tesislerinin sayısı BOF tipi üretim tesislerinden daha yüksek olsa da, EAF tipi ocakların görece düşük üretim kapasitesi nedeniyle Türkiye’de üretilen çelik miktarının yaklaşık 1/3’ü bütünleşmiş demir-çelik tesislerden gelmektedir [34,35]. Çelik üretimi sırasında üretim operasyonunun verimliliğine ve girilen malzeme özelliklerine göre, genellikle çelik üretiminin yaklaşık %10-20’si kadar çelik cürufu da yan ürün olarak çıkmaktadır.

Türkiye’de son yıllarda çelik cürufu kullanımı ile ilgili Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM)’nün ve yerel çelik üreticilerinin de desteğiyle sürdürülen ARGE çalışmalarının sonuçlarına göre, cüruf deneme yollarında kullanılmış ve deneme yollarındaki performans ölçüm sonuçlarına dayalı olarak çelik cürufunun agrega olarak kullanımına ilişkin bir mevzuat önerisi hazırlanmıştır. Tüm çabalara rağmen çelik cürufunun kullanımı ülkemizde henüz istenilen düzeyde değildir. TÇÜD’nin raporunda çeşitli illerde çelik cürufu çıktısı ve geri kazanılan miktarlar yayımlanmıştır. Yayımlanan raporlardan elde edilen veriler, Türkiye’de üretilen çelik cürufunun yaklaşık olarak %60’ının faydalı kullanılmadığına ve atık kategorisinde bertaraf edildiğine işaret etmektedir [33].

Öcal (2018), Türkiye’deki demir çelik sektörüne ait tüm atıkları ve atık yönetimini değerlendirdiği uzmanlık tezinde, yarısından fazlası faydalı kullanılmayan çelik cürufunun değer kazanmasının önemini ve bu konuda yapılacak çalışmaların gerekliliğini vurgulamıştır [36].

2.2. Uçucu Kül

Termik santrallerde ortaya çıkan en önemli yan ürün olan uçucu kül, baca gazlarıyla çıkan ve filtreler yardımıyla toplanan katı kül tanecikleridir. Ülkemizdeki toplam elektrik üretiminin yaklaşık %37’sine karşılık gelen önemli bir pay, kömürle çalışan çok sayıda termik santrale aittir [37].

Uçucu küller Amerikan Malzeme Test Standartları (ASTM) C 618’deki kimyasal bileşen sınırlamalarına göre F sınıfı ve C sınıfı olmak üzere iki temel sınıfa ayrılmaktadır. Her iki sınıflandırma için de uçucu külün kimyasal bileşiminde SiO₂ (Silika), Al₂O₃ (Alümina), ve Fe₂O₃ (Demir oksit) bileşenlerinin toplamının %50’nin üzerinde olması gerekirken, yenilenen ASTM standardına göre bir uçucu külün C sınıfı olabilmesi için CaO bileşeninin %18’in üzerinde olması gerekir. Bu nedenle, C sınıfı uçucu küller puzzolan özelliklerinin yanı sıra genellikle su varlığında kendiliğinden bağlayıcı özelliğe de sahiptir [38]. C sınıfı küller çimento katkı maddesi olarak ve zemin stabilizasyonunda F sınıfı küllere kıyasla daha yaygın kullanılmaktadır. Türkiye’deki termik santrallerde çoğunlukla linyit, buna ek olarak taş kömürü ve ithal kömür de yakıt olarak kullanılmaktadır. Başlıca termik santrallerden elde

edilen uçucu kül örneklerinin kimyasal analiz sonuçları bu santrallerin yaklaşık yarısında C tipi ve kalanında F tipi uçucu kül üretildiğine işaret etmektedir [39,40]. Ancak bu analiz ve değerlendirmelerin çoğu, ASTM C 618'in 2019 revizyonundan önceki (C sınıfı kül için minimum % 19 CaO bileşeni şartı olmayan) versiyonu ile yapıldığı için daha önce C sınıflandırılması yapılan birçok uçucu kül sınıflandırmasının yeni standarda göre değişeceği öngörülebilir.

2016 verilerine göre, Türkiye'deki kurulu gücü 100 megawatt (MW) ve üzeri olan tüm faal termik santrallerde yaklaşık olarak 19.5 Mt toplam atık ortaya çıkmıştır. Bu 19,5 Mt %87.8'ini kül ve diğer katı atıklar oluşturmaktadır. Bu atık miktarının sadece 12 bin tonu tehlikeli atık, geri kalanı tehlikeli olmayan katı atık kategorisinde olmasına rağmen, atığın büyük bir kısmı: %83.3'ü kül dağı ve kül barajı olarak kaydedilmiş veya düzenli depolama tesislerinde bertaraf edilmiştir. Verilere göre uçucu kül üretiminin %16.7'si ise atık geri kazanım tesislerine ve kullanım için maden/taş ocaklarına gönderilmiştir [41]. 2020 yılına ait uçucu kül çıktısının 25 Mt civarında olacağı tahmin edilmektedir. Uçucu külün faydalı kullanılması ülkemiz açısından ekonomik ve çevresel bir ihtiyaçtır [42].

3. ÇALIŞMANIN MOTİVASYONU VE KARIŞIMIN BELİRLENMESİ

Ülkemizde ve tüm dünyada sıfır atık hedefine ulaşılması tüm çelik cürufu çeşitlerinin faydalı kullanılabilmesi ile mümkün olabilir. Son yıllarda sürdürülen araştırmaların çoğu EAF çelik cürufunun kullanılmasına yoğunlaşsa da BOF çelik cürufu çıktısı ülkemizdeki toplam çelik cürufu çıktısının hala önemli bir bölümünü oluşturmaktadır [34]. BOF çelik cürufunun geri kazanımıyla ilgili yapılan uluslararası çalışmalar arasında malzemenin demiryolu balastı olarak kullanılması ve açık gradasyonlu agrega olarak asfalt karışımlarında kullanımı da vardır [43,44]. BOF çelik cürufunun faydalı kullanımını kısıtlayan en önemli özelliği su varlığında hacimsel genleşme olduğu için yürütülen araştırmaların çoğu malzemenin genellikle çakıl boyutundaki kısmının kullanılmasına yöneliktir ve kum boyutundaki malzemenin dolgu olarak kullanılması ile ilgili yapılan çalışmalar oldukça sınırlıdır [30]. Bunun sebepleri malzemenin özelliklerinin anlaşılmasında ve şişme potansiyeli, kirletici salımı ve alkalinite gibi çevresel etkilerin nasıl azaltılacağına tam olarak bilinmemesidir.

Bu konudaki önemli çalışmalardan biri Dayıoğlu (2016) tarafından yapılmıştır. Dayıoğlu'nun elde ettiği sonuçlar ince danelerden oluşan alimuna bazlı su arıtma kalıntısı ile kaplanan (işlem gören) BOF tipi çelik cürufunun şişme miktarlarının, malzemenin temel ve alt temel yol dolgu malzemesi olarak kullanılabilir düzeylere indiğini gösterirken, malzemenin pH yükselten özelliğinin çalışılması gerekliliğine de işaret etmektedir [45]. Dayıoğlu ve diğ. (2018) yaptıkları deneysel çalışma sonucunda alumina kaynağı yüksek bir atık malzemesi kullanılarak BOF tipi çelik cürufunun alkalinitesinin azaltılabileceğini ve yaptıkları model çalışması sonucunda da sızıntı suyu tampon görevi gören bir dolgu zemininden geçtikten sonra sızıntı suyuna salınan metal değerlerinin, EPA içme suyu limitlerinin altına düşüğünü göstermiştir.

Çelik cürufunun şişmesini azaltmak için kullanılabilir bir başka yöntem de, çelik cürufunu başka malzemelerle karıştırarak yeni geo-malzeme üretmektir [47,48]. Literatürdeki çalışmalarda çelik cürufu karışımlarında kullanılabilir malzemeler içinde uçucu kül öne çıkmaktadır [49-50]. Yıldırım ve Prezzi (2015), uzun süreli şişme deney sonuçlarına dayanarak sıkıştırılmış BOF çelik cürufu - %10 uçucu kül karışımı örneklerine ait genleşme

yüzdelerinin sıkıştırılmış sade çelik cürufu ile kıyaslandığında çok daha düşük seviyelerde olduğunu göstermiştir [30].

Türkiye’de çok miktarda çıkan ve faydalı kullanılamayan BOF çelik cürufunun faydalı kullanılabilmesi için öncelikle su varlığında hacimsel genişleme miktarının mühendislik açısından önemsiz seviyelerde kalmasını sağlayacak karışımlar üretilmesi hedeflenmiştir. Bu konuda 2017’den beri sürdürülen araştırma projesinin ilk aşamasında ASTM D1883’e uygun olarak serbest şişme deneyleri yapılmıştır [51,52]. %100 Standart Proktor sıklığında hazırlanan çelik cürufu (ÇÇ) ve %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül karışımı (ÇÇ80UK20) için elde edilen uzun süreli serbest şişme sonuçları Tablo 1’de özetlenmektedir.

Tablo 1 - Uzun-süreli serbest şişme deneylerinde ölçülen hacimsel deformasyonlar

Deney Süresi	Hacimsel Deformasyonlar (%)					
	30.gün	60.gün	90.gün	120.gün	150.gün	180.gün
ÇÇ	1.009	1.803	2.308	2.912	3.379	3.605
ÇÇ80UK20	0.122	0.500	0.690	0.701	0.727	0.734

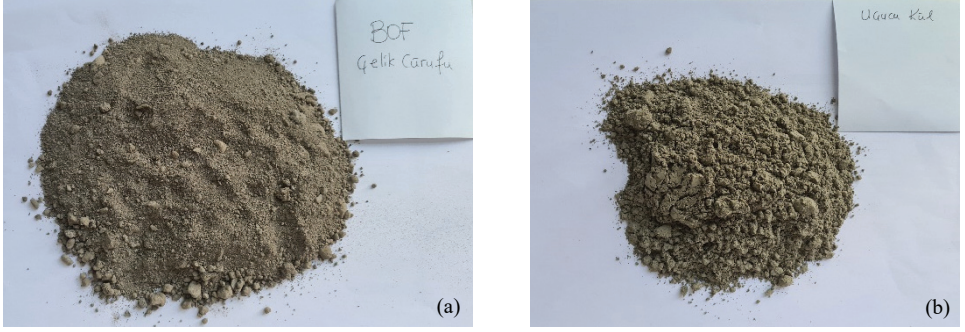
Notlar:

(1) Çelik cürufu (2) %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül karışımı

Tablo 1 verilerine göre, çelik cürufunun - ağırlıkça %20’si kadar - uçucu kül ile yer değiştirilerek hazırlanan karışımın düşey deformasyonu altı (6) ayın sonunda (%1’nin altında) mühendislik açısından kabul edilebilir seviyelerdedir. Karışımların hacimsel genişleme değerlerinin kabul edilebilir düzeye inmesi, üretilen karışımların kullanılabilmesi için yeterli değildir. Karışımların dolgu malzemesi olarak kullanılabilirliğinin belirlenmesi için öncelikle malzemeye ait tüm geomekanik özelliklerin ve çevresel risklerin laboratuvar çalışmalarıyla belirlenmesi gerekir. Uzun-süreli çevresel etkilerin de model, saha ve laboratuvar çalışmalarıyla değerlendirilmesi gerekir. Bu çalışmanın odağı, çelik cürufu, uçucu kül ve %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül karışımının dolgu uygulamaları için geomekanik özelliklerini karşılaştırarak irdelemek ve çelik cürufu ve uçucu kül kullanımıyla oluşabilecek çevresel riskleri belirlemektir. Uzun-süreli çevresel etkileri değerlendirmek bu çalışmanın kapsamı dışındadır.

4. KULLANILAN YAN ÜRÜNLER

Bu çalışmada iki yan ürün: (i) BOF ile üretim yapan bütünleşmiş bir demir çelik tesisinden elde edilen çelik cürufu ve (ii) Trakya Bölgesi’nde faaliyet gösteren bir termik santralden elde edilen uçucu kül kullanılmıştır. Projenin başlangıç aşamasında varillerle laboratuvara yollanan çelik cürufundan bütünü temsil eden dane çapı dağılımına sahip örnekler elde edebilmek için ASTM C 702’ye uygun olarak, dört (4) parçaya bölme tekniği uygulanmıştır. Bütünü temsil eden dane çapı dağılımına sahip yan ürün örnekleri Şekil 1a ve 1b’de görülmektedir [53]. Kullanılan çelik cürufu ve uçucu külün kimyasal bileşimi Tablo 2’de görülmektedir. ASTM C618’e göre, kullanılan uçucu kül F sınıfıdır.



Şekil 1 - Kullanılan yan ürünler: (a) Çelik cürufu (ÇÇ), (b) Uçucu kül (UK)

Tablo 2 - Yan ürünlerin kimyasal bileşenleri

Bileşenler	ÇÇ ⁽¹⁾	UK ⁽²⁾
SiO ₂ (%)	9.92	63.18
Al ₂ O ₃ (%)	2.14	18.69
Fe ₂ O ₃ (%)	24.84	8.53
CaO (%)	55.2	3.27
MgO (%)	1.52	2.65
SO ₃ (%)	0.64	0.18
MnO(%)	2.15	-
P ₂ O ₅ (%)	1.46	-
V ₂ O ₅ (%)	1.07	-
Na ₂ O (%)	-	1.46
K ₂ O (%)	-	1.67

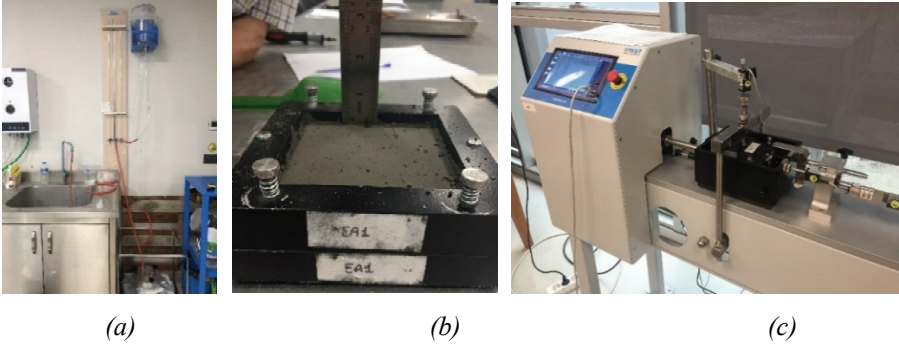
Notlar: ⁽¹⁾ Çelik cürufu ⁽²⁾ Uçucu kül

Deneylerde kullanılan çelik cürufu örneklerinin özdeş dane dağılımlarına sahip olmasını sağlamak için, bütünü temsil eden dane çapı dağılımı belirlenmiş ve malzeme çeşitli elek aralıklarında kalan danelere (0-0.425mm, 0.425-0.85 mm, 0.85-2mm, 2-4.75 mm, 4.75-9.5mm) ayrılmıştır. Standart dane çapı dağılımı için belirlenen ağırlık yüzdelere karşılık gelen dane aralıklarından malzemeler karıştırılarak özdeş örnekler hazırlanmıştır.

Bu çalışmada (i) BOF çelik cürufu (ÇÇ), (ii) Uçucu kül (UK) ve (iii) BOF çelik cürufu- uçucu kül karışımı (ÇÇ80UK20) incelenmiştir. Karışım ağırlıkça %80 çelik cürufu, %20 uçucu kül içerecek şekilde hazırlanmıştır.

5. DENEY YÖNTEMLERİ

BOF çelik cürufu ve uçucu kül örneklerinin dane çapı dağılımları elek ve sedimentasyon analizleri yapılarak ASTM D422-63’e, özgül ağırlıkları ise ASTM D854-10’a uygun olarak belirlenmiştir [54, 55]. Çelik cürufu ve çelik cürufu-uçucu kül karışımı 150 mm çapında ve uçucu kül ise 100 mm çapında kalıplarda Standart Proktor enerjisiyle sıkıştırılarak, malzemelerin su muhtevası-kuru birim ağırlık ($w - \gamma_d$) ilişkileri ASTM D698-00’a uygun şekilde belirlenmiştir [56]. Geçirimsizlik deneyleri için, kaba daneli zeminlerin de Standart Proktor sıkılığında hazırlanabilmesini sağlayan 150 mm çapında 116 mm yüksekliğinde ve su çıkışı ölçümünü kolaylaştıran bir çıkış ağızlığına sahip özel yapım bir kalıp kullanılmıştır (bkz. Şekil 2a). Proktor sıkılığında hazırlanan örneklerden dane çapı dağılımlarına bağlı olarak en az 72 ile 168 saat süreyle su geçirilerek doygun olmaları sağlandıktan sonra, düşen seviyeli permeabilite deney metodu kullanılarak hidrolik iletkenlik katsayıları belirlenmiştir. [57]. %100 Proktor sıkılığında örnekler hazırlamak için gerekli malzeme miktarı kesme deneyinde kullanılan kutu hacmine göre belirlendikten sonra, optimum su muhtevasında (w_{opt}) hazırlanan uçucu kül, çelik cürufu, ve karışım kutu içinde tabakalar halinde sıkıştırılmıştır. Sıkıştırılma işlemi bir tokmak yardımıyla yapılırken, homojenliği sağlamak için her tabaka için yükseklik ölçümleri yapılmıştır (bkz. Şekil 2b).



Şekil 2 - Permeabilite ve kayma dayanımı deneyleri: (a) Hidrolik iletkenlik, (b) Direk kesme kutusunda numune hazırlanması, (c) Direk kesme deney cihazı

Tüm örnekler 100 × 100 × 30 mm’lik kare kutuda hazırlanmıştır. Deney sırasında düşey ve yatay deplasmanlar sırasıyla $\pm 10 \text{ mm} \times 0.001 \text{ mm}$ ’lik ve $\pm 25 \text{ mm}/0.001 \text{ mm}$ ’lik potansiyometrik deplasman sensörleri (LVDT) kullanılarak, yük ise 5 kN’luk bir yük hücresiyle ölçülmüştür (bkz. Şekil 2c). Hazırlanan örnekler hedeflenen normal gerilmeler altında 0.125 mm/dakika hızında kesilmiştir [58]. Deney sonunda yan ürünlerin kalıcı (kritik-durum) içsel sürtünme açılarını yaklaşılabilmek için, kesme kutusu deney aletinin fiziksel limitleri içindeki maksimum yatay deplasman seviyesine (22-23 mm’ye) ulaşmak için sistemde modifikasyonlar yapılmıştır.

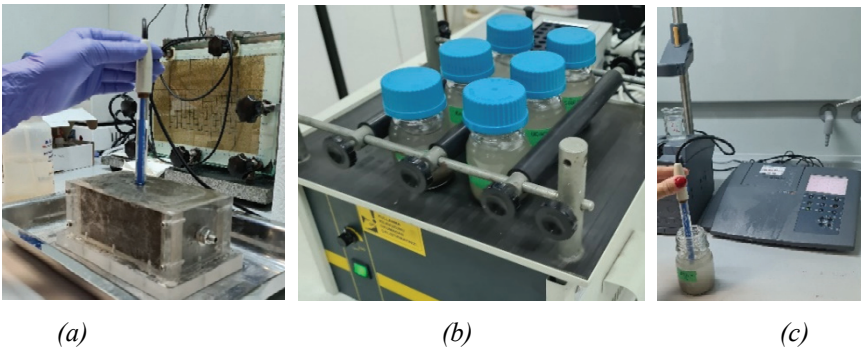
Bu yan ürünlerin kullanılmasının çevresel risk taşıyıp taşımadığının belirlenebilmesi için pH ve elektrik iletkenliği ölçümleri yapılmıştır. Elektrik rezistansı ASTM G187 – 18’e uygun olarak iki pimli yöntem kullanılarak ölçülmüştür [59]. Bu ölçümü yapabilmek için iki başında iletken elektrotlar olan 60 × 60 × 12 mm’lik pleksiglass bir kutu üretilmiştir. Tüm örnekler Şekil 3a’da görüldüğü gibi %100 Proktor sıkılığında ve optimum su muhtevasında bu

elektrotlu kutuda sıkıştırılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin elektrik iletkenliği, iki iletken elektrot arasında farklı frekanslarda akım uygulayabilen ve aradaki voltaj farkını belirleyebilen bir cihaz ile ölçülmüştür (bkz. Şekil 3b). Hazırlanan numuneler en az 18 saat suya doyurularak bekletildikten sonra elektrik iletkenliği ölçümleri tekrarlanmıştır. pH ölçümleri sıkıştırılan ve suya doyurulan numuneler içine minimum üç noktada, Şekil 4a'da görüldüğü gibi elektronik pH probu daldırılarak alınmıştır. Çelik cürufu, uçucu kül ve %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül karışımı için 10g malzeme/100mL arıtılmış su oranı kullanılarak ikişer eluat hazırlanmıştır. Hazırlanan eluat örnekler cam kavanozlar içinde Şekil 4b'de görüldüğü gibi 24 saat çalkalandıktan sonra Şekil 4c'deki gibi pH probu kavanoza daldırılarak ölçümler tekrarlanmıştır [60].



Şekil 3 - Elektrik iletkenliği deneyi: (a) Numune hazırlanışı, (b) Elektrik rezistansı ölçümü

Olası ağır metal salımlarını belirlemek için sızıntı suyu analizleri yapılmıştır. Çelik cürufu ve uçucu kül numunesi eluatu TS EN 12457-4 [61] standardına uygun olarak analizler için hazırlanmıştır. Eluat analizleri, çeşitli ağır metal parametreleri için EPA 6020 B(ICP-MS) [62], TS EN ISO 17852[63], ve TS 9546 EN 12880 [64], yöntemleri kullanılarak tamamlanmıştır.



Şekil 4 - pH deneyleri: a) Sıkıştırılmış ve doyurulmuş örneklerde pH ölçümü, (b) Eluat hazırlanması, (c) Eluat örneklerde pH ölçümü

6. YAN ÜRÜNLERİN DOLGU ÖZELLİKLERİ

6.1. İndeks Özellikleri

Çelik cürufu çelik üretim tesislerinde pit alanlarında sıcak/ergimiş halde dökülür ve soğuma sırasında değişik dane boyutlarına parçalanır. Daha sonra agrega tesislerindeki sistemlere benzer şekilde kırma ve boyutlandırma işlemlerinden geçirilir, metal ayrışması sonucunda işlenerek kalan kısım çelik cürufu olarak adlandırılır. Çelik cürufu içeriğindeki demir ve manganez içeriği nedeniyle ağırlıklı olarak silikat mineralleri içeren doğal kumlara göre daha ağırdır. Uçucu kül ise termik santral bacalarından uçarken toplanan, çok daha ince –genellikle silt boyutunda- hafif, uçucu danelerden oluşmaktadır. Uçucu kül, içeriğinde ağırlıklı olarak silikat mineralleri içermesi ve boşluklu yapısı nedeniyle genellikle silika kumlarından daha hafif yapıya sahiptir. Bu çalışmada kullanılan çelik cürufu ve uçucu kül örneklerinin özgül ağırlık değerleri Tablo 3’te verilmiştir.

Tablo 3 - Yan ürünlerin özgül ağırlıkları

Yan Ürün	ÇÇ ⁽¹⁾	UK ⁽²⁾	ÇÇ80UK20 ⁽³⁾
G _s ⁽⁴⁾	3.349	2.309	3.14

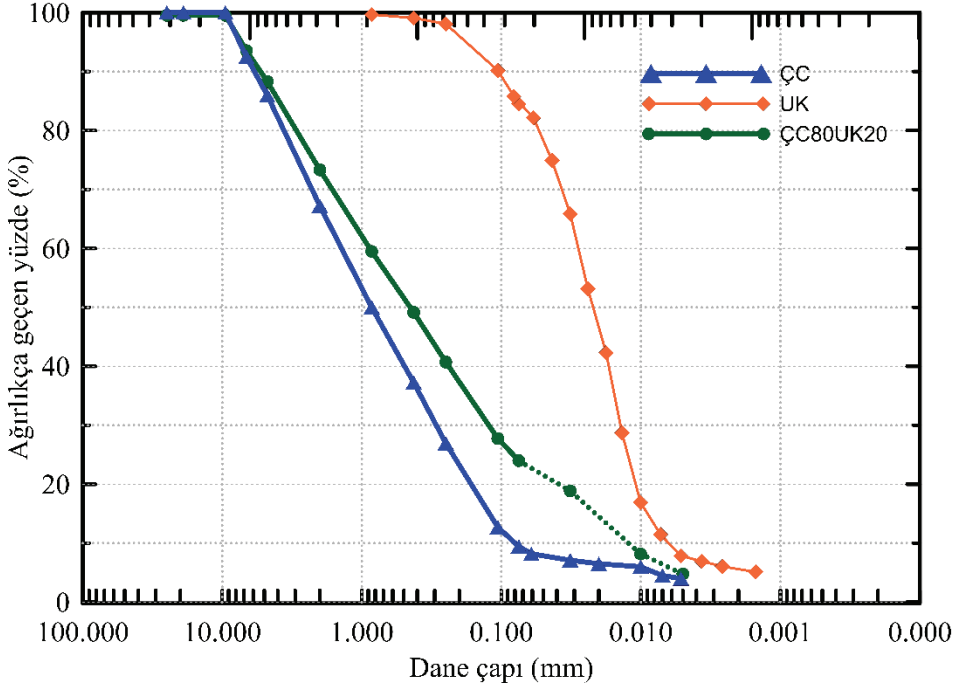
Notlar:

(¹) Çelik cürufu (²) Uçucu kül (³)%80 çelik cürufu - %20 uçucu kül karışımı (⁴) Özgül ağırlık deneyleri ASTM D854-06’ya göre yapılmıştır.

Genellikle çelik üretiminin verimliliği yükseldikçe, çelik olarak alınamayan ve cüruf içinde kalan demir oksit miktarları da yükselmektedir. Bu çalışmada kullanılan çelik cürufunun özgül ağırlık değerleri bu ayrıştırılamayan demir oksit nedeniyle literatürde sunulanlardan biraz daha yüksektir [30]. Uçucu külün özgül ağırlığı ise benzer küller için belirlenen değerlere yakındır [40] ve doğal zeminlere göre daha hafiftir. Karışımın özgül ağırlığı ise yaklaşık olarak 3.14’tür.

Bu çalışmada kullanılan çelik cürufu, faydalı kullanımı görece daha zor olan 9.5 mm’lik elekten geçen danelerden oluşmaktadır. Şekil 5’te çelik cürufu, uçucu kül, %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül karışımına ait dane çapı dağılımları sunulmuştur. Yan ürünlerin ve karışımın dane çapı dağılımı özellikleri Tablo 4’te özetlenmektedir.

Çelik cürufunun Amerikan Karayolları (AASHTO) sınıflandırması A-1b olduğu için, dane çapı dağılımı açısından, yol dolgu malzemesi olarak kullanılmaya uygun bir yan üründür. Buna kıyasla uçucu kül, ağırlıklı olarak silt boyutundadır, (AASHTO) ve ASTM standartları kullanılarak sırasıyla A-4 ve ML olarak sınıflandırılabilir. Çelik cürufunun ortalama dane çapı (D₅₀ değeri) 0.86 mm iken, %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül karışımı için bu değer 0.45 mm’dir. Çelik cürufu ve %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül içeren karışım ise Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemi’ne (USCS) göre sırasıyla SP-SM ve SM olarak sınıflandırılabilir.



Şekil 5 - Çelik cürufu, uçucu kül, %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül karışımının dane çapı dağılımları

Tablo 4 - Dane çapı dağılım özellikleri ve zemin sınıflandırması

Yan Ürün	ÇC ⁽¹⁾	UK ⁽²⁾	ÇC80UK20 ⁽³⁾
Atterberg Limitleri	NP ⁽⁴⁾	NP ⁽⁴⁾	NP ⁽⁴⁾
< No.10 (Geçen %)	67	100	73
< No.40 (Geçen %)	37	99	49
D ₆₀ (mm)	1.4	0.028	0.86
D ₅₀ (mm)	0.85	0.022	0.45
D ₃₀ (mm)	0.3	0.013	0.12
D ₁₀ (mm)	0.077	0.006	0.012 ⁽⁵⁾
Üniformluk Katsayısı (C _u)	18	-	72
Derecelenme Katsayısı (C _c)	0.8	-	1.4
USCS	SP-SM	ML	SM
AASHTO	A-1b	A-4	A-1b

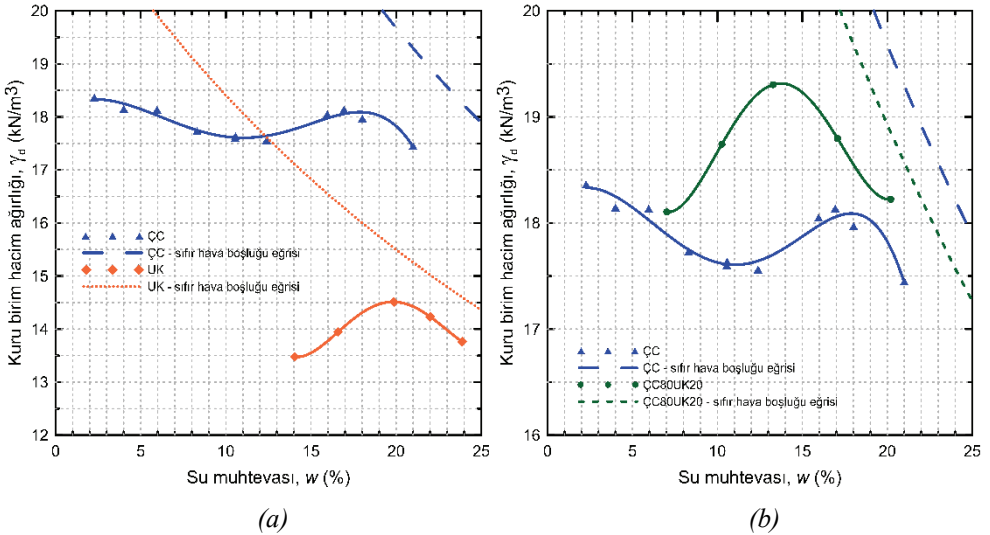
Notlar:

⁽¹⁾ Çelik cürufu ⁽²⁾ Uçucu kül ⁽³⁾ %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül karışımı ⁽⁴⁾ NP= Non-plastik

⁽⁵⁾ Karışıma ait ortalama dane çapı dağılımından elde edilmiştir.

6.2. Kompaksiyon Davranışı

Standart Proktor kompaksiyon deneyi sonuçlarına göre, çelik cürufu ve uçucu kül örneklerine ait su muhtevası – kuru birim hacim ağırlık ilişkileri ($w - \gamma_d$) Şekil 6a’da görülmektedir. Şekil 6b’de ise çelik cürufu- uçucu kül karışımına ait Standart Proktor eğrisi, çelik cürufu için elde edilen eğriyle beraber sunulmaktadır. Şekil 6a’da görüldüğü gibi çelik cürufunun $w - \gamma_d$ ilişkisi, tamamıyla kuru ve tamamıyla doygun su muhtevalarında maksimum ağırlık değerlerine yaklaşan, iki pikli bir yapı göstermektedir. Çelik cürufunun kompaksiyon eğrisinde gözlenen bu iki pikli yapı çelik cürufu ile ilgili daha önce yapılan çalışmalarda elde edilen eğrilerle uyumludur [30]. Çelik cürufu gibi yan ürünlerin, kuru ya da kuruya çok yakın su muhtevastaki kompaksiyonu sahada önemli derecede toz kalkışına sebep olarak çevresel sorunlar yaratmaktadır. Bununla beraber çok düşük su muhtevalarında sıkıştırılan zeminlerde su emmeye olan eğilim yükseldiği için, kuruya yakın değerler w_{opt} seçimi için uygun değildir. Bunun tersi olan durum, ise malzemeden su çıkışının gözlemlendiği yüksek su muhtevası değerleridir. Laboratuvar deneyleri sırasında su muhtevasının %17’nin üzerindeki değerlerinde çelik cürufu örneklerinden su çıkışı gözlenmiştir. Bu veriler değerlendirildiğinde çelik cürufuna ait kompaksiyon eğrisi için w_{opt} %17 olarak belirlenmiştir. Çelik cürufu oldukça yüksek γ_d değerleriyle ağır bir dolgu malzemesidir.



Şekil 6 - Kompaksiyon eğrileri: (a) ÇÇ ve UK (b) ÇÇ ve ÇÇ80UK20 karışımı

Uçucu kül doğal zeminlere göre daha düşük bir özgül ağırlığa sahip olduğu için, Şekil 6a’da görüldüğü gibi uçucu külün γ_d değerleri, çelik cürufuna göre çok daha düşüktür. Ağırlıklı olarak silt boyutunda olan uçucu kül maksimum kuru birim hacim ağırlığına yaklaşık %20 su muhtevasında ulaşmaktadır. Uçucu kül 13.5-14.5 kN/m³ aralığında değişen γ_d değerleri nedeniyle hafif bir dolgu malzemesi olarak değerlendirilebilir. Kompaksiyon deneylerinden elde edilen değerler Tablo 5’te özetlenmektedir.

Şekil 6b'de görüldüğü gibi uçucu kül daha hafif bir dolgu malzemesi olsa da %80 çelik cürufu - % 20 uçucu kül karışımı deney yapılan su muhtevası aralığında çelik cürufundan daha yüksek kuru birim hacim ağırlıklara ulaşmaktadır. Bunun sebebi sıkıştırılma esnasında uçucu kül danelerinin çelik cürufu içindeki boşlukları doldurması ve karışımda daha kompakt/dolu bir dane-boşluk matrisi oluşmasıdır. İnce danenin artmasıyla beraber, karışımın w_{opt} değeri ise %3 düşmüştür. Karışımın kompaksiyon eğrisi incelendiğinde, uçucu külle yer değiştirme etkisiyle beraber çelik cürufuna ait eğrinin sola ve yukarı ötelendiği görülmektedir.

Tablo 5 - Standart Proktor kompaksiyon deneyi sonuçları

Yan Ürün	ÇC ⁽¹⁾	UK ⁽²⁾	ÇC80UK20 ⁽³⁾
$\gamma_{d,max}$ (kN/m ³) ⁽⁴⁾	18.1	14.5	19.3
w_{opt} (%) ⁽⁴⁾	17	20	14

Notlar:

(1) Çelik cürufu (2) Uçucu kül (3) %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül karışımı (4) w_{opt} = optimum su muhtevası, $\gamma_{d,max}$ = maksimum kuru birim hacim ağırlığı (4) Standart Proktor kompaksiyon deneyleri ASTM D698-00a'ya uygun olarak yapılmıştır.

6.3. Hidrolik İletkenlik

Doğal kum ve kum gibi özellik gösteren malzemelerin su geçirimsizliği, dane çapı dağılımı özelliklerinin yanı sıra numunenin sıkıştırılma miktarına ve danelerin şekil özelliklerine de bağlı olarak geniş bir aralık göstermektedir. Tablo 6'da yan ürünler ve karışım için laboratuvar elde edilen hidrolik iletkenlik katsayıları özetlenmektedir.

Tablo 6 - Yan ürünlerin laboratuvar permeabilite deneylerine göre hidrolik iletkenlik katsayıları

Yan Ürün	ÇC ⁽¹⁾	UK ⁽²⁾	ÇC80UK20 ⁽³⁾
k ⁽⁴⁾ (m/s)	$\sim 7.76 \times 10^{-8}$	$10^{-9} < k < 10^{-8}$	$\sim 2.17 \times 10^{-8}$

Notlar:

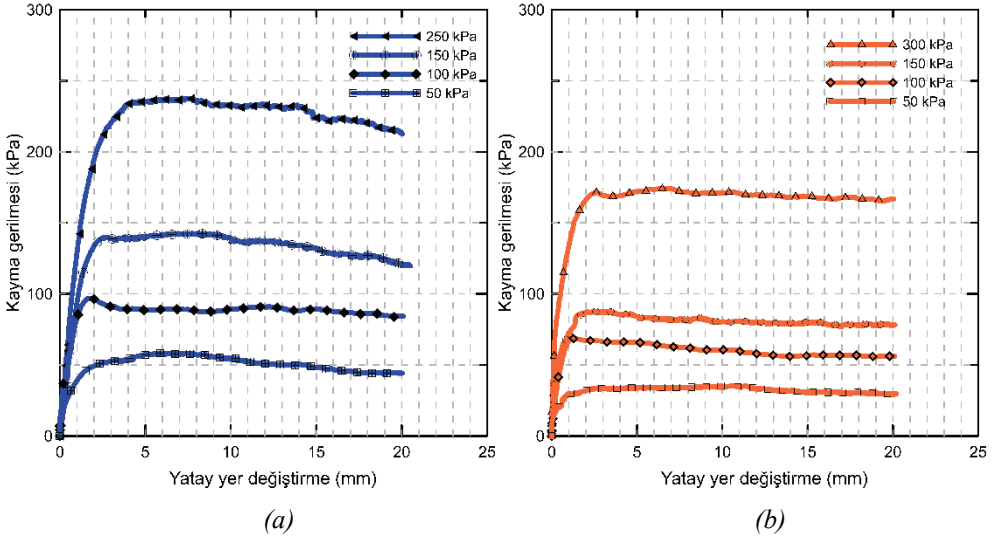
(1) Çelik cürufu (2) Uçucu kül (3) %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül karışımı (4) Hidrolik iletkenlik katsayısı (5) Permeabilite deneyleri ASTM D5856-15e uygun olarak %100 Proktor sıklığında hazırlanmış örnekler üzerinde düşen seviyeli permeabilite yöntemi uygulanarak çok tekrarlı ölçümler alınarak tamamlanmıştır. (6) Uçucu kül için elde edilen ölçümlerin hassasiyeti düşük olduğu için hidrolik iletkenlik aralık olarak verilmiştir.

Bu çalışmada kullanılan çelik cürufu için elde edilen hidrolik iletkenlik katsayısı, temiz kum ve kum-çakıl karışımlarına göre daha düşük, daha çok ince kumlar ve silt-kum karışımlarına yakındır. Bunun sebebi, çelik cürufunun D_{50} değeri 0.85 olsa da, ağırlıkça %30'a yakın kısmının ince kum ve siltten oluşması ve bu ince malzemenin geçirimsizlik davranışında

baskın olmasıdır. Bununla beraber, numuneler kompaksiyon sonrası doygunluğa ulaşırken çelik cürufunun kimyasal bileşiminde bulunan serbest kirecin daneler arasında az da olsa bir miktar çimentolaşmaya (bağlayıcılığa) sebep olması da bu sonucu doğurmuş olabilir. %80 çelik cürufu-%20 uçucu kül karışımında silt boyutu arttığı için karışım için elde edilen hidrolik iletkenlik değeri, beklendiği gibi çelik cürufuna kıyasla daha düşüktür.

6.4. Kayma Dayanımı

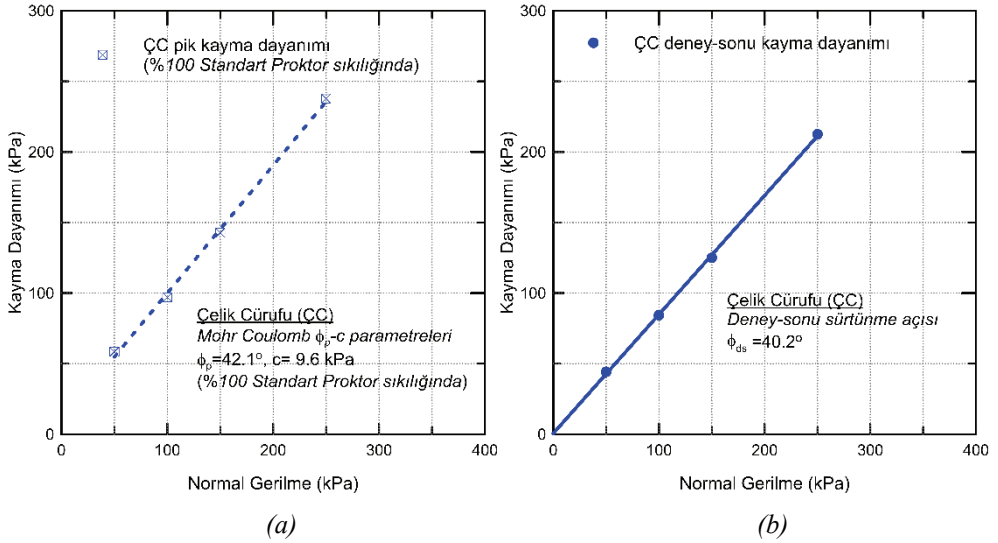
Sırasıyla yaklaşık olarak %17 ve %14 su muhtevasında ve $\gamma_{d,max}$ değerlerinde hazırlanan çelik cürufu ve uçucu kül örnekleri 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa ve 300 kPa normal gerilmeleri altında kesme kutusunda kesilmiştir. Çelik cürufu ve uçucu külle ait yatay yer değiştirme – kayma gerilmesi grafikleri Şekil 7a ve Şekil 7b’de görülmektedir. Genel olarak çelik cürufu örneklerine ait yatay yer değiştirme – kayma gerilmesi eğrileri yarı- belirgin bir pik değere ulaşıttıktan sonra biraz düşerek yaklaşık düz bir plato yapmıştır. Uçucu kül örneklerinde ise belirgin bir pik davranışı gözlenmemiştir.



Şekil 7 - Yatay yer değiştirme - kayma gerilmesi: (a) ÇÇ, (b) UK

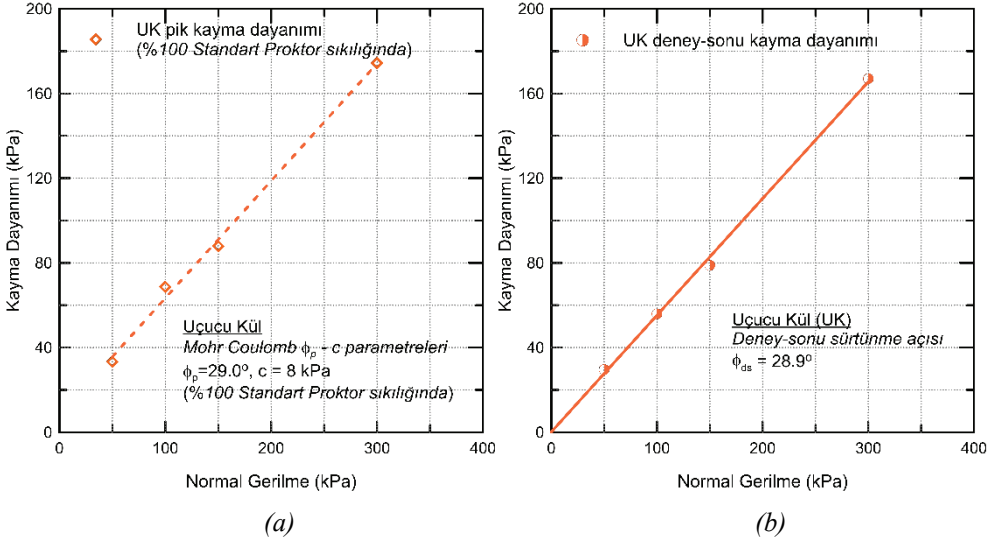
Çelik cürufu için elde edilen pik kayma dayanımları ve bu değerlere karşılık gelen pik kayma dayanımı parametreleri: Mohr-Coulomb pik sürtünme açısı - kohezyon (ϕ_p-c) Şekil 8a’da görülmektedir. Bu çalışmada kalıcı (kritik-durum) içsel sürtünme açılarının belirlenmesi hedeflense de direk kesme kutusundan elde edilen sonuçlar, ulaşılan deplasmanların bu kalıcı duruma erişmek için yeterli olmayabileceğine işaret etmektedir. Bu sebeple test sonundaki deplasmanlarda (plato kısmında) kayma dayanımı değerleri “deney-sonu sürtünme açısı” olarak sunulmaktadır. Bu deney sonu sürtünme açılarının kalıcı (kritik-durum) sürtünme açılarından bir miktar yüksek ve yakın olacağı öngörülmektedir. Çelik cürufu için her normal gerilme değerine karşılık gelen deney sonu kayma dayanımları ve hesaplanan içsel sürtünme açısı Şekil 8b’de görülmektedir.

Çelik cürufu örnekleri, % 100 Proktor sıklığında hazırlandıkları ve dane şekilleri (açılı) kesme sırasında kenetlenmeye uygun olduğu için yer değiştirme kesme grafiklerinde pik gözlenmesi beklenen bir sonuçtur. Az belirgin bir pik gözlenmesinin temel sebebi malzemenin görece daha fazla ince kum ve silt içermesi ve kenetlenmede büyük rol oynayan çakıl boyutunda danelerin eksikliği olabilir [30]. Buna rağmen, bu görece ince dane çapı dağılımındaki çelik cürufunun pik kayma dayanımı değerleri dahi, benzer dane çapı dağılımına sahip silika kumlarında gözlenen değerlerden daha yüksektir. Çelik cürufu için deney-sonu sürtünme açısı ise yaklaşık 40.2° olarak belirlenmiştir, bu değer de ancak çok köşeli kırma kumlarda ve daha çok çakıl içeren doğal granüler malzemelerde görülen değerler kadar yüksektir. Çelik cürufunun demir ve magnezyum içeren mineralojik yapısı ve pürüzlü yüzeyleri yüksek bir deney-sonu içsel sürtünme açısına sebep olmaktadır. Bu sonuçlar Türkiye’de üretilen BOF tipi çelik cürufunun, görece ince ve az çakıl içeren dane çapı dağılımlarının bile kayma dayanımı açısından avantajlı bir dolgu malzemesi olduğunu göstermektedir.



Şekil 8 - ÇC için elde edilen kayma dayanımı parametreleri: (a) Mohr-Coulomb $\phi_p - c$ parametreleri, (b) Deney-sonu sürtünme açısı

Uçucu kül örnekleri için elde edilen pik kayma dayanımları ve Mohr-Coulomb pik sürtünme açısı - kohezyon ($\phi_p - c$) fit parametreleri Şekil 9a’da, deney-sonu kayma dayanımları ve sürtünme açısı da Şekil 9b’de görülmektedir. Uçucu kül örnekleri için deney sonu sürtünme açısı yaklaşık 28.9° , $\phi_p - c$ fit parametreleri de $29^\circ - 8$ kPa olarak belirlenmiştir. Uçucu kül örnekleri için elde edilen yatay-deplasman ve kayma gerilmesi eğrileri incelendiğinde pik ve plato değerlerinin birbirine yakın olduğu gözlenmiştir (bkz. Şekil 9b). Uçucu kül örneklerinde kesme sırasında pikin daha az belirgin görülmesi malzemenin çoğunlukla silt boyutunda olmasıyla ve dane şekillerinin yuvarlak olmasıyla ilişkilendirilebilir. Bu iki özellik dane kenetlenmesine karşı çalışarak, uçucu külün pik kayma dayanımı açısının kalıcı içsel sürtünme açısına yakın çıkmasına sebep olmaktadır.

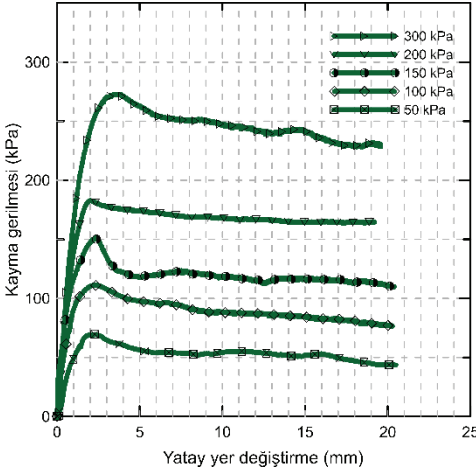


Şekil 9 - UK için elde edilen kayma dayanımı parametreleri: (a) Mohr-Coulomb $\phi_p - c$ parametreleri, (b) Deney-sonu sürtünme açısı

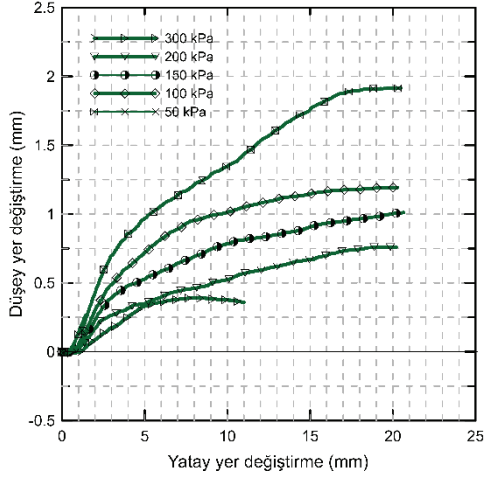
Bachus ve diğ. (2019) dünyanın değişik yerlerinden elde edilen uçucu küller üzerinde yapılan 90’ın üzerinde pik ya da kalıcı (kritik-durum) olduğunun çoğunlukla belirtilmediği deney sonucunu derleyerek uçucu küllerin içsel sürtünme açısı için 26°-43° aralığını belirlemiştir [65].

Buna ek olarak, Bachus ve diğ. (2019) üç eksenli deneylerden elde ettikleri sonuçlara dayanarak, sekiz (8) farklı uçucu kül için kalıcı (kritik-durum) içsel sürtünme açılarını 29°-36° aralığında elde etmiştir. Bu çalışmada da elde edilen deney sonu içsel sürtünme açısı sunulan bu aralıkla uyumludur [65]. Pik içsel sürtünme açısı ise deney sonu için elde edilen değere oldukça çok yakındır. Sadece ϕ_p kullanılırsa; yani $c=0$ için, ϕ_p değeri 30.6°’ya karşılık gelmektedir, bu değer de literatürdeki pik değerler için yayımlanan aralıktadır.

%80 çelik - cürufu-%20 uçucu kül karışımı ise belirlenen w_{opt} (%14) ve $\gamma_{d,max}$ değerlerine karşılık gelen %100 Standart Proktor sıklığında hazırlanmış ve 50 kPa, 100 kPa, 150 kPa, 200 kPa ve 300 kPa normal gerilmeleri altında kesme kutusu deneyleri yapılmıştır. %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül karışımına ait yatay yer değiştirme – kayma gerilmesi ve yatay yer değiştirme – düşey yer değiştirme eğrileri sırasıyla Şekil 10a ve 10b’de görülmektedir. %80 çelik cürufu-%20 uçucu kül karışımı için elde edilen pik kayma dayanımları ve Mohr-Coulomb pik sürtünme açısı - kohezyon ($\phi_p - c$) parametreleri Şekil 11a’da, deney-sonu kayma dayanımları ve bu dayanımlara karşılık gelen sürtünme açısı değeri de Şekil 11b’de görülmektedir. Çelik cürufu, uçucu kül ve %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül karışımı için kırık-durum zemin mekaniği ilkeleri çerçevesinde elde edilen kayma dayanımı değerleri Tablo 7’de özetlenmektedir.

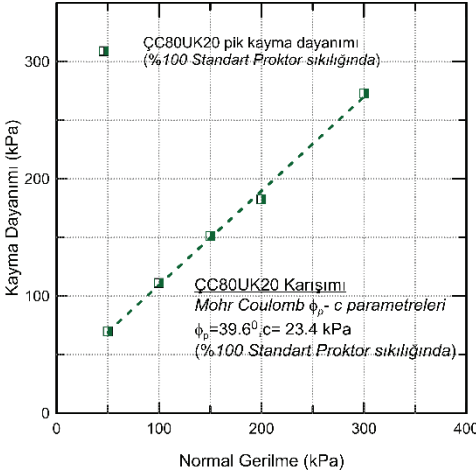


(a)

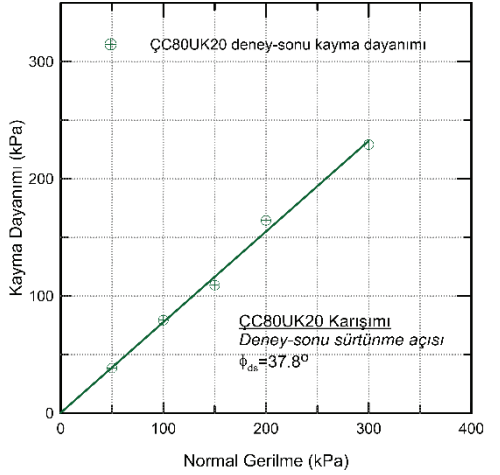


(b)

Şekil 10 - ÇC80UK20 Karışımı: (a) Yatay yer değiştirme- kayma gerilmesi, (b) Yatay yer değiştirme- düşey yer değiştirme



(a)



(b)

Şekil 11 - ÇC80UK20 için elde edilen kayma dayanımı parametreleri: (a) Mohr-Coulomb $\phi_p - c$ parametreleri, (b) Deney-sonu sürtünme açısı

Çelik çürufu danelerinin ağırlıkça %20 oranında uçucu kül ile yer değiştirmesiyle elde edilen ÇC80UK20 örneğinin deney-sonu sürtünme açısı yaklaşık 37.8° , $\phi_p - c$ fit parametreleri de $39.6^\circ - 23.4$ kPa olarak belirlenmiştir. Uçucu külün etkisiyle karışımın deney-sonu kayma dayanımı çelik çürufundan yaklaşık % 10 daha düşük elde edilmiştir ve buna karşılık gelen

deneysel sonuçlar içsel sürtünme açısı ise çelik cürufu için elde edilen yaklaşık 2.5° daha düşüktür. Karışımın pik kayma dayanımı değerleri ise çelik cürufu için elde edilenlere oldukça yakındır ve hatta bazı normal gerilmeler için karışım için elde edilen değerler çelik cürufu için elde edilenlerden daha yüksektir. Pik kayma dayanımı değerlerinde deneysel sonuçlarında görüldüğü gibi bir düşüş görülmemesi karışımın dane çapı dağılımı ile ilişkilendirilebilir. Uçucu kül etkisiyle karışımın daha geniş bir dane çapı dağılımına sahip olması ve boşlukların dolması dilatasyonun artmasına ve pik dayanımların çelik cürufu ile hemen aynı kalmasına sebep olmuştur. Çelik cürufu ve %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül örneklerine ait dayanım parametreleri doğal çakıllı kumlarla kıyaslanır seviyededir.

Tablo 7’deki değerler incelendiğinde, uçucu kül örneklerinin pik ve deneysel sonuçlar kayma dayanımı parametrelerinin çelik cürufu ve %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül karışımına göre çok daha düşük olduğu görülmektedir. Ancak, çelik cürufunda ağırlıkça % 20 oranında uçucu külle yer değiştirme yapılması, çelik cürufunun pik dayanım değerlerinde bir düşüşe sebep olmazken, kalıcı kayma dayanımı parametrelerinde yaklaşık 10° ’luk bir düşüşe sebep olmuştur. Bu sonuçlar uzun süreli şişme problemini hafifletmek için üretilen %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül karışımının kayma dayanım açısından çelik cürufuna yakın bir performans göstereceğine işaret etmektedir.

Tablo 7 - Yan ürünlerin ve karışımın kayma dayanımı değerleri

Yan Ürün	Deneysel sonuçlar sürtünme açısı ⁽²⁾	Pik-durum Mohr-Coulomb ϕ -c Parametreleri
ÇÇ ⁽¹⁾	40.2°	$42.1^\circ - 9.6 \text{ kPa}$
UK ⁽²⁾	28.9°	$29.0^\circ - 8 \text{ kPa}$
ÇÇ80UK20 ⁽³⁾	37.8°	$39.6^\circ - 23.4 \text{ kPa}$

Notlar:

⁽¹⁾ Çelik cürufu ⁽²⁾ Uçucu kül ⁽³⁾ %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül karışımı

⁽⁴⁾ Tüm örnekler Standart Proktor deneylerinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasında hazırlanmıştır.

6.5. Çevresel Riskler

Uçucu kül ve çelik cürufunun faydalı kullanımıyla ilgili olarak ortaya çıkabilecek çevresel risklerin belirlenebilmesi için bir seri deney yapılmıştır. Bu deneylerin temel amacı korozyon ve ağır metal salımı riskinin olup olmadığının belirlenebilmesidir. Kısa-süreli ve uzun-süreli çevresel etkiler ancak belirlenen risklere yönelik saha ve laboratuvar çalışmaları ve kirlenici taşıma modelleri yapılarak belirlenebilir. Bu çalışmadaki ölçümler ve analizler, bundan sonra bu konuda yapılacak çalışmalar için bir indikatör olma niteliğindedir.

pH ve elektrik iletkenliği ölçümleri, malzemelerin potansiyel korozif özelliklerine işaret eder. Asidik ve yüksek bazik ortamların bazı metallerin korozyon hızını arttırdığı bilinirken, elektrik iletkenliği yüksek olan ortamların da korozyonu kolaylaştırdığı bilinmektedir. %100 Proktor sıklığında hazırlanan çelik cürufu, uçucu kül ve %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül

karışımında ölçülen elektrik iletkenliği ve pH değerleri, eluatta ölçülen pH değerleriyle beraber Tablo 8’de özetlenmektedir.

Elektrik rezistansı 10 ohm-m’un altında olan zeminlerin elektrik iletkenliği ve buna bağlı olarak da korozyon potansiyelleri çok yüksek olarak değerlendirilir. pH değerleri 4’ten küçük veya 11.5’tan yüksek solüsyonlar genellikle korozif özellikler taşır. Su varlığı iletkenliği arttırdığı için, kuru zeminlerde korozyon hızı doymuş duruma göre daha düşüktür [66]. Tablo 8’deki değerler incelendiğinde, sıkıştırılmış çelik cürufu ve uçucu kül örnekleri için ölçülen rezistans 10 ohm-m’nin altındadır. %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül karışımı için ölçülen değer ise yaklaşık 10 ohm-m’dir. Tüm doymuş örneklerde, kuru örneklerle göre rezistans değerlerinde beklenen düşme gözlenmiştir.

Sıkıştırılmış örneklerde ve hazırlanan eluatlarda pH ölçümlerinin sonuçları birbirleriyle uyumludur. Çelik cürufu içeren numuneler uçucu küle göre daha yüksek pH değerine sahiptir. Elektrik iletkenliği ve pH ölçümleri yan ürünlerin ve karışımın korozyon riski taşıdığına işaret etmektedir.

Tablo 8 - Elektrik iletkenliği ve pH ölçüm sonuçları

Yan Ürün	Sıkıştırılmış Numunelerde			Eluat	
	Elektrik Rezistansı			pH	
	w_{opt} ohm-m	Doyurulmuş ohm-m	Ölçüm Aralığı	N1	N2
ÇÇ	9.66	6.30	12.72-12.85	12.66	12.80
UK	8.43	5.43	11.41-11.47	11.53	11.43
ÇÇ80UK20	10.05	5.88	12.67-12.70	12.45	12.70

(¹) Çelik cürufu (²) Uçucu kül (³)%80 çelik cürufu - %20 uçucu kül karışımı(⁴)N1 ve N2, hazırlanan özdeş eluat numuneleridir. (⁴) Tüm örnekler Standart Proktor deneylerinden elde edilen maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevasında hazırlanmıştır.

Endüstriyel yan ürünlerin dolgu malzemesi olarak değerlendirilmesinde dikkat edilmesi gereken bir başka konu da bu malzemelerin içinden geçen yağmur suyuna ağır metal salma riskidir. Bunun için TS EN 12547-4 [61] standardına uygun olarak hazırlanan çelik cürufu ve uçucu kül numunesi eluatının analizi sonucunda, çevresel sorun yaratabilecek ağır metal parametreleri için elde edilen değerler analiz yöntemleriyle beraber Tablo 9’da sunulmaktadır. Tablo 9’da Çevre Bakanlığı’nın yayımladığı *Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmeliği*’ne göre III. Sınıf depolama tesisleri için kullanılan sınır değerler de sunulmaktadır [67].

İçme suyu için sınır (limit) metal değerleri farklı ulusal ve uluslararası kaynaklara göre değişmektedir. Çevre Bakanlığı’nın *Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmeliği*’ne göre III. Sınıf depolama tesisleri için belirlenen sınır değerleri, ulusal ve uluslararası kaynaklara göre belirlenen içme suyu limitleri ile uyumlu ve hatta daha zorlayıcıdır. Bu yüzden Tablo 9’da kıyaslama amacıyla bu limit değerler de sunulmaktadır [67,68]. Tablo 9’daki analiz sonuçlarına göre, kullanılan çelik cürufu eluatındaki ağır metal salımları, bu

limitin biraz üzerinde olan krom (Cr) dışındaki tüm parametreler için bu limitlerin altındadır. Uçucu kül eluati için durum farklıdır, uçucu kül eluatındaki ağır metal salımları, krom (Cr), molbiden (Mo), antimon (Sb), ve selenyum (Se) için bu limitlerin üzerindedir. Bu sonuçlar kullanılan uçucu külün çelik cürufuna göre çevresel açıdan daha büyük bir risk taşıdığına ve uçucu kül seçiminin önemine işaret etmektedir.

Bu çalışmada önerilen karışım ağırlıkça %20 oranında uçucu kül içerdiği ve karışımda bir miktar çimentolaşma özelliği de gözlemlendiği için, karışımın metal salımlarının sade uçucu külün metal salımından çok daha az olması beklenmektedir. Buna rağmen tüm sonuçlar, %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül karışımının da çevresel bir risk faktörü oluşturabileceğini göstermektedir.

Bu çalışmada yapılan basit analizler sadece oluşabilecek çevresel risklerin belirlenmesini hedeflemiştir. Ağır metal salımı ve yeraltı suyuna etkisi; malzemenin kullanım şekli, sahanın işme suyu kaynaklarına uzaklığı, ulaşım yolundaki jeolojik birimler, pH ve sıcaklık gibi birçok faktörün etkisi ile değişen ve detaylı incelenmesi gereken bir konudur. Kısa-sürelili ve uzun-sürelili çevre etkilerinin laboratuvar çalışmalarıyla değerlendirilmesi tamamlanmadan, yan ürünlerin sahada kullanılması uygun değildir.

Tablo 9 - Eluat (sızıntı suyu) analiz sonuçları

Parametreler	ÇC ⁽¹⁾	UK ⁽²⁾	III.SD Limit ⁽³⁾	Analiz Yöntemleri
	(mg/L)	(mg/L)		
Arsenik (As)	<0.0005	0.0154	0.05	EPA 6020 B (ICP-MS) [62]
Baryum (Ba)	0.185	1.1792	2	
Kadmium (Cd)	0.00005	0.00191	0.004	
Krom (Cr)	0.06092	0.5466	0.05	
Bakır(Cu)	0.00586	0.007	0.2	
Cıva(Hg)	<0.000025	<0.000025	0.001	TS EN ISO 17852 [63]
Molbiden (Mo)	0.007	0.6656	0.05	EPA 6020 B (ICP-MS) [62]
Nikel (Ni)	0.00173	0.00059	0.04	
Kurşun (Pb)	0.00092	0.00197	0.05	
Antimon (Sb)	<0.0002	0.0178	0.006	
Selenyum (Se)	0.00557	1.0337	0.01	
Çinko(Zn)	0.01634	0.0199	0.4	TS 9546 EN12880 [64]
Katı madde (%)	>99	>99	-	

⁽¹⁾ Çelik cürufu ⁽²⁾ Uçucu kül ⁽³⁾ Çevre Bakanlığı'nın Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmeliği'ne göre III. Sınıf depolama için sınır değerler [65]

7. SONUÇLAR

Dünya’da ve ülkemizde, hızla önem kazanmakta olan sıfır atık hedefinin gerçekleşmesi ancak yerel yan ürünlerin doğru karakterizasyonu ile mümkün olabilir. Malzemelerin

mühendislik özelliklerinin belirlenmesinin yanı sıra, kullanım sırasında oluşabilecek çevre risklerinin belirlenmesi, kısa-sürelili ve uzun-sürelili çevre etkilerinin değerlendirilmesi ve bu etkileri azaltacak stratejiler üretilmesi önem taşımaktadır. Geri dönüşüm ve efektif kullanım oranlarının artmasını sağlayabilmek için bazen birden fazla malzemeyi birlikte kullanarak uygun mühendislik özelliklerine sahip karışımlar elde etmek uygun bir yöntem olabilir.

Diğer ülkelerde olduğu gibi Türkiye’de de çelik cürufunun özellikle kum ve silt boyutundaki ince daneli kısmı, su varlığında gösterdiği hacimsel dengesizlik nedeniyle faydalı kullanılamamaktadır. Bu çalışmada ülkemizde yüksek üretim miktarlarına sahip olan BOF tipi çelik cürufu kullanılarak ağırlıkça %80 çelik cürufu ve %20 uçucu kül (ÇC80UK20) içeren bir karışım üretilmiştir. Bu karışımın dolgu özellikleri, çelik cürufunun (ÇC) ve uçucu külün (UK) özellikleri ile beraber kıyaslamalı olarak laboratuvar çalışması sonuçlarına dayanarak sunulmaktadır. Bu çalışmadan elde edilen temel bulgular ve değerlendirmeler aşağıda özetlenmektedir.

Bu çalışmada kullanılan BOF tipi çelik cürufu (ÇC) ve F sınıfı uçucu kül (UK) USCS’e göre sırasıyla SP-SM ve ML olarak sınıflandırılabilir. %80 çelik cürufu - %20 uçucu kül içeren karışım (ÇC80UK20) ise USCS'e göre SM, AASHTO’ya göre A-1b olarak sınıflandırılabilir.

Uzun süreli serbest şişme deneyi sonuçlarına göre altı (6) ayın sonunda ÇC örneği için ölçülen hacimsel deformasyon yaklaşık % 3.6’dır ve şişme davranışında bir sönümlenme yoktur. ÇC80UK20 örneği için ise altı (6) ayın sonunda ölçülen hacimsel deformasyon yaklaşık %0.74’tür ve hacimsel genleşmenin büyük ölçüde sönümlendiği gözlenmiştir. Bu sonuç uçucu külle yer değiştirme yöntemiyle üretilen karışımın şişme açısından çelik cürufuna kıyasla beklenen iyileştirmeyi gösterdiğine işaret etmektedir.

Kompaksiyon eğrilerinden elde edilen değerler incelendiğinde, UK’nın hafif, ÇC’nin ise ağır bir dolgu malzemesi olduğu görülmektedir. Karışımın Standart Proktor kompaksiyon eğrisinden elde edilen $\gamma_{d,max}$ 19.30 kN/m³, w_{opt} ise yaklaşık %14’tür. Karışıma ait hidrolik iletkenlik değeri Proktor sıklığında hazırlanmış bir örnek için laboratuvar ortamında $\sim 2.17 \times 10^{-8}$ m/sn olarak belirlenmiştir. Bu değer orta-düşük drenaj kapasitesine işaret etmektedir. Bu sonuç karışımın serbest drenaj gerektiren dolgu uygulamalarında kullanılması durumunda ek drenaj önemleri alınması gerekliliğine işaret etmektedir.

Kesme kutusu deney sonuçlarına dayanarak, ÇC ve UK örnekleri için elde edilen deney-sonu sürtünme açısı (ϕ_{ds}) sırasıyla 40.2° ve 28.9° olarak belirlenmiştir. Karışım (ÇC80UK20) için deney-sonu kayma dayanımı çelik cürufu için elde edilen değerden %10 daha düşüktür ve deney-sonu sürtünme açısı 37.8°’dir. %100 Proktor sıklığında hazırlanan ÇC80UK20 için Mohr-Coulomb ϕ_p-c parametreleri yaklaşık olarak 39.6°-23.4 kPa (ya da $c=0$ için 43.3°) olarak belirlenmiştir. Karışım için elde edilen pik dayanım değerleri çelik cürufu için elde edilenlere oldukça yakındır. Bu durum karışımın dane çapı dağılımındaki değişikliğin yol açtığı dilatasyon eğilimindeki artış ile ilişkilendirilebilir.

Bu çalışmada yapılan analizler seçilen malzemelerin kullanımı ile oluşabilecek çevresel risklerin belirlenmesini hedeflemiştir. Elektrik iletkenliği ve pH ölçümlerine göre, bu çalışmada kullanılan tüm yan ürünler doğal dolgu malzemeleri ile kıyaslandığında daha korozif özellik taşımaktadır. Karışım (ÇC80UK20) için pH değerleri 12.4-12.7 aralığındadır, elektrik rezistansı ise kuru ve doygun numuneler için sırasıyla 10.1 ve 5.9 ohm-m’dir. Sızıntı suyu analizlerinin sonucuna göre, çelik cürufu eluatındaki ağır metal salımları, krom (Cr)

dışındaki tüm ağır metaller için genel geçerli içme suyu limitlerinin altındadır. Uçucu kül eluatındaki ağır metal salımları ise krom (Cr), molbiden (Mo), antimon (Sb), ve selenyum (Se) için bu limitlerin üzerindedir. Bu sonuçlar, seçilen uçucu kül kullanımının metal salım açısından yaratacağı çevre riskinin çelik göre daha yüksek olduğuna işaret etmektedir. Bu parametrelerin eluatta içme suyu sınır değerleri üzerinde olması, sahada bu etkinin yeraltı suyunda da aynı oranda görüleceği anlamına gelmez. Malzemenin kullanım şekli, yeraltı suyu kaynaklarına uzaklığı, ulaşım yolundaki etkiler, pH ve sıcaklık gibi birçok parametre ağır metal salımını önemli ölçüde etkiler. Bu yüzden tüm bu etkiler araştırıldıktan sonra malzemelerin ve karışımın çevresel etkiler açısından da kullanılabilir ya da kullanılamaz olduğu değerlendirilmelidir.

Kısa-süreli ve uzun-süreli çevre etkilerinin laboratuvar çalışmalarıyla değerlendirilmesi tamamlanmadan, yan ürünlerin sahada kullanılması uygun değildir. Elde edilen sonuçlar karışımın çevresel etkilerinin daha detaylı incelenmesi gerektiğine işaret etmektedir. Ağır metal salımı açısından daha güvenli bir uçucu kül kullanılarak ve eluat hazırlığı yerine hidrolik iletkenlik deneyi sırasında elde edilen sızma suyu örnekleri kullanılarak sonuçların nasıl değiştiği gelecekte araştırılmalıdır. Seçilen karışımın, sadece ekonomik fizibilitesi değerlendirilirse, karıştırma masrafı ve karışımın ağırlığı da göz önünde bulundurulmalıdır. Bu açıdan karışımın ancak yan ürün kaynaklarına yakın bir uygulama sahasında kullanılması ekonomik olabilir.

Semboller

- G_s : Özgül ağırlık
 w : Su muhtevası
 w_{opt} : Likit limit su muhtevası
 γ_d : Kuru birim hacim ağırlık (kN/m^3)
 $\gamma_{d,max}$: Maksimum kuru birim hacim ağırlık (kN/m^3)
 ϕ_p : Mohr-Coulomb pik içsel sürtünme açısı ($^\circ$)
 c : Mohr-Coulomb kohezyonu (kPa)
 ϕ_{ds} : Deney-sonu içsel sürtünme açısı ($^\circ$)

Teşekkür

Bu çalışma Tübitak 2232 117C018 No’lu proje kapsamında Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenmiştir. Yazar TÜBİTAK’a sağladığı maddi destek için teşekkürlerini sunar. Yazar ayrıca malzemeleri sağlayan çelik ve enerji üretim tesisi yetkililerine ve laboratuvar çalışmaları sırasında destek veren İnşaat Mühendisi İsmail Cantekin’e de teşekkürlerini sunar.

Kaynaklar

- [1] Association of State and Territorial Solid Waste Management Officials (ASTSWMO). 2006 Beneficial Use Survey. Survey Report, ASTSWMO -Beneficial Use Task Force, Washington, D.C., 2007.
- [2] Segerstorm, W., Dove, J., Recycled materials in geo-construction: A Review of Potential Benefits and Hazards. Scientific Report, CPGR No 61, Virginia Tech Center for Geotechnical Practice and Research, Virginia Polytechnic Institute and State University, VA, 2010.
- [3] Environmental Protection Agency (EPA). Methodology for Evaluating Beneficial Uses of Non-Hazardous Industrial Secondary Materials. Technical Report, No. 530-R-16-011, Office of Resource Conservation and Recovery-Office of Land and Emergency Management, Washington, D.C., 2016.
- [4] Ahmedzade, P., Sengoz, B., Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. *J. Hazard. Mater.*, 165,1-3, 300-305, 2009.
- [5] Shen, D., Wu, C., Du, J., Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture. *Constr Build Mater*, 23,1, 453-461, 2009.
- [6] Wu, S., Xue, Y., Ye, Q., Chen, Y., Utilization of steel slag aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Build Environ*, 42, 7, 2580-2585, 2009.
- [7] Ameri, M., Hesami, S., Goli, H., Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag. *Constr Build Mater*, 49, 611-617, 2013.
- [8] Montgomery, D.G., Wang, G., Instant-chilled steel slag aggregate in concrete-strength related properties. *Cem Concr Res*, 21, 6, 1083–1091, 1991.
- [9] Maslehuddin, M, Sharif, M.A., Shameem, M., Ibrahim, M., Barry, M.S., Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregates. *Constr Build Mater*, 17, 2,105-112, 2003.
- [10] Manso, J.M., Polanco, J.A., Losanez, M., Gonzales, J.J., Durability of concrete made with EAF slag as aggregate. *Cem Concr Compos*, 28,6, 528-534, 2006.
- [11] Abu-Eishah, S.I., El. Dieb, A.S., Bedir, M.S., Performance of concrete mixtures made with electric arc furnace (EAF) steel slag aggregate produced in the Arabian Gulf region”. *Constr Build Mater*, 34, 249-256, 2012.
- [12] Rondi, L., Bregoli, G., Sorlini, S., Cominoli, L., Collivignarelli, C., Plizzari, G., Concrete with EAF steel slag aggregate: A comprehensive technical and environmental characterization. *Compos B Eng*, 90, 195-202, 2016.
- [13] Conjeaud, M., George, C. M., Sorrentino, F. P., A new steel slag for cement manufacture: mineralogy and hydraulicity. *Cem Concr Res*, 11, 1, 85–102, 1981.
- [14] Tufekci, M., Demirbas, A., Genc, H., Evaluation of steel furnace slags as cement additives. *Cem Concr Res*, 27, 11, 1713-1717, 1997.

- [15] Altun, I.A., Yılmaz, I., Study on steel furnace slags with MgO additive in Portland cement. *Cem Concr Res*, 32, 8,1247-1249, 2002.
- [16] Reddy, A.S., Pradhan, R.K., and Chandra, S., Utilization of basic oxygen furnace (BOF) slag in the production of a hydraulic cement binder. *Int J Miner Process*, 79, 2, 98-105, 2006.
- [17] Serjun, V.Z., Mladenovic, A., Mirtic, B., Meden, A., Scancar, J., Milacic, R., Recycling of ladle slag in cement composites: Environmental impacts. *Waste Manag*, 43, 376-385, 2015.
- [18] Vilaplana, A. S., Ferreira, V.J., Lopez-Sabron, A.M., Aranda-Uson, A., Lausin-Gonzalez, C., Berganza-Conde, C., Ferreira, G., Utilization of Ladle Furnace slag from a steelwork for laboratory scale production Portland Cement. *Constr Build Mater*, 94, 837-843, 2015.
- [19] Tsakiridis., P.E., Papadimitriou, G.D., Tsivilis, S., Koroneos, C., Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. *J. Hazard. Mater.*, 152, 2, 805-811, 2008.
- [20] Iacobescu, R.I., Koumpouri, D.,Pontikes, Y., Saban, R., Angelopoulos, G.N., Volarisation of electric arc furnace steel slag as a raw material for low energy belite cements”. *J. Hazard. Mater.*, 196, 287-294, 2011.
- [21] Iacobescu, R.I., Angelopoulos, G.N., Jones, P.T., Blanpain, B., Pontikes, Y., Ladle metallurgy stainless steel slag as raw material in ordinary Portland Cement production: a possibility for industrial symbiosis. *J Clean Prod*, 112, 872-881, 2016.
- [22] Poh, H.Y., Ghataora, S.G., Ghazireh, N., Soil stabilization using basic oxygen steel slag fines. *J Mater Civil Eng, ASCE*, 18, 2, 229-240, 2006.
- [23] Ortega-Lopez, V., Manso, J.M., Cuesta, I.I., Gonzalez, J.J., The long-term accelerated expansion of various ladle-furnace basic slags and their soil-stabilization applications. *Constr Build Mater*, 68, 455-464, 2014.
- [24] Yildirim, I.Z., Prezzi, M., Subgrade stabilisation mixtures with EAF steel slag: an experimental study followed by field implementation. *Int J Pavement Eng*, available online, DOI:10.1080/10298436.2020.1823389, 2020.
- [25] Ghionna, V., Pedroni, S., Tenani, P., Veggi, S., Geotechnical investigation on steel slags mixtures for landfills embankments construction. *Proceedings of the Second International Conference on Environmental Geotechnics*, V2, 709-714, Osaka, Japan, November 5-8, 1996.
- [26] Montenegro, J.M., Celemín-Matachana, M., Canizal, J., Setien, J., Ladle furnace slag in construction of embankments: expansive behavior. *J Mater Civil Eng, ASCE*, 25, 8, 972-979, 2013.
- [27] Yildirim, I.Z., Prezzi, M., Experimental Evaluation of EAF Ladle Steel Slag as a Geo-Fill Material: Mineralogical, Physical & Mechanical Properties. *Constr Build Mater*, 154C, 23-33, 2017.
- [28] Juckes, L.M., The volume stability of modern steelmaking slags. *Miner Process Extr M*, 112, 3, 177-197, 2003.

- [29] Yildirim, I.Z., Prezzi, M., Steel Slag: Chemistry, Mineralogy, and Morphology. Proceedings of the International Foundations Congress & Equipment Exposition (IFCEE), Geotechnical Special Publication No. 256, 2816-282, San Antonio, Texas, March 17-21, 2015.
- [30] Yildirim, I.Z., Prezzi, M., Geotechnical Properties of Fresh and Aged Basic Oxygen Furnace Steel Slag. J Mater Civil Eng, ASCE, 27,12, 104015046, 1-9, 2015.
- [31] Yayan, V. Current Situation in Turkish Steel Industry and Outlook. Turkish Steel Producers Associations' Presentation in 86th OECD Steel Committee Meeting 25-26 March 2019, Paris, 2019. <http://www.oecd.org> (Erişim tarihi: 28.07.2020)
- [32] World Steel Association (WSA), 2020 World Steel in Figures. WSA Annual Report, Belgium, 2020. www.worldsteel.org (Erişim tarihi: 28.07.2020)
- [33] Türkiye Çelik Üreticileri Derneği (TÇÜD). Demir Çelik Cüruf Raporu, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, Ankara, 2015.
- [34] Türkiye Çelik Üreticileri Derneği (TÇÜD), Basın Bülteni. TÇÜD, Ankara, 2020. <http://celik.org.tr/en/turkiye-celik-ureticileri-derneği-basin-bulteni-30/> (Erişim tarihi: 28.07.2020)
- [35] Türkiye Çelik Üreticileri Derneği (TÇÜD), Türkiye Çelik Haritası. TÇÜD, Ankara, 2020. <http://celik.org.tr/en/harita/> (Erişim tarihi: 28.07.2020)
- [36] Öcal, Y. Demir Çelik Sektöründe Atık Yönetimi. Uzmanlık Tezi, Yayın No: 2911, İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü, T.C. Kalkınma Bakanlığı, 2014.
- [37] T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı.(ETKB), Bilgi Merkezi-Enerji, Elektrik, ETKB, 2020. <http://www.oecd.org> (Erişim tarihi: 28.07.2020)
- [38] American Society of Testing Materials (ASTM), Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. ASTM C 618, West Conshohocken, PA, USA, 2019.
- [39] Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F., Yeğinobalı, A. Türkiye'deki uçucu küllerin sınıflandırılması ve özellikleri. TÇMB/ ARGE/Y03.03, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB), Ankara, Türkiye, 2009.
- [40] Atabey, İ.İ. F Sınıfı Uçucu Küllü Geopolimer Harcının Durabilite Özelliklerinin Araştırılması, Doktora Tezi, Erciyes Üniversitesi, 2017.
- [41] Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). Haber Bülteni. Termik Santral Su ve Atık İstatistikleri, Sayı:24873, 18 Aralık 2017. <http://www.tuik.gov.tr> (Erişim tarihi: 28.07.2020)
- [42] Uyanık, S., Topeli, M., The opportunities and challenges of fly ash in Turkey. İskenderun Enerji Üretim ve Ticaret A.Ş. (ISKEN), 2014. <http://www.ashtans.eu/> (Erişim tarihi: 09.08.2020)
- [43] Koh, T., Moon, S.-W., Jung, H., Jeong, Y., Pyo, S. A Feasibility Study on the Application of Basic Oxygen Furnace (BOF) Steel Slag for Railway Ballast Material. Sustainability, 10, 284, 2018.

- [44] Pathak, K., Choudhary, R., Kumar, A., Damena, T.D. Feasibility assessment of the use of basic oxygen furnace slag in open graded asphalt courses. *Int. J. Pavement Res. Technol*, 12, 664-673, 2019.
- [45] Dayıoğlu, A.Y., Geotechnical and environmental impacts of steel slag in embankments, Doktora tezi, University of Maryland, College Park, 2016.
- [46] Dayıoglu, A. Y., Aydılek, A. H., Cimen, O., & Cimen, M. Trace Metal Leaching from Steel Slag Used in Structural Fills. *J Geotech Geoenviron, ASCE*, 144, 12, 04018089, 2018.
- [47] Shen, W., Zhou, M., Ma, W., Hu, J., Cai, Z. Investigation on the application of steel slag–fly ash–phosphogypsum solidified material as road base material. *Journal of Hazardous Materials*, 164, 1, 99-104, 2009.
- [48] Pasetto, M., Baldo, N. Re-use of industrial wastes in cement bound mixtures for road construction. *Environ Eng Manag J, Environmental Engineering and Management Journal*, 17, 2, 417-426, 2018.
- [49] Falayi, T. A comparison between fly ash- and basic oxygen furnace slag-modified gold mine tailings geopolymers. *Int J Energy Environ Eng* 11, 207–217, 2020.
- [50] Yildirim, I. Z., Prezzi, M., Vasudevan, M., Santoso, H. Use of soil-steel slag-class-C fly ash mixtures in subgrade applications. Publication FHWA/IN/JTRP-2013/06. Joint Transportation Research Program, Indiana Department of Transportation and Purdue University, West Lafayette, Indiana, 2013 (doi: 10.5703/1288284315188).
- [51] Yildirim, I.Z. Türkiye’de Geo-malzemeler ve Sürdürülebilirlik: Çelik Cürufunun Hacim Değiştirme (Şişme) Davranışının Çeşitli Deneysel Metotlarla Belirlenmesi. Tübitak 2232 Proje No: 117C018, Sonuç Raporu, 1-54, 2019.
- [52] American Society of Testing Materials (ASTM), Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory compacted soils. ASTM D 1883-07, West Conshohocken, PA, 2018.
- [53] American Society of Testing Materials (ASTM), Standard practice for reducing samples of aggregate to testing size. ASTM C 702/702M-18, West Conshohocken, PA, 2018.
- [54] American Society of Testing Materials (ASTM), Standard test method for particle-size analysis of soils. ASTM D422-63, West Conshohocken, PA, 2007.
- [55] American Society of Testing Materials (ASTM), Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. ASTM D854-10, West Conshohocken, PA, 2010.
- [56] American Society of Testing Materials (ASTM), Standard test method for laboratory compaction characteristics of soil using standard effort [12,400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³)]. ASTM D698-00a, West Conshohocken, PA, 2010.
- [57] American Society of Testing Materials (ASTM), Standard test method for measurement of hydraulic conductivity of porous material using a rigid-wall, compaction-mold permeameter. ASTM D5856-15, West Conshohocken, PA, 2015.

- [58] American Society of Testing Materials (ASTM), Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. ASTM D3080/D3080-11, West Conshohocken, PA, 2011.
- [59] American Society of Testing Materials (ASTM), Standard test method for soil resistivity using the two-electrode soil box method. ASTM G187-18, West Conshohocken, PA, 2011.
- [60] American Society of Testing Materials (ASTM), Standard test method for measuring pH of soil for use in corrosion testing. ASTM G51-95, West Conshohocken, PA, 2012.
- [61] TS EN 12457-4. Atıkların nitelendirilmesi - Katıdan özütleme analizi- Granül katı atıkların ve çamurların katı özütlemesi için uygunluk deneyi - Bölüm 4 : Sıvı katı oranı 10 l/kg olan ve parçacık boyutu 10 mm'den küçük (ölçüsü azaltılmış veya azaltılmamış) malzemeler için tek aşamalı parti deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Bakanlıklar-ANKARA, 2004.
- [62] EPA SW846 Method 6020B. Inductively Coupled Plasma - Mass Spectrometry. Revision 2, U.S. Environmental Protection Agency, July 2014.
- [63] TS EN ISO 17852. Su kalitesi - Civa tayini - Atomik floresans spektrometresi kullanan yöntem. Türk Standartları Enstitüsü, Bakanlıklar-ANKARA, 2009.
- [64] TS 9546 EN 12880. Çamurların karakterizasyonu- Kuru kalıntı ve su muhtevası tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Bakanlıklar-ANKARA, 2002.
- [65] Bachus, R.C., Terzario, M., Pasten, C., Chong, S. H., Dai, S., Cha, M.S., Kim, S.J., Jang, Papadopoulos, E., Roshankhah, S., Lei, L., Garcia, A., Park, J., Sivaram, A., Santamarina, F., Ren, X., and Santamarina, J. C., Characterization and engineering properties of dry and ponded Class-F fly ash. J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 145, 3, 04019003, 1-11, 2019.
- [66] Roberge, P. R. Corrosion Inspection and Monitoring. Wiley Series in Corrosion, R.Winston Revie, Royal Military College of Canada Ontario, Canada, Wiley-Interscience, A John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [67] RG:26.03.2010-27533. Atıkların Düzenli Depolanmasına Dair Yönetmelik, Çevre Bakanlığı, 2010.
- [68] Oğuz, T.C. İçme suyu arıtımında yaygın olarak karşılaşılan su kalite problemleri ve arıtımı için çözüm önerileri. Uzmanlık Tezi, TC Orman ve Su İşleri Bakanlığı, 2015.

İnşaat Sektöründeki İş Kazalarının Hata Ağacı Analizi ile Değerlendirilmesi

Şerife AK¹
İsmail ZORLUER²

ÖZ

İnşaat sektörü hem dünyada hem de Türkiye’de en çok iş kazasının yaşandığı sektörlerin başında gelmektedir. Ölüm, yaralanma, sürekli iş görmezlik veya meslek hastalıklarıyla sonuçlanan iş kazalarının nedenlerinin belirlenmesi, iş kazalarına karşı önlemler alınması güncelliğini koruyan önemli bir problemdir.

Bu çalışma kapsamında Türkiye’de inşaat sektöründe farklı zamanlarda meydana gelen iş kazalarının ölüm ve yaralanma oranlarından yararlanılarak hata ağacı analizi gerçekleştirilmiştir. Hata ağacının istenmeyen tepe olayı, iş kazası olarak tanımlanmıştır. Hata ağacı yapısı, iş kazalarını ve nedenlerini ilişkilendiren minimum kesme kümelerinden oluşmaktadır. Tümdengelsel bir yaklaşımla hesaplamaların gerçekleştirildiği hata ağacı analizinde, minimum kesme kümelerinin ve istenmeyen tepe olayın hata olasılığı değerleri hesaplanırken Boolean matematiğinden yararlanılmaktadır.

Çalışma kapsamında hem iş kazalarının meydana gelme olasılıkları hem de hata olarak tanımlanan iş kazalarının kritik önem faktörleri ortaya konmuştur. İş kazalarına karşı alınacak önlemler sıralamasında, göreceli olarak minimum kesme kümelerinin olasılık değerleri dikkate alınabileceği gibi kritik önem faktörlerinin de bir sıralama ölçütü olarak kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır. Çalışma, hata ağacı analizinin Türkiye’deki iş kazalarının analizinde etkin bir şekilde kullanılabilmesini göstermektedir. Ayrıca bu çalışmada oluşturulan hata ağacı yapısı ile yetkili mercilerin gerekli önlemleri alabilmesi açısından görsel bir model ortaya koyulmuştur.

Anahtar Kelimeler: İnşaat sektörü, iş kazaları, hata ağacı analizi, risk analizi.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu’na 11 Ocak 2021 günü ulaşmıştır. 29 Kasım 2021 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Ocak 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.858275>

1 Afyon Kocatepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar
sgokce@aku.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-3854-8226>

2 Afyon Kocatepe Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Afyonkarahisar
izorluer@aku.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-5017-084X>

ABSTRACT

Evaluation of Occupational Accidents in the Construction Industry with Fault Tree Analysis

The majority of the numbers of occupational accidents occurred due to the construction industry both in Turkey and all over the world. Determining the causes of occupational accidents resulting in death, injury, permanent incapacity, or occupational diseases is necessary at present; thus, precautions against occupational accidents can be determined and applied.

Fault tree analysis was applied by using the death and injury rates of occupational accidents at different times in the construction industry in Turkey in this study. The undesired top event of the fault tree was defined as an occupational accident. The fault tree structure consists of minimum cut sets relating to occupational accidents and their causes. In fault tree analysis, where calculations were performed with a deductive approach, Boolean algebra calculated the unavailability values of the minimum cut sets and the undesired top event.

Both the possibilities of occupational accidents and the critical importance factors of the occupational accidents defined as errors are revealed. It has been concluded that relatively the probability values of the minimal cut sets can be taken into account, and the critical importance factors can be used as a ranking criterion in the order of measures to be taken against occupational accidents. The study displays that fault tree analysis can be used effectively to analyze occupational accidents in Turkey. In addition, with the fault tree structure created in this study, a visual model was presented for the competent authorities to take the necessary precautions.

Keywords: Construction industry, occupational accidents, fault tree analysis, risk analysis.

1. GİRİŞ

İş kazasının literatürde pek çok tanımı bulunmaktadır. Uluslararası Çalışma Örgütü (International Labour Organization) iş kazasını, bir veya birden fazla işçinin ölümüne, yaralanmasına veya hastalığına neden olan, işten kaynaklanan veya iş ile bağlantılı olarak ortaya çıkan şiddet eylemleri de dahil olmak üzere beklenmedik ve planlanmamış olay şeklinde ifade etmektedir [1]. Uluslararası Çalışma Örgütü'ne göre bir ekonomik faaliyet sırasında meydana gelen ulaşım ve trafik kazaları da iş kazası kapsamında değerlendirilmektedir. Ülkemizde 2012 yılında yürürlüğe giren 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'na göre iş kazası, "işyerinde veya işin yürütümü nedeniyle meydana gelen, ölüme sebebiyet veren veya vücut bütünlüğünü ruhen ya da bedenen engelli hâle getiren olay" olarak tanımlanmaktadır [2]. Teknolojinin gelişmesi, ekonomik faaliyetlerin her geçen gün artması gibi nedenlerden dolayı dünya üzerinde her yıl pek çok insan iş kazaları nedeniyle ölmekte, yaralanmakta veya meslek hastalığına yakalanmaktadır. Çok sayıda malzeme ve ekipman kullanımı gerektiren sektörlerde, nispeten insan hareketleri de artmaktadır. Buna paralel olarak iş kazası meydana gelme olasılığının arttığını da söylemek mümkün olmaktadır.

Geçmişten günümüze, inşaat sektöründe iş kazalarının ve bu kazaların neden olduğu olumsuz sonuçların önlenmesi veya azaltılmasına ilişkin pek çok çalışma ve yasal düzenleme

gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ve düzenlemelere rağmen inşaat sektörü [3-5] halen hem dünyada hem de Türkiye’de iş kazasının en çok yaşandığı sektörlerden biri olarak karşımıza çıkmaktadır. İnşaat işleri, doğası gereği dinamik olduğundan [6] dış etkenlerden oldukça fazla etkilenmektedir. İnşaat faaliyetlerinde çeşitli ve çok sayıda malzeme ve ekipman kullanılmaktadır. İnşaat işlerinde ağırlıklı olarak vasıfsız işçiler çalışmaktadır. Belirli bir zaman diliminde işlerin yetiştirilmesi gerektiğinden hızlı ve yoğunlukla dikkatsiz çalışma yapılmaktadır. Yıllar içerisinde sektörün yoğunlukla büyüme trendi göstermesi, çalışan işçi sayısının da artmasına neden olmaktadır. Bütün bu nedenler inşaat sektörünü iş kazasına açık ve riskli bir sektör haline getirmektedir.

Literatürde iş kazalarının, kaza analiz çalışmaları, kaza önleme çalışmaları ve risk değerlendirme çalışmaları olarak üç ana grupta ele alındığı görülmektedir [7]. Literatürdeki çalışmalara inşaat sektörü perspektifinden bakıldığında;

i) iş kazası analizine [3, 7-17], ii) iş kazası önlenmesine [18-25], iii) iş kazalarında risk değerlendirmesine [26-33], iv) ve modellemeye [11, 20, 29] yönelik pek çok çalışma bulunmaktadır.

Bu çalışma kapsamında yukarıda belirtilen üç ana gruptan, risk değerlendirmesi grubunda ele alınabilecek bir uygulama gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında Güranlı ve Müngen (2013) [34] tarafından sınıflandırılan iş kazası verileri kullanılarak hata ağacı analizi ile risk değerlendirmesi yapılmıştır.

Literatürde hata ağacı analizinin inşaat sektöründeki iş kazalarına uygulandığı çalışmalar da bulunmaktadır. Hadiprino (1992) [35], inşaatlarda meydana gelen düşme kazalarını ve bu kazaların nedenlerini araştırarak hata ağacı analizi yöntemi ile analiz etmiştir. Düşmelerin nedenleri, çalışanın kişisel özelliklerine bağlı nedenler, çalışanın düşmesine neden olan dolaylı nedenler ve çalışma ortamından kaynaklanan düşmeler şeklinde üç gruba ayrılmıştır. Bu üç gruba neden olabilecek basit ve koşullu olaylar belirlenerek hata ağacı analizi gerçekleştirilmiştir.

Hadiprino (1992) [36], önceki çalışmasının ikinci bölümü olan çalışmasında ise inşaatlarda meydana gelen düşme kaynaklı kazaların simülasyonunu yaparak FTES-FALL adını verdiği hata ağacı uzman sistemi geliştirmiştir.

LeBeau ve diğ. (2007) [37], hata ağacı analizi aracılığıyla köprülerde meydana gelen çökmeleri ve bunların nedenlerini incelemiştir. Ortaya koydukları grafiksel hata ağacı modeli ile benzer köprü tiplerinin yapımı esnasında kritik yönlere dikkat çekmeyi hedeflenmiştir.

Chi ve diğ. (2014) [28], çalışmalarında inşaat sektöründeki ölümlü iş kazalarını inceleyerek, bu kazalar ve nedenleri arasındaki ilişkilendirmeyi hata ağacı analizi aracılığıyla gerçekleştirmişlerdir. Düşmelerden kaynaklanan ölümlerin nedenlerinin belirlenmesinde, oluşturdukları grafiksel hata ağacının etkili olarak kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır.

Yang ve Deng (2021) [38] tünel inşaatındaki risk kaynaklarını belirledikleri çalışmalarında hata ağacı analizi ile nitel ve nicel analiz gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında örnek olarak ele aldıkları tünelin çökmesini etkileyen faktörleri önemine göre sıralamışlardır.

Bu çalışma kapsamında, Güranlı ve Müngen (2013) [34] tarafından incelenen ve sınıflandırılan iş kazalarına ait kök neden belirleme çalışması gerçekleştirilmiştir. Belirlenen

kök nedenlere bağlı olarak hata ağacı oluşturulmuştur. İstenmeyen olayın iş kazası olarak ele alındığı çalışmada, hata ağacını oluşturan minimum kesme kümeleri modellenmiştir. Modelin analiz edilmesiyle Türkiye’de meydana gelen iş kazalarının hata olasılığı değerleri ve kritik önem faktörleri belirlenmiştir.

2. İNŞAAT SEKTÖRÜNDE İŞ KAZALARI VE İŞ KAZASI TİPLERİ

Türkiye’de çeşitli faaliyet gruplarında meydana gelen kazalara ilişkin veriler Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) tarafından açıklanmaktadır. Türkiye İstatistik Kurumu yıllara göre iş kazası ve meslek hastalıkları istatistiklerinden derlenen sayılar Tablo 1’de verilmiştir. Tablo 1’de 2007-2019 yılları arasında Türkiye’de meydana gelen iş kazası, ölüm, sürekli iş görmezlik, meslek hastalığı sayılarının ve kaza sıklıklarının inşaat sektöründeki sayılarla karşılaştırmaları görülmektedir. SGK’nın 2007 yılı öncesi için açıkladığı veriler detaylı olarak incelendiğinde Tablo 1’de verilen kaza sıklık değerlerini elde etmek için yeterli bilgi bulunmamaktadır. Kaza sıklığı, her 100.000 çalışan başına düşen iş kazası sayısı olarak ifade edilmektedir [39] ve aşağıdaki eşitlik ile hesaplanmaktadır:

$$\text{Kaza Sıklığı} = \frac{\text{Kaza Sayısı} \cdot 100.000}{\text{Çalışan İşçi Sayısı}} \quad (1)$$

Tablo 1 - Yıllara Göre Türkiye Geneline ve İnşaat Sektöründe İş Kazası Verileri

		İş Kazası Sayıları (Kaza Sıklığı)		Ölüm Sayısı (Kaza Sıklığı)		Sürekli İş Görmezlik (Kaza Sıklığı)		Meslek Hastalığı (Kaza Sıklığı)	
		Türkiye Geneli	İnşaat Sektörü	Türkiye Geneli	İnşaat Sektörü	Türkiye Geneli	İnşaat Sektörü	Türkiye Geneli	İnşaat Sektörü
Yıllar	2007	80602 (947,66)	7615 (610,19)	1044 (12,27)	359 (28,77)	1956 (23,00)	364 (29,17)	1208 (14,20)	16 (1,28)
	2008	72963 (828,84)	5574 (449,92)	866 (9,84)	297 (23,97)	1694 (19,24)	377 (30,43)	539 (6,12)	6 (0,48)
	2009	64316 (712,23)	6877 (560,15)	1171 (12,97)	156 (12,71)	1885 (20,87)	284 (23,13)	429 (4,75)	9 (0,73)
	2010	62903 (4337,27)	6437 (64,17)	1454 (100,26)	475 (4,74)	2085 (143,76)	319 (3,18)	533 (36,75)	31 (0,31)
	2011	69227 (627,57)	7749 (475,15)	1710 (15,50)	570 (34,95)	2216 (20,09)	406 (24,89)	697 (6,32)	16 (0,98)
	2012	74871 (627,08)	9209 (514,62)	745 (6,24)	256 (14,31)	2209 (18,50)	568 (31,74)	395 (3,31)	30 (1,68)

Tablo 1 - Yıllara Göre Türkiye Genelinde ve İnşaat Sektöründe İş Kazası Verileri (devam)

		İş Kazası Sayıları (Kaza Sıklığı)		Ölüm Sayısı (Kaza Sıklığı)		Sürekli İş Görmezlik (Kaza Sıklığı)		Meslek Hastalığı (Kaza Sıklığı)	
		Türkiye Geneli	İnşaat Sektörü	Türkiye Geneli	İnşaat Sektörü	Türkiye Geneli	İnşaat Sektörü	Türkiye Geneli	İnşaat Sektörü
Yıllar	2013	191389 (1533,06)	26967 (1457,72)	1360 (10,89)	521 (28,16)	77*	9*	371 (2,97)	33 (1,78)
	2014	221366 (1671,93)	29699 (1583,16)	1626 (12,28)	511 (27,24)	132*	10*	494 (3,73)	9 (0,48)
	2015	241547 (1725,41)	33361 (1684,36)	1252 (8,94)	473 (23,88)	11*	0*	510 (3,64)	14 (0,71)
	2016	286068 (2076,69)	44552 (2360,87)	1405 (10,20)	496 (26,28)	35*	1*	597 (4,33)	30 (1,59)
	2017	359653 (2489,32)	62802 (3014,34)	1633 (11,30)	587 (28,17)	32*	0*	691 (4,78)	16 (0,77)
	2018	430985 (3028,88)	77157 (4818,75)	1541 (10,83)	591 (36,91)	140*	22*	1044 (7,34)	30 (1,87)
	2019	422463 (2951,33)	47701 (3684,08)	1147 (8,01)	368 (28,42)	149*	25*	1088 (7,60)	35 (2,70)

*İlgili yılda iş kazası veya meslek hastalığından dolayı gelir bağlanan kişi sayısını göstermektedir.

2012 yılında yürürlüğe giren 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu spesifikliği dolayısıyla en önemli yasal düzenleme olma özelliğini taşımaktadır. Bu kanunun yürürlüğe girmesinden hemen sonra burada detaylarına değinilmeyecek olan pek çok yönetmeliğin yayımlandığı bilinmektedir. Tablo 1'de 2012 yılına kadar olan veriler incelenmesi tamamlanmış iş kazalarına karşılık gelmektedir. 2012 yılından sonraki yıllarda ise bu veriler, yıl içerisinde bildirilen sayıları kapsamaktadır. Bu nedenle 2012 yılı öncesi ve sonrasındaki verilerde bir süreksizlik görülmektedir.

Ayrıca Tablo 1'de yer alan sürekli iş görmezlik bilgileri 2012 yılına kadar sürekli iş görmezlik başlığı altında açıklanan verileri kapsamaktadır. 2013 yılından itibaren bu bilgiler, ilgili yılda iş kazası veya meslek hastalığından dolayı gelir bağlanan kişi sayısı olarak açıklanmaya başlanmıştır.

Tablo 2'de Avrupa Birliği'ndeki bazı ülkelerin tarım, sanayi ve inşaat sektörlerinde (madencilik hariç) iş kazaları sonucu ölüm sayıları ve kaza sıklıkları verilmektedir [39].

Tablo 2'de yalnızca ölümle sonuçlanan iş kazası sayısının en çok olduğu Avrupa ülkelerine yer verilmiştir. Burada dikkat çeken en önemli husus Tablo 2'de verilen iş kazası sonucu ölüm sayıları tarım, sanayi ve inşaat sektörlerinin toplamını içermesidir. Avrupa İstatistik Ofisi (Eurostat) tarafından bu veriler tarım, sanayi ve inşaat sektörlerindeki toplam iş kazası sayılarını içerecek şekilde açıklandığından Tablo 2'de de bu şekilde yer verilmiştir. Örneğin Tablo 1'de 2018 yılında Türkiye'de iş kazası nedeniyle ölüm sayısı 1541 iken kaza sıklığı

İnşaat Sektöründeki İş Kazalarının Hata Ağacı Analizi ile Değerlendirilmesi

10,83; inşaat sektöründeki iş kazası nedeniyle ölüm sayısı 591 iken kaza sıklığının 36,91 olduğu görülmektedir. Tablo 2’de aynı yıl İtalya için açıklanan ölüm sayısının 440 kaza sıklığının ise 2,64 olduğu görülmektedir. Daha önce de belirtildiği gibi Tablo 2’deki sayılar tarım, sanayi ve inşaat sektörlerindeki iş kazası sayılarının toplamını içermektedir. Türkiye’nin diğer Avrupa ülkeleri arasındaki durumu değerlendirildiğinde çok kritik bir yere sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 2 - Avrupa Birliği’ndeki bazı ülkelerdeki tarım, sanayi ve inşaat sektörlerinde (madencilik hariç) iş kazaları sonucu ölüm sayıları

Ülke	Yıl (Kaza Sıklığı)										
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Almanya	454 (1,31)	536 (1,52)	469 (1,45)	473 (1,45)	425 (1,26)	475 (1,40)	425 (1,23)	387 (1,11)	404 (1,14)	369 (1,00)	391 (1,04)
İspanya	354 (3,10)	314 (2,71)	336 (3,13)	273 (2,79)	232 (2,44)	247 (2,56)	310 (3,11)	271 (2,62)	290 (2,69)	290 (2,59)	322 (2,36)
Fransa	492 (3,04)	453 (3,26)	501 (3,68)	524 (3,71)	492 (3,51)	517 (3,67)	528 (3,74)	528 (3,81)	496 (3,46)	530 (3,62)	689 (4,60)
İtalya	633 (3,69)	622 (3,66)	510 (3,08)	469 (2,85)	463 (2,88)	459 (2,89)	480 (2,99)	417 (2,56)	398 (2,42)	440 (2,64)	406 (2,42)
Avusturya	153 (5,80)	158 (5,35)	106 (3,75)	137 (4,50)	130 (4,31)	119 (4,02)	125 (4,23)	100 (3,81)	90 (3,41)	120 (3,90)	93 (3,03)
Polonya	334 (4,79)	366 (4,02)	344 (2,82)	303 (2,56)	227 (1,94)	225 (1,90)	266 (2,20)	198 (1,60)	235 (2,42)	183 (1,89)	149 (1,15)
Portekiz	204 (5,47)	197 (5,42)	180 (5,17)	162 (5,02)	145 (4,65)	148 (4,70)	148 (4,69)	130 (4,04)	133 (4,00)	90 (2,67)	92 (2,71)
Romanya	370 (4,81)	342 (5,23)	273 (7,66)	257 (6,98)	252 (6,79)	253 (6,60)	261 (6,63)	229 (5,58)	224 (5,31)	221 (5,18)	215 (3,40)
Birleşik Krallık	133 (0,73)	158 (0,90)	172 (0,95)	149 (0,80)	235 (1,26)	207 (1,10)	226 (1,15)	222 (1,11)	248 (1,22)	227 (1,12)	Mevcut değil

Tablo 3’te Sosyal Güvenlik Kurumu verilerinden elde edilen 2019 yılı içerisinde iş kazası sonucu ölenlerin ekonomik faaliyet alanlarına göre sayıları görülmektedir. Tablo 3 detaylı bir şekilde incelendiğinde inşaat sektörünün yeri net bir şekilde görülebilmektedir. Diğer faaliyet gruplarına kıyasla iş kazalarında en çok ölümün inşaat sektöründe gerçekleştiği söylenebilmektedir. Tablo 3 yalnızca 2019 yılı verilerini içermektedir. Ancak burada detayları verilmeyen diğer yıllara ait veriler incelendiğinde de benzer durumların var olduğu görülmektedir.

Tablo 3 - 2019 Yılı İş Kazaları Sonucu Ölümlerin İşyerinin Faaliyet Gruplarına Dağılımı [40].

Sektör	Faaliyet Grubu	İş Kazası Sonucu Ölüm Sayısı	Oran (%)
İnşaat	Bina İnşaatı	207	18,05
Taşımacılık	Kara taşımacılığı ve boru hattı taşımacılığı	184	16,04
İnşaat	Bina Dışı Yapıların İnşaatı	105	9,15
İnşaat	Özel İnşaat Faaliyetleri	56	4,88
Ticaret	Toptan ticaret. motorlu kara taşıtları ve motosikletler hariç	34	2,96
Metal	Makine ve teçhizat hariç. fabrikasyon metal ürünleri imalatı	31	2,70
Temizlik	Binalar ve çevre düzenlemesi faaliyetleri	31	2,70
Maden	Diğer Madencilik ve Taşocakçılığı	28	2,44
Ticaret	Perakende ticaret (Motorlu kara taşıtları ve motosikletler hariç)	28	2,44
Gıda	Gıda ürünlerinin imalatı	27	2,35
İmalat	Diğer metalik olmayan mineral ürünlerin imalatı	24	2,09
Taşımacılık	Taşımacılık için depolama ve destekleyici faaliyetler	24	2,09
Gıda	Yiyecek ve içecek hizmeti faaliyetleri	22	1,92
Havalandırma Sistemleri	Elektrik gaz buhar ve havalandırma sistemi üretim ve dağıtımı	21	1,83
Tekstil	Tekstil ürünlerinin imalatı	20	1,74
Metal	Ana metal sanayii	19	1,66
Diğer Sektörler	SGK verilerindeki diğer 81 adet faaliyet grubuna ait sayılar	286	27,93
Toplam		1147	100

İnşaat sektörü, dinamik yapısından dolayı [6] çok sayıda faaliyet içermektedir. Her bir inşaat işi kendine özgü üretim aşamalarından ve faaliyetlerden oluşmaktadır. Bu nedenle çoğu zaman, çalışılan inşaat işine özgü güvenlik önlemi alınmasını gerektirmektedir. Proje bazlı üretimlerin gerçekleştirilmesi, işlerin yetiştirilmesi için zaman kısıtı bulunması, çok sayıda malzeme ve ekipman kullanımı gerektirmesi, iş gücünün çoğunluğunu vasıfsız işçilerin oluşturması gibi pek çok nedenden dolayı inşaat işleri çok sayıda değişkeni bünyesinde

İnşaat Sektöründeki İş Kazalarının Hata Ağacı Analizi ile Değerlendirilmesi

barındırmaktadır. Bu nedenle inşaat sektörünün dünyadaki en riskli sektör olduğunu söylemek mümkün olmaktadır [41, 42]. Yukarıda verilen tablolar incelendiğinde Türkiye’de de iş kazaları açısından en riskli sektörün inşaat sektörü olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 4 - Bilirkişi raporlarına göre iş kazalarının nedenleri [34]

Nedenler (ICD-10 kodu)	Ölüm	%	Yaralanma	%	Toplam	%
Düşmeler (W00–W19)	426	54,1	191	52,9	617	53,7
Fırlayan, düşen nesne çarpması (bina göçmesi, çökmeler hariç) (W20)	102	12,9	50	13,9	152	13,2
Bina/ yapı kısmı çökmesi (W20)	78	9,9	43	11,9	121	10,5
Elektriğe maruz kalma (W85–87)	59	7,5	15	4,2	74	6,4
Göçmeler (kazı sırasında veya sonrasında) (W20)	36	4,6	10	2,8	46	4,0
Diğer tip kazalar (W25–31, W68–70, W73–74, X40–40)	26	3,3	11	3,0	37	3,2
Ağır ekipman kazaları (W24 ve V09.0)	21	2,7	5	1,4	26	2,3
Ağır ekipman düşmeleri (W24 ve V09)	13	1,6	2	0,6	15	1,3
Duman, ateş ve aleve maruz kalma (X00–X09) ve patlama (W36, 40)	12	1,5	11	3,0	23	2,0
W23 Nesnelerin içinde veya arasında sıkışma, ezilme	11	1,4	4	1,1	15	1,3
Şantiye içi trafik kazaları (W01–09)	3	0,4	4	1,1	7	0,6
Makine parçası arasına sıkışma/ uzuv kaptırma (W23)	1	0,1	15	4,2	16	1,4
Toplam	788		361		1.149	

SGK tarafından her yıl bir önceki yıla ait iş kazası verileri ayrıntılı bir şekilde paylaşılmasına rağmen sektörlere göre iş kazası tipleri ayrı ayrı ilan edilmemektedir. Sektörlere göre iş kazası tiplerinin incelenmesi daha detaylı bir çalışma gerektirmektedir. İş kazalarına ilişkin detaylara ulaşmak için kaza raporlarının ve tutanaklarının incelenmesi, mahkeme kararlarına

ulaşılması ve incelenmesi, kazanın gerçekleştiği firma ile iletişim sağlanarak bilgi alınması gibi zor ve zahmetli çalışma süreçleri gerekmektedir. Her ne kadar zaman içerisinde inşaat yöntemleri ve uygulamaları geliştirilmiş olsa bile kaza nedenlerinin özü aynı kalmaktadır [28]. Bu çalışma kapsamında da uygulamanın gerçekleştirilmesi için bir veri tabanı oluşturma fırsatı bulunmadığından literatürdeki çalışmalardan yararlanılmıştır.

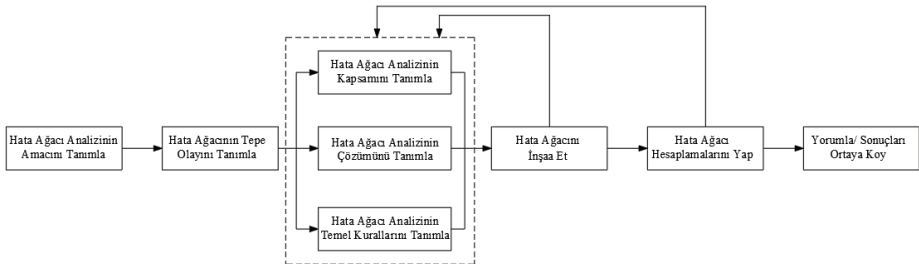
Bu çalışmada Güranlı ve Müngen (2013) [34] tarafından incelenen 1117 adet bilirkişi raporunda yer alan, ölüm ve yaralanma ile sonuçlanan 1149 adet iş kazasına ait verilerden yararlanılmıştır. Güranlı ve Müngen (2013) [34] tarafından incelenen kazalar kaza sonucuna, zamanına, ana sebeplerine, inşaat tipine, kazazedenin mesleğine, kaza anındaki faaliyetine ve kazadan sorumlu tarafa göre sınıflandırılmıştır. Kaza nedenleri hastalıkların ve sağlık sorunlarının uluslararası sınıflandırma sistemi ICD-10'a (International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems) göre sınıflandırılmıştır (Tablo 4). Hata ağacı uygulaması yapılırken Tablo 4'teki iş kazası verilerinden yararlanılmıştır.

3. YÖNTEM

3.1. Hata Ağacı Analizi

Hata ağacı analizi yöntemi, 1962 yılında Amerika Birleşik Devletleri Hava Kuvvetlerine ait füze fırlatma kontrol sisteminin güvenlik analizi için Bell Laboratuvarları tarafından geliştirilmiştir [43]. Yöntem, 1966 yılından itibaren ticari bir şirket olan Boeing tarafından ticari uçakların geliştirilmesi için kullanılmaya başlanmıştır. İlerleyen yıllarda nükleer enerji sanayisinde, kimya, otomotiv, demiryolu taşımacılığı, robotik gibi alanlarda kullanımı yaygınlaşmıştır [44]. Hemen hemen her sektörde kaza araştırmalarında kullanılmakta olan hata ağacı analizi, her tehlike durumunun varlığında uygulanmamaktadır, sadece kritik olan güvenlik tehlikeleri için uygulanmaktadır [44].

Hata ağacı analizi, sistem güvenliğinin ölçülmesinde kullanılan etkili bir yöntemdir. Bir sistemdeki istenmeyen bir durumun ortaya çıkma olasılığının ve istenmeyen duruma neden olan kök olayların belirlenebildiği analitik bir teknik olarak tanımlanmaktadır [45, 46]. Hata ağacı, istenmeyen olayın meydana gelmesine neden olabilecek çeşitli paralel ve sıralı olay kombinasyonlarının ağaç şeklinde grafiksel olarak ifade edildiği modeldir [45, 46]. Hata ağacı analizi ile tümdengimsel bir yaklaşım yapılmaktadır. Tümdengelimli sistem analizinde, sistemde bir hatanın var olduğu varsayılarak bu hataya neden olan kök nedenler araştırılmaktadır. Bu nedenle bu yaklaşım "Sherlock Holmes" yaklaşımı olarak da adlandırılmaktadır [45]. Hata ağacı analizinin adımları Şekil 1'de görülmektedir.



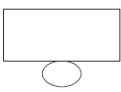



Şekil 1 - Hata ağacı analizi adımları [45]

Hata ağacı analizinde ilk olarak amaç belirlenmektedir. Daha sonra bu amaca bağlı olarak sistemin tepe olayı belirlenmektedir. Tepe olay genellikle sistemdeki istenmeyen olayı ifade etmektedir. Tepe olaya neden olabilecek sebepler belirlenerek bu sebeplerin hem birbirleriyle hem de tepe olay ile olan ilişkisi mantık kapıları aracılığıyla gösterilerek hata ağacı yapısı oluşturulmaktadır. Belirlenen sebeplerin varsa alt sebepleri de belirlenerek mantık kapıları ile birbirine bağlanmaktadır. Sistemin tepe olayının oluşmasında etkili olabilecek bütün temel olaylar belirlenene kadar ağaç yapısı oluşturulmaya devam edilmektedir. Temel olay, oluşması kendisinden başka bir sebebe bağlı olmayan olayı ifade etmektedir. Sistemdeki bütün temel olayların belirlenmesiyle hata ağacı yapısı tamamlanmaktadır. Hata ağacı hesaplamaları aşağıdan yukarıya doğru yapılmaktadır. Oluşturulan ağaç yapısı içerisindeki küçük ağaç yapıları minimum kesme kümeleri (minimal cut sets) olarak adlandırılmaktadır.

Bir hata ağacı oluşturulurken çeşitli sembollerden yararlanılmaktadır. Tablo 5'te hata ağacı oluşturulurken kullanılan semboller gösterilmektedir.

VE ve VEYA kapısı olmak üzere iki temel hata ağacı kapısı bulunmaktadır. Diğer tüm kapılar bu iki temel kapının özel durumlarını ifade etmektedir. Bu çalışma kapsamında da VE ve VEYA mantık kapıları kullanılarak hata ağacı yapısı oluşturulmuştur.

Tablo 5 - Hata ağacı sembolleri [45-47]

Olay Sembolleri	
	Temel (Basit) Olay: Geliştirme gerektirmeyen temel bir olay
	Durumsal Olay: Mantık kapıları için geçerli özel durumların ve kısıtlamaların varlığı durumu ("önleme" ve "öncelikli ve" kapıları ile birlikte kullanılır)
	Gelişmemiş Olay: Yetersiz bir sonucu olduğu için ya da bilgi mevcut olmadığı için daha fazla geliştirilemeyen olay
	Harici Olay: Gerçekleşmesi beklenen olay
Kapı Sembolleri	
	Ve Kapısı: Girdi hatalarının tamamı birlikte oluşursa çıktı hatası oluşur
	Veya Kapısı: Girdi hatalarından en az biri oluşursa çıktı hatası oluşur
	Kombinasyon Kapısı: Girdi hatalarından n tanesi oluşursa çıktı hatası oluşur

Tablo 5 - Hata ağacı sembolleri [45-47]

Kapı Sembolleri	
	Özel Veya Kapısı: Girdi hatalarından özel olarak biri oluşursa çıktı hatası oluşur
	Öncelikli Ve Kapısı: Tüm girdi hataları oluşursa çıktı hatası oluşur
	Önleme Kapısı: Durumsal olayın girdi hatası oluşursa çıktı hatası oluşur
Transfer Sembolleri	
	İçeri Transfer: Ağacın başka bir yerde (örneğin başka bir sayfada) daha da geliştirildiğini gösterir.
	Dışarı Transfer: Ağacın bu bölümünün içeri transfer bölümüne eklenmesi gerektiğini gösterir.

Hata ağacı analizi hem nitel hem de nicel bir analizdir. Nicel analiz aşamasında hataların olasılık değerleri belirlenerek mantık kapıları arasındaki yayılma tespit edilmektedir. Nitel analiz aşamasında ise minimum kesme kümesi değerlendirmesi yapılmaktadır. Uygulama yapılırken Boolean matematiği kullanılmaktadır. Boolean matematiği kuralları Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6 - Boolean Matematiği Kuralları [45, 48]

Tanım	Kural
Değişebilirlik (Commutative) Yasası	1a. $X \cdot Y = Y \cdot X$ 1b. $X + Y = Y + X$
Birleşme (Associative) Yasası	2a. $X \cdot (Y \cdot Z) = (X \cdot Y) \cdot Z$ 2b. $X + (Y + Z) = (X + Y) + Z$
Dağılım (Distributive) Yasası	3a. $X \cdot (Y + Z) = X \cdot Y + X \cdot Z$ $X \cdot (Y + Z) = X \cdot Y + X \cdot Z$ 3b. $X + Y \cdot Z = (X + Y) \cdot (X + Z)$
Özdeşlik (Idempotent) Yasası	4a. $X \cdot X = X$ 4b. $X + X = X$
Soğurma (Absorption) Yasası	5a. $X \cdot (X + Y) = X$ 5b. $X + X \cdot Y = X$
de Morgan's Teoremi	6a. $(X \cdot Y)' = X' + Y'$ 6b. $(X + Y)' = X' \cdot Y'$

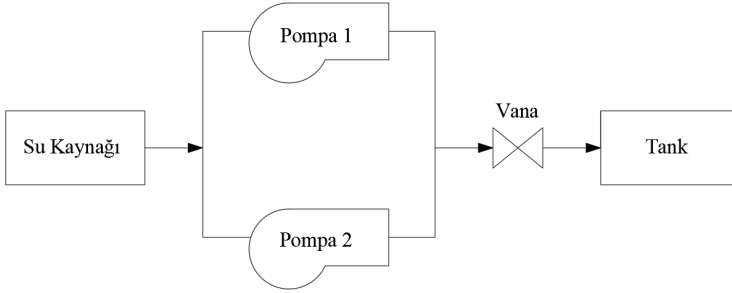
Bir hata ağacı analizinde tepe olayın olasılığını hesaplamak için Tablo 6'da verilen kurallardan yararlanılmaktadır. Tepe olayın olasılığını hesaplamak için hata ağacındaki her bir temel olayın olasılığının hesaplanması gerekmektedir. Temel olayın olasılıkları Boolean matematiği kullanılarak tepe olaya yayılmaktadır. Tepe olayın olasılığı aşağıdaki gibi belirlenmektedir:

$$P(\text{Tepe}) = \sum P(M_i) \quad (2)$$

$$P(M_i) = P(\text{TO}_1)P(\text{TO}_2)\dots P(\text{TO}_k) \quad (3)$$

Burada P olasılığı; Tepe, tepe olayı; M_i , belirli bir minimum kesme kümesini; TO, temel olayı; k, minimum kesme kümesi sayısını ifade etmektedir.

Aşağıda hata ağacı analizi basit bir örnek üzerinde gösterilmiştir (Şekil 2).



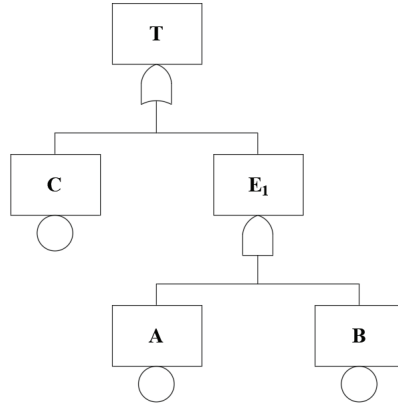
Şekil 2 - Su kaynağı sistemi örneği [45]

Şekil 2’de su kaynağından tanka Pompa 1, Pompa 2 ve vana aracılığıyla su akışı gerçekleşmektedir. Bu sistemde istenmeyen olay, su kaynağından tanka su akışının gerçekleşmemesidir. Bu durumda tanka su akışının olmaması sistemin tepe olayı olacaktır. Tepe olayın ortaya çıkmasının sebepleri Pompa 1’in ve Pompa 2’nin çalışmaması veya vananın kapalı olması durumlarıdır. Pompa 1 ve Pompa 2’nin çalışmama durumu VE mantık kapısı ile vananın kapalı olması ise VEYA mantık kapısı ile modellenerek hata ağacı yapısı oluşturulabilir. Bu sisteme ait hata ağacı yapısı Şekil 3’te gösterilmektedir.

Şekil 3’te T, tepe olaydır ve tanka su akışının olmamasını ifade etmektedir. T’nin gerçekleşmesi için i) Vana kapalı olmalıdır. Şekil 3’te C ile gösterilen bu olay temel bir olaydır ve gerçekleşmesi için başka bir olayın varlığı gerekmemektedir. ii) Pompa 1’in (A) ve Pompa 2’nin (B) çalışmaması gerekmektedir. Bu durumda A ve B’nin çalışmaması durumu VE mantık kapısı ile ilişkilendirilmiştir. E_1 , A ve B olaylarının oluşturduğu yapı kendi içinde küçük bir hata ağacı yapısıdır ve Şekil 3’teki sistemin tamamına bakıldığında bir minimum kesme kümesini temsil etmektedir. E_1 , bu minimum kesme kümesinin tepe olayıdır. Şekil 3’teki sistemde, E_1 veya C’nin varlığı durumunda da T tepe olayı ortaya çıkacaktır.

Şekil 3’te verilen hata ağacı yapısının temel olayı T’nin olasılığı Eşitlik 2 ve Eşitlik 3’ten yararlanılarak hesaplanabilmektedir. T’nin oluşması için C VEYA E_1 ’in oluşması gerekir. VEYA kapısının Boolean eşdeğeri “+” sembolüdür. Bu kapiya bağlı bir veya daha fazla olayın gerçekleşmesi durumunda kapı üzerindeki olay gerçekleşmektedir. Bu durum $T = C + E_1$ olarak ifade edilir. E_1 ’in tepe olay olduğu minimum kesme kümesinin oluşması için de A VE B’nin oluşması gerekir. VE kapısının Boolean eşdeğeri “•” sembolüdür. Bu kapiya bağlı olayların tümünün gerçekleşmesi durumunda kapı üzerindeki olay meydana gelmektedir. Bu durumda $E_1 = A \cdot B$ olarak ifade edilir. Sonuç olarak $T = C + A \cdot B$ olacaktır.

Olasılık açısından C ve E_1 olaylarının birleşimleri $P(C \text{ veya } E_1) = P(T) = P(C) + P(E_1) - P(C \cap E_1)$ ve $P(A \text{ ve } B) = P(E_1) = P(A) \cdot P(B)$ olarak ifade edilecektir.



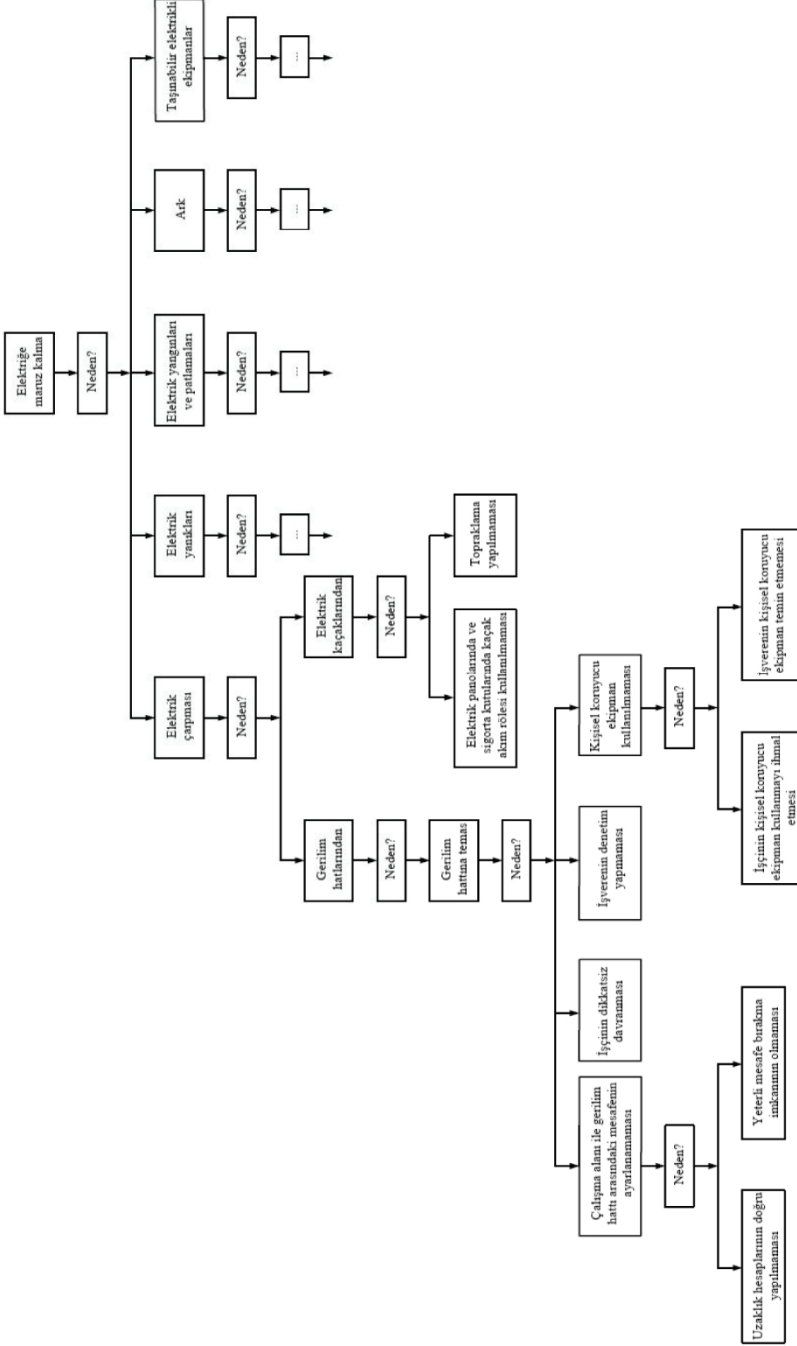
Şekil 3 - Su kaynağı sistemi örneğine ait hata ağacı yapısı

3.2. Hata Ağacı Analizinin Probleme Uygulanması

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi bu çalışma kapsamında hata ağacının uygulaması gerçekleştirilirken Güranlı ve Müngen (2013) [34] tarafından sınıflandırılan iş kazası verilerinden yararlanılmıştır. İlgili çalışma kapsamında incelenen iş kazalarından düşmelerin sebepleri detaylı olarak incelenerek bir analiz gerçekleştirilmiştir. Tepe olayın iş kazası olarak ele alındığı bu çalışma kapsamında, diğer iş kazası tiplerinin kök nedenleri belirlenirken tepe olaya sebep olan temel olayların belirlenebilmesi için 5 neden analizinden yararlanılmıştır. Böylece detaylarına ulaşılabilen diğer kaza tiplerinin kök sebepleri belirlenmiştir. 5 neden analizi ile elde edilen kök sebepler, temel olay ve gelişmemiş olaylar olarak belirlenmiştir. Yeterli bilgiye sahip olunmaması nedeniyle daha fazla geliştirilemeyen olaylar hata ağacı yapısı içerisinde gelişmemiş olaylar olarak gösterilmiştir.

5 neden analizi problemlerin kök nedenlerinin bulunmasında kullanılan bir yöntemdir [49]. Bir sorunun gerçek nedeninin net olmadığı durumlarda kullanılmaktadır. 5 neden analizi yapılırken ilk olarak problem tanımlanır. Bu probleme sebep olan nedenler yazılır. Nedenlerin neden ortaya çıktığı cevaplanır. Problemin ortaya çıkmasına sebep olan esas neden bulununcaya kadar “neden?” sorusu sorulmaya devam edilir [50]. “Neden?” sorusu bazı durumlarda 5 defadan daha az sorulabileceği gibi daha fazla da sorulabilir. Burada amaç kök neden analizi ile kazaya neden olan kök nedenlerin bulunmasını sağlayarak kazaları mümkünse önlemek veya azaltmaktır.

Şekil 4’te elektriğe maruz kalma iş kazası tipinin kök nedenlerini bulmada 5 neden analizi uygulaması gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında ele alınan iş kazalarının kök nedenlerini ayrıntılı inceleme fırsatı bulunmadığından 5 neden analizini kullanma yoluna gidilmiştir. Şekil 4’te gösterilen yöntem kök nedenlerine ulaşmak istenen diğer iş kazası tipleri için de uygulanarak Tablo 7 oluşturulmuştur.



Şekil 4 - Elektrikle maruz kalma iş kazasında kök sebebi bulmada 5 neden analizi uygulaması

Tablo 7 - Hata ağacı analizinde kullanılan kaza tipleri, hatalar ve olaylar (1)

Tepe Olay	Kaza Tipi	Hata (Gösterim)	Temel Olaylar ve Gelişmemiş Olaylar (Gösterim)	Temel Olaylar ve Gelişmemiş Olaylar (Gösterim)	Temel Olaylar ve Gelişmemiş Olaylar (Gösterim)
İş Kazası	Düşmeler	İskeleden düşmeler (E1)	İskele üzerinde çalışırken denge kaybı (A1) Kalasların kırılması (A2) İskelenin çökmesi (A3) İskele kurulumu (A4) İskele sökümü ve sipa iskelenin kırılması (A5) Sipa iskelede çalışırken denge kaybı (A6) İskeleden diğer ve tanımlanmayan düşmeler (A7)	İskelede merdiven olmaması (B1)	İşçinin emniyet kemeri kullanmayı ihmal etmesi (C1) İşverenin emniyet kemeri temin etmemesi (C2)
				Emniyet kemeri olmaması (B2)	
				İskelede korkuluğun olmaması (B3)	
				İskele bakımının yapılmaması (D1)	
				İskele hesabının yapılmaması (D2)	
				Denetim eksikliği (D3)	
				Korkuluk bulunmaması (G1)	
				İşçinin emniyet kemeri kullanmayı ihmal etmesi (G2)	
				İşverenin emniyet kemeri temin etmemesi (G3)	
				Düşmelerden veya platform kenarlarından düşmeler (E2)	

Tablo 7 - Hata ağacı analizinde kullanılan kaza tipleri, hatalar ve olaylar (Devamı) (2)

Tepe Olay	Kaza Tipi	Hata (Gösterim)	Temel Olaylar ve Gelişmemiş Olaylar (Gösterim)	Temel Olaylar ve Gelişmemiş Olaylar (Gösterim)
İş Kazası	Düşmeler	Döşemelerden veya platform kenarlarından düşmeler (E2)	Kalıp montajı sırasında döşeme kenarlarından düşme (F2)	Kalıp montajının uygun yapılmaması (G4) Malzeme alım işleminin uygun yapılmaması (G5)
			Çelik halatlı basit vinç/makara yüklemesi veya boşaltılması sırasında düşme (F3)	
			Pencere veya kapı açıklıklarından düşme (F4)	
			Yıkım faaliyetleri sırasında döşeme kenarından düşme (F5)	
			Basit çelik halatlı vinç/makara çalıştırma esnasında düşme (F6)	
			Basit çelik halatlı vinç/makara kurulumu sökülümü esnasında düşme (F7)	
			Zemin ve asansör açıklıklarından düşmeler (E3)	

Tablo 7 - Hata ağacı analizinde kullanılan kaza tipleri, hatalar ve olaylar (Devamı) (3)

Tepe Olay	Kaza Tipi	Hata (Gösterim)	Temel Olaylar ve Gelişmemiş Olaylar (Gösterim)	Temel Olaylar ve Gelişmemiş Olaylar (Gösterim)	Temel Olaylar ve Gelişmemiş Olaylar (Gösterim)	
İş Kazası	Düşmeler	Çatıdan düşmeler (E4)	Çatı kaplama malzemelerinin veya çatı pencerelerinin kırılması (H1)	Korkuluk bulunmaması (I1)	Uygun olmayan malzeme kullanılması (I2)	
				İşçinin emniyet kemeri kullanılmaması (J1)		
			Eğimli çatılarda denge kaybı (H3)	Çatı yapımı aşamasında denge kaybı (H2)	İşçinin emniyet kemeri kullanılmaması (J2)	İşçinin emniyet kemeri kullanılmaması (K1)
					İşçinin emniyet kemeri kullanılmaması (K2)	
		Deliklere ve çukurlara düşmeler (E5)	Çatılardan diğer ve tanımlanmayan düşmeler (H4)	Korkuluk bulunmaması (L1)	Güvenlik ağı bulunmaması (L2)	
						Taşınır veya kat merdivenlerinden düşmeler (E6)
		Şevlere düşmeler (E8)	Diğer ve tanımlanmayan düşmeler (E9)	Diğer ve tanımlanmayan düşmeler (E9)		

Tablo 7 - Hata ağacı analizinde kullanılan kaza tipleri, hatalar ve olaylar (Devamı) (4)

Tepe Olay	Kaza Tipi	Hata (Gösterim)	Temel Olaylar ve Gelişmiş Olaylar (Gösterim)	Temel Olaylar ve Gelişmiş Olaylar (Gösterim)	Temel Olaylar ve Gelişmiş Olaylar (Gösterim)	
İş Kazası	Fırlayan, düşen nesne çarpması	Vinç kurulumu (E10)				
		Malzeme sıçraması (taş, çivi, el aleti, odun talaşı vb.) (E11)				
		Malzeme düşmesi (E12)				
	Bina/ yapı kısmı çökmesi	Kalıp montajının yanlış yapılması (E13)				
		Kalıpların erken sökülmesi (E14)				
		İskelelerin erken sökülmesi (E15)				
		Duvar göçmesi (E16)				
	Elektriğe maruz kalma	Elektrik çarpması (E17)				İnsandan insana elektrostatik akış (M1) İstemsiz kas reaksiyonları (M2)
		Elektrik yanıkları (E18)				
		Elektrik yangınları ve patlamaları (E19)				

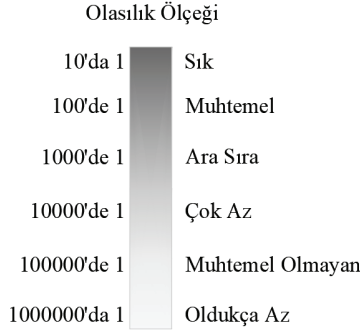
Tablo 7 - Hata ağacı analizinde kullanılan kaza tipleri, hatalar ve olaylar (Devamı) (5)

Tepe Olay	Kaza Tipi	Hata (Gösterim)	Temel Olaylar ve Gelişmemiş Olaylar (Gösterim)	Temel Olaylar ve Gelişmemiş Olaylar (Gösterim)	Temel Olaylar ve Gelişmemiş Olaylar (Gösterim)
İş Kazası	Elektriğe maruz kalma	Arık (E20)	İletim hatlarından ağır ekipmanlara gelen ark (N1)	İşçinin kişisel koruyucu ekipman kullanmayı ihmal etmesi (P1)	
			İletim hatlarına temas (N2)		
	Göçmeler (kazi sırasında veya sonrasında)	Taşınabilir elektrikli ekipmanlar (E21)	Kişisel koruyucu ekipmanların kullanılmaması (O1)	İşverenin kişisel koruyucu ekipman temin etmemesi (P2)	
			Ekipman kontrolünün yapılmaması (O2)		
	Diğer tip kazalar	Toprak kayması (E22)	Şev hesabının doğru yapılmaması (R1)		
			Denetim eksikliği (R2)		
			Kazi yüzeyleri için iksa yapılmaması (E23)		
	Ekipmanların sebep olduğu kazalar	Ağır ekipman kazaları (E24)	Ekipmanın uygun kullanılmaması (S1)		
			Ekipman kontrolünün yapılmaması (S2)		
			Ağır ekipman düşmeleri (E25)		

Tablo 7 - Hata ağacı analizinde kullanılan kaza tipleri, hatalar ve olaylar (Devamı) (6)

Tepe Olay	Kaza Tipi	Hata (Gösterim)	Temel Olaylar ve Gelişmemiş Olaylar (Gösterim)	Temel Olaylar ve Gelişmemiş Olaylar (Gösterim)	Temel Olaylar ve Gelişmemiş Olaylar (Gösterim)		
İş Kazası	Duman, ateş ve alev maruz kalma	Nesnelerin içinde veya arasında sıkışma, ezilme	Ekipman bakımının yapılmaması (E26)				
			Dikkatsizlik (E27)				
	Şantiye içi trafik kazaları	Araç çarpması (E28)	Araç devrilmesi (E29)			Aşırı hız (T1)	
		Araç devrilmesi (E29)					
		Trafik kazası (E30)					Dikkatsizlik (T2)
		Trafik kazası (E30)					Trafik işaretlerinin bulunmaması (T3)
	Makine parçası arasına sıkışma/uzuv kaptırma	Denetim eksikliği (E32)	Ekipman bakımının yapılmaması (E31)				
			Denetim eksikliği (E32)				
			Dikkatsizlik (E33)				
			Dikkatsizlik (E33)				

Hata ağacı yapısını oluştururken Tablo 7’de verilen kaza tipleri, hatalar ve olaylardan yararlanılmıştır. Tablo 4’te verilen ölüm ve yaralanma oranları ile Şekil 5’te verilen olasılık ölçeğinden yararlanılarak temel olayların ve gelişmemiş olayların olasılık değerleri, hata ağacı analizinde kullanılan yazılıma girilmiştir.



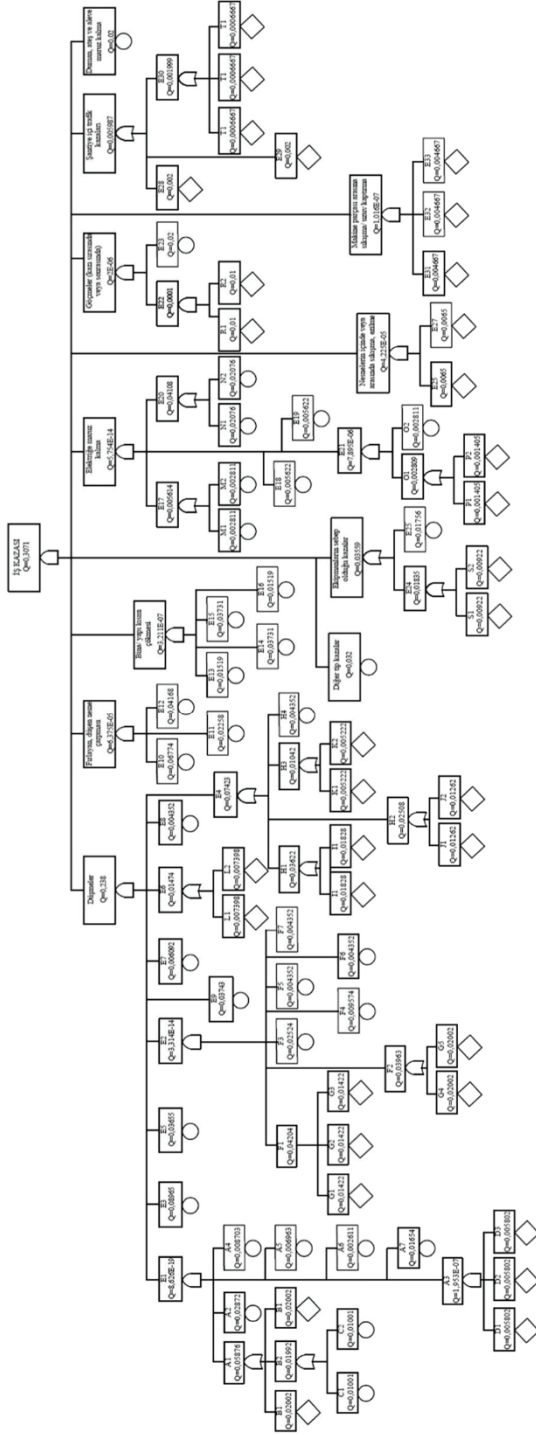
Şekil 5 - Olasılık Ölçeği [51]

Yazılım aracılığıyla oluşturulan hata ağacındaki minimum kesme kümelerinin ve tepe olayın olasılık değerleri hesaplanmıştır. Bu değerlerin hesaplanmasında yazılım, önceki bölümlerde detaylarına değinilen Boolean matematiğinden yararlanmaktadır.

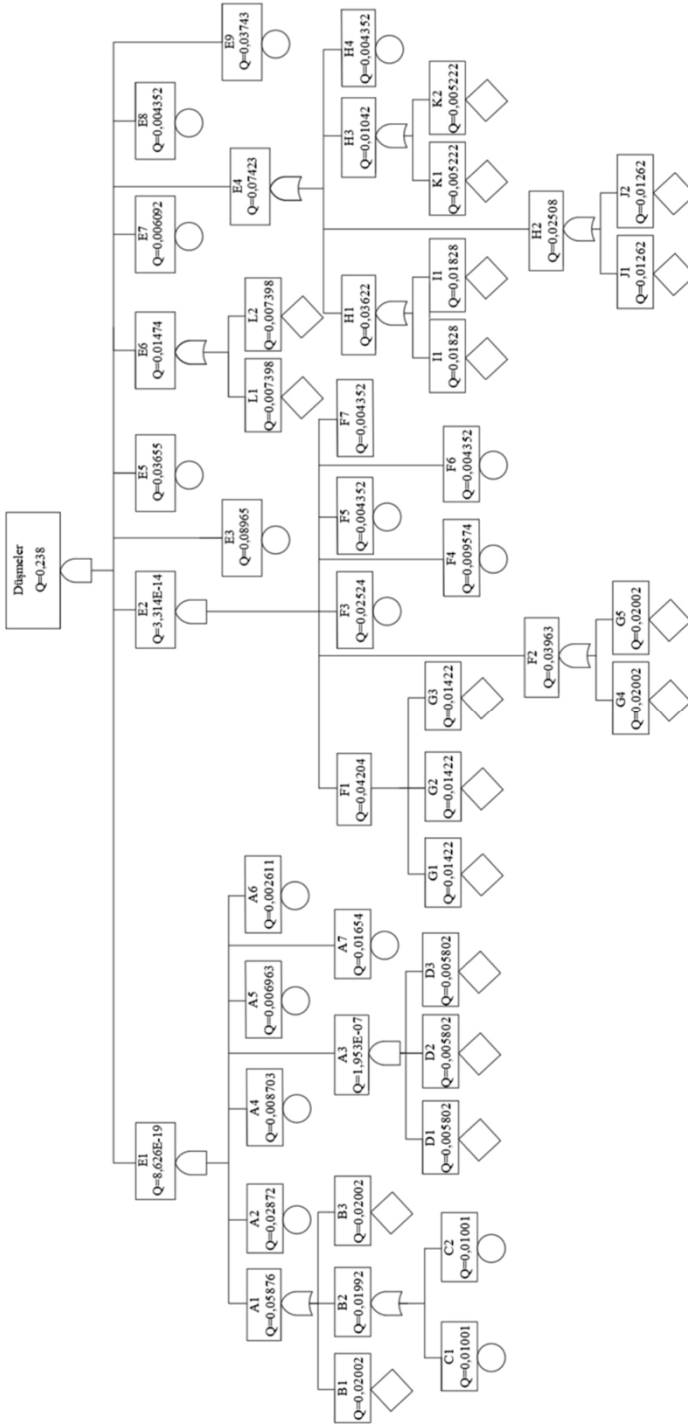
Tablo 7’deki bilgiler kullanılarak oluşturulan hata ağacı Şekil 6’da, minimum kesme kümeleri ise sırasıyla Şekil 7, Şekil 8, Şekil 9 ve Şekil 10’da görülmektedir. Gerçekleştirilen analiz sonucunda hesaplanan hata olasılığı değerleri de şekiller üzerinde görülmektedir. Tepe olayı iş kazası olan hata ağacının minimum kesme kümelerini Tablo 7’deki hata, temel ve gelişmemiş olaylar oluşturmaktadır.

Yapılan hesaplamalar sonucunda tepe olay olan iş kazasının olasılık değeri 0,3071 olarak hesaplanmıştır. Minimum kesme kümeleri ayrı ayrı incelendiğinde en yüksek hata olasılığı değerine düşmelerin sahip olduğu görülmektedir. Daha sonra sırasıyla ekipmanların sebep olduğu kazalar; diğer tip kazalar; duman, ateş ve aleve maruz kalma; şantiye içi trafik kazaları; fırlayan, düşen nesne çarpması; nesnelerin içinde veya arasında sıkışma, ezilme; göçmeler (kazı sırasında veya sonrasında); bina/ yapı kısmı çökmesi; makine parçası arasına sıkışma/ uzuv kaptırma; elektriğe maruz kalma kaza tipleri gelmektedir. Daha öncede belirtildiği gibi hata ağacı analizi hem nitel hem de nicel bir analizdir. Nitel analiz ile iş kazası sonucu ölüme veya yaralanmaya neden olan minimum kesme kümelerinin belirlenmesi sağlanmıştır. Nicel analiz ile de minimum kesme kümelerinin hata olasılığı değerlerinden yola çıkarak tepe olayın hata olasılığı değerine ulaşılmıştır.

Her bir minimum kesme kümesi tepe olayın ortaya çıkmasına neden olan temel ve gelişmemiş olayları içermektedir. Tepe olayın ortaya çıkmasını engellemek için temel ve gelişmemiş olayların engellenmesi gerekmektedir. Minimum kesme kümelerindeki temel ve gelişmemiş olaylar aracılığıyla tepe olayı ortaya çıkaran nedenler için kritik önem faktörü (critical importance factor- CIF) hesaplanabilmektedir. Literatürde Fussel-Vesely önemi olarak adlandırılan kritik önem faktörü hata ağacı analizinde sık başvurulan genel önem ölçütüdür [52]. Kritik önem faktörü, belirli bir olayla ilişkili riski, yani olayın meydana gelmesinin sistem hatasına ne kadar katkıda bulunduğunu göstermektedir.



Şekil 6 - Hata Ağacı Yapısı



Şekil 7 - Dişmeler kaza tipine ait minimum kesme kimmeleri

Hata ağacının analiz edilmesiyle elde edilen Fussel-Vesely önem ölçütüne göre hataların önem dereceleri Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 8 - Tepe olaya neden olan olayların Fussel-Vesely önem ölçütüne göre kritik önem faktörleri

HATA	Kritik Önem Faktörü	HATA	Kritik Önem Faktörü	HATA	Kritik Önem Faktörü
E3	0,222207	E10	0,00014387	P2	6,48781E-14
E9	0,0877345	E12	0,00014387	M1	6,48324E-14
E5	0,0856152	E11	0,00014387	M2	6,48324E-14
Diğer tip kazalar	0,0745964	E26	9,53429E-05	N1	6,42428E-14
Duman, ateş ve alev maruz kalma	0,0460519	E27	9,53429E-05	N2	6,42428E-14
I1	0,042011	E23	4,51309E-06	G4	3,70703E-14
I2	0,042011	R1	4,51309E-06	G5	3,70703E-14
E25	0,0403354	R2	4,51309E-06	G1	2,46085E-14
J1	0,0288414	E14	7,24568E-07	G2	2,46083E-14
J2	0,0288414	E15	7,24568E-07	G3	2,46081E-14
S1	0,0209978	E13	7,24568E-07	A2	2,1357E-18
S2	0,0209978	E16	7,24568E-07	D1	1,9473E-18
L1	0,0168183	E31	2,29332E-07	A7	1,94645E-18
L2	0,0168183	E32	2,29332E-07	A4	1,94645E-18
E7	0,0138311	E33	2,29332E-07	A5	1,94645E-18
K1	0,0118456	E18	1,29847E-13	D2	1,94645E-18
K2	0,0118456	E19	1,29847E-13	D3	1,94645E-18
H4	0,0098634	O2	1,29847E-13	A6	1,94645E-18
E8	0,0098634	F3	7,48976E-14	B1	0
E28	0,00452213	F4	7,48976E-14	B3	0
E29	0,00452213	F5	7,48976E-14	C1	0
T1	0,00150537	F6	7,48976E-14	C2	0
T2	0,00150537	F7	7,48976E-14		
T3	0,00150537	P1	6,48781E-14		

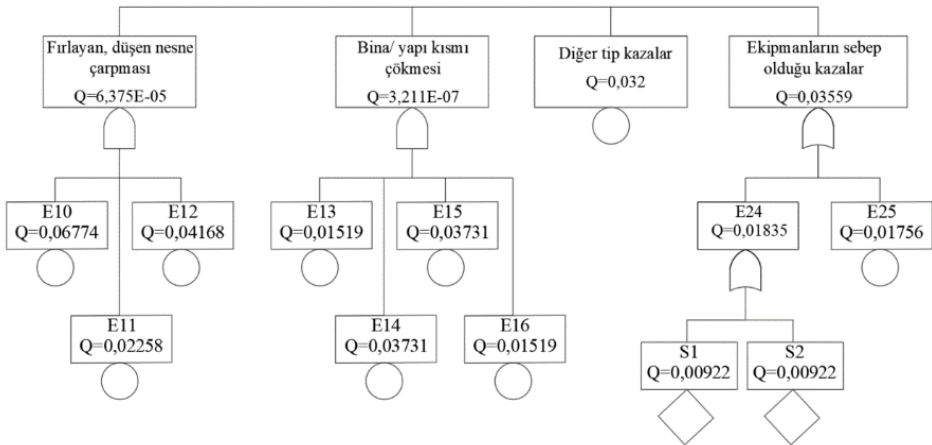
Kritik önem faktörleri aşağıdaki eşitlik aracılığıyla hesaplanabilmektedir.

$$CIF_x(t) = \frac{q_x(t)MIF_x(t)}{Q(t)} = \frac{Q(t) - Q(t)|_{q_x=0}}{Q(t)} \quad (4)$$

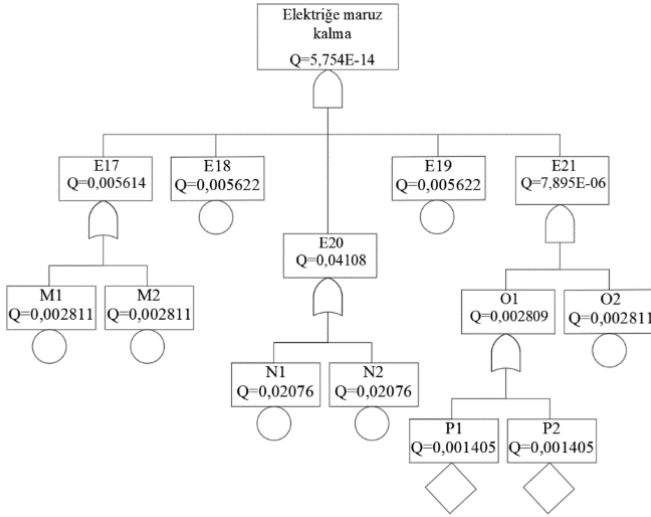
Burada CIF, kritik önem faktörünü; $Q(t)$, mantık kapısının hata olasılığını; $q_x(t)$, x olayının hata olasılığını; $MIF_x(t)$ marjinal önem faktörünü; $Q(t)|_{q_x=0}$, $q_x=0$ iken hata olasılığını göstermektedir. MIF, bir x olayı meydana geldiğindeki hata olasılığı ile meydana gelmeme durumundaki hata olasılığı arasındaki farkı ifade etmektedir. Bu çalışma kapsamında bu değerler analiz yapılan yazılım aracılığıyla elde edilmiştir.

Tablo 8'deki değerler önem sıralamasına göre verilmiştir. E3 ile kodlanan zemin ve asansör açıklıklarından düşmeler en büyük kritik önem faktörü değerine sahiptir. Örneğin, diğer ve tanımlamayan düşmeler (E9); deliklere ve çukurlara düşmeler (E5) temel olayları, çatı kaplama malzemelerinin veya çatı pencerelerinin kırılması (H1) minimum kesme kümesine ait korkuluk bulunmaması (I1), uygun olmayan malzeme kullanımı (I2); ağır ekipman düşmeleri (E25) gibi iş kazalarının kritik önem faktörü değerleri diğer kazalara nispeten daha yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte iskele üzerinde çalışırken denge kaybı (A1) minimum kesme kümesi yapısı içerisinde yer alan iskelede merdiven olmaması (B1), iskelede korkuluğun olmaması (B3), işçinin emniyet kemerini kullanmayı ihmal etmesi (C1), işverenin emniyet kemeri temin etmemesi (C2) temel ve gelişmemiş olayları en düşük kritik önem faktörü değerlerine sahiptir.

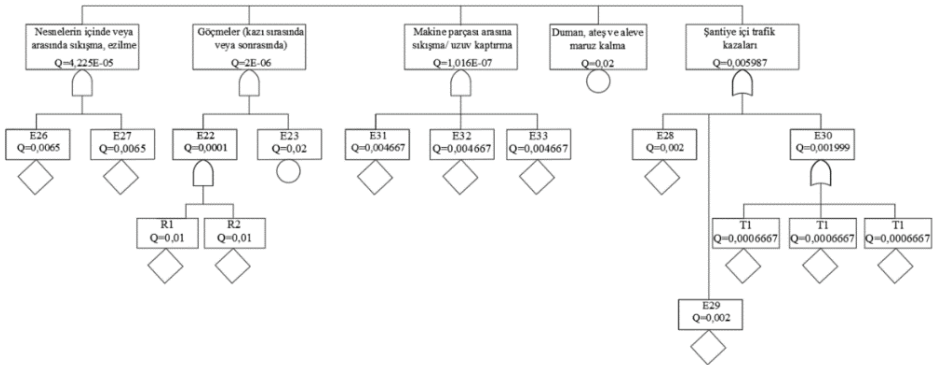
Buradaki kritik önem faktörlerinin sıralamasını iş kazalarının önlenmesinde veya azaltılmasında önlem alınması gereken sıra şeklinde değerlendirmek mümkün olabilecektir. Çalışmada Türkiye'de meydana gelen iş kazaları ele alındığından, yapılan analiz çalışması ile elde edilen sayısal değerlerin kazalara karşı alınacak önlemlerle ilgili göreceli bir sıralama sunduğu düşünülmektedir.



Şekil 8 - Fırlayan düşen nesne çarpması; bina/yapı kısmı çökmesi; diğer tip kazalar; ekipmanların sebep olduğu kazalar; kaza tiplerine ait minimum kesme kümeleri



Şekil 9 - Elektriğe maruz kalma kaza tipine ait minimum kesme kümeleri



Şekil 10 - Nesnelerin içinde veya arasında sıkışma, ezilme; göçmeler (kazı sırasında veya sonrasında); makine parçası arasına sıkışma/ uzuv kaptırma; duman, ateş ve alev maruz kalma; şantiye içi trafik kazaları; kaza tiplerine ait minimum kesme kümeleri

4. SONUÇ

Bu çalışma kapsamında, Güranlı ve Müngen (2013) tarafından incelenmiş olan 1449 adet iş kazasına ait verilerden yararlanılarak bir hata ağacı analizi gerçekleştirilmiştir. Güranlı ve Müngen (2013) kapsamında verilen kök nedenler olduğu gibi kullanılmış, kök nedenleri verilmeyen kazalar için de 5 neden analizi yönteminden yararlanılarak hata ağacı yapısı oluşturulmuştur. İş kazası sayılarından yola çıkarak temel ve gelişmemiş olayların olasılık değerleri belirlenmiştir. Hata ağacı analizinde tümdengimsel bir yaklaşım gerçekleştirildiğinden hata ağacı yapısında aşağıdan yukarıya doğru Boolean matematiği

aracılığıyla hesaplamalar yapılarak minimum kesme kümelerinin ve en son olarak tepe olayın hata olasılığı değeri belirlenmiştir.

Bu çalışma ile elde edilen hata ağacı modeli kazaları ve nedenlerinin görsel olarak sunulmasına imkan sağlamaktadır. İnşaatlarda yaşanan iş kazalarıyla ilgili alınacak önlemler sıralamasında dikkate alınabilecek sayısal veriler içermektedir. Minimum kesme kümelerinin hata olasılığı değerleri dikkate alınarak bir önlem sıralaması yapılabilir. Diğer bir önlem alma seçeneği ise çalışma kapsamında sunulan kritik önem faktörleridir. Kritik önem faktörleri önlem almada sıralama ölçeği olarak değerlendirilebilir.

İnşaat sektöründe iş kazaları halen güncelliğini koruyan önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. İş kazalarının çeşitli yöntemlerle analiz edilmesi sektörde önlem alınması gereken kritik noktaları belirlemek açısından önemlidir. Pek çok sektörde kaza ve risk analizi yaparken kullanılan hata ağacı analizi, bu çalışma kapsamında Türkiye’de inşaat sektöründeki iş kazalarının analizi için kullanılmıştır. Hata ağacı analizinin, inşaat sektöründeki iş kazalarının analizinde etkin bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Gelecekteki çalışmalarda farklı iş kazalarının incelenmesiyle güncel veritabanları oluşturulabilir ve bu veriler ile hata ağacı analizi gerçekleştirilebilir.

Kaynaklar

- [1] <https://www.ilo.org/>, Son Erişim Tarihi: 04.07.2021
- [2] 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, 2012.
- [3] Carter G., Smith, S., Safety Hazard Identification on Construction Projects, J. Constr. Eng. Manag., 132(2), 197-205, 2006.
- [4] Hinze, J., Thurman, S., Wehle, A., Leading Indicators of Construction Safety Performance, Safety Science, 51(1), 23-28, 2013.
- [5] Yang, K., Ahn, C. R., Kim, H., Validating Ambulatory Gait Assessment Technique for Hazard Sensing in Construction Environments, Automation in Construction, 98, 302-309, 2019.
- [6] Hallowell, M. R., Gambatese, J. A., Construction Safety Risk Mitigation. J. Constr. Eng. Manag., 135(12), 1316-1323, 2009.
- [7] Sousa, V., Almeida, N. M., Dias, L. A., Risk-Based Management of Occupational Safety and Health in the Construction Industry - Part 1: Background Knowledge, Safety Science, 66, 75-86, 2014.
- [8] Müngen, U., İnşaat Sektörümüzdeki Başlıca İş Kazası Tipleri, Türkiye Mühendislik Haberleri, 469, 32-39, 2011.
- [9] Filho, J. M. J., Fonseca, E. D., Lima, F. P. A., Duarte, F. J. C. M., Organizational Factors Related to Occupational Accidents in Construction, Work, 41, 4130-4136, 2012.
- [10] Carrillo-Castrillo, J. A., Trillo-Cabello, A. F., Rubio-Romero, J. C., Construction Accidents: Identification of the Main Associations Between Causes, International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, 23(2), 240-250, 2017.

- [11] Mohammad M. Z., Hadikusumo, B. H. W., A Model of Integrated Multilevel Safety Intervention Practices in Malaysian Construction Industry, *Procedia Engineering*, 171, 396-404, 2017.
- [12] Hoła, B., Szóstak, M., An Occupational Profile of People Injured in Accidents at Work in the Polish Construction Industry, *Procedia Engineering*, 208, 43-51, 2017.
- [13] Shuang, D., Heng, L., Skitmore, M., Qin, Y., An Experimental Study of Intrusion Behaviors on Construction Sites: The Role of Age and Gender, *Safety Science*, 115, 425-434, 2019.
- [14] Abas, N., H., Noridan, M., R., Rahmat, M. H., Abas, N. A., Ibrahim, N. Q., Causes of Accidents Involving Scaffolding at Construction Sites, *Journal of Technology Management and Business*, 7(1), 75-86, 2020.
- [15] Halim, N. N. A. A., Jaafar, M. H., Kamaruddin, M. A., Kamaruzaman, N. A., Singh, P. S. J., The Causes of Malaysian Construction Fatalities, *Journal of Sustainability Science and Management*, 15(5), 236-256, 2020.
- [16] Etiler N, Çolak B, Biçer U, Barut N., Fatal Occupational Injuries Among Workers in Kocaeli, Turkey, 1990-1999, *Int J Occup Environ Health*, 10(1), 55-62, 2004.
- [17] Çavuş, A., Taçgın, E., Türkiye’de İnşaat Sektöründeki İş Kazalarının Sınıflandırılarak Nedenlerinin İncelenmesi, *Academic Platform Journal of Engineering and Science (APJES)*, 4(21), 13-24, 2016.
- [18] Cameron, I., Gillan, G., Duff, A.R., Issues in the Selection of Fall Prevention and Arrest Equipment, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 14(4), 363-374, 2007.
- [19] Wu, W., Yang, H., Li, Q., Chew, D., An Integrated Information Management Model for Proactive Prevention of Struck-by-Falling-Object Accidents on Construction Sites, *Automation in Construction*, 34, 67-74, 2013.
- [20] Behm, M., Schneller, A., Application of the Loughborough Construction Accident Causation Model: A Framework for Organizational Learning, *Construction Management and Economics*, 31(6), 580-595, 2013.
- [21] Liao, C. W., Chiang, T. L., Reducing Occupational Injuries Attributed to Inattentive Blindness in the Construction Industry, *Safety Science*, 89, 129-137, 2016.
- [22] Liy, C.H., Ibrahim, S.H., Affandi, R., Rosli, N.A., Nawli, M.N.M., Causes of Fall Hazards in Construction Site Management, *International Review of Management and Marketing*, 6(8), 257-263, 2016.
- [23] Siddula, M., Dai, F., Ye, Y., Fan, J., Classifying Construction Site Photos for Roof Detection: A Machine-Learning Method towards Automated Measurement of Safety Performance on Roof Sites, *Construction Innovation*, 16(3), 368-389, 2016.
- [24] Umer, W., Li, H., Lu, W., Szeto, G. P. Y., Wong, A. Y. Development of a Tool to Monitor Static Balance of Construction Workers for Proactive Fall Safety Management, *Automation in Construction*, 94, 438-448, 2018.

- [25] Winge, S., Albrechtsen, E., Accident Types and Barrier Failures in the Construction Industry, *Safety Science*, 105, 158-166, 2018.
- [26] Kines, P., Occupational Injury Risk Assessment Using Injury Severity Odds Ratios: Male Falls from Heights in the Danish Construction Industry, *Human and Ecological Risk Assessment*, 7(7), 1929-1943, 2001.
- [27] Hu, K., Rahmandad, H., Smith-Jackson, T., Winchester, W., Factors Influencing the Risk of Falls in The Construction Industry: A Review of the Evidence, *Construction Management and Economics*, 29(4), 397-416, 2011.
- [28] Chi, C. F., Lin, S. Z., Dewi, R. S., Graphical Fault Tree Analysis for Fatal Falls in the Construction Industry, *Accident Analysis and Prevention*, 72, 359-369, 2014.
- [29] Shin, M., Lee, H. S., Park, M., Moon, M., Han, S., A System Dynamics Approach for Modelling Construction Workers' Safety Attitudes and Behaviors, *Accident Analysis and Prevention*, 68, 95-105, 2014.
- [30] Bilir, S., Gürcanlı, G. E., A Method for Determination of Accident Probability in the Construction Industry, *Teknik Dergi*, 29(4), 8537-8561, 2018.
- [31] Baradan, S., Usmen, M. A., Comparative Injury and Fatality Risk Analysis of Building Trades, *Journal of Construction Engineering and Management*, 132(5), 533-539, 2006.
- [32] Guo, B. H., Goh, Y. M., Ontology for Design of Active Fall Protection Systems, *Automation in Construction*, 82, 138-153, 2017.
- [33] Baradan, S., Akboğa, Ö., Çetinkaya, U., Usmen, M. A., Ege Bölgesindeki İnşaat İş Kazalarının Sıklık ve Çapraz Tablolama Analizleri, *İMO Teknik Dergi*, 27(1), 7345-7370, 2016.
- [34] Gürcanlı, G. E., Müngen, U., Analysis of Construction Accidents in Turkey and Responsible Parties, *Industrial Health*, 51, 581-595, 2013.
- [35] Hadipriono, F.C., Expert System for Construction Safety. I: Fault-Tree Models, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 6(4), 246-260, 1992.
- [36] Hadipriono, F.C., Expert System for Construction Safety II: Knowledge Base, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 6(4), 261-274, 1992.
- [37] LeBeau, K. H., Wadia-Fascetti, S. J., 20, Fault Tree Analysis of Schoharie Creek Bridge Collapse, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 21(4), 320-326, 2007.
- [38] Yang, R., Deng, Y., Analysis on Security Risks in Tunnel Construction Based on the Fault Tree Analysis, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 2021.
- [39] <https://ec.europa.eu/eurostat/data/database>, Son Erişim Tarihi: 18.10.2021.
- [40] <http://www.sgk.gov.tr/>, Son Erişim Tarihi: 04.07.2021.
- [41] Waehrer, G.M., Dong, X.S., Miller, T., Halie, E., Men, Y., Costs of Occupational Injuries in Construction in the United States, *Accident Analysis and Prevention*, 39(6), 1258-1266, 2007.

- [42] Sacks, R., Rozenfeld, O., Rosenfeld, Y., Spatial and Temporal Exposure to Safety Hazards in Construction, *Journal of Construction Engineering and Management*, 135(8), 726-736, 2009.
- [43] Bertsche, B., *Fault Tree Analysis, FTA, Reliability in Automotive and Mechanical Engineering*, Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [44] Ericson, C. A., *Fault Tree Analysis- A History*, 17th International System Safety Conference, USA, 1999.
- [45] Vesely, W., Dugan, J., Fragola, J., Minarick, J., Railsback, J., *Fault Tree Handbook with Aerospace Applications*, Washington DC. NASA, 2002.
- [46] Xing L., Amari S.V., *Fault Tree Analysis, Handbook of Performability Engineering*, Misra, K. B., Springer, London, 2008.
- [47] Lee, W. S., Grosh, D. L., Tillman, F. A., Lie, C. H., *Fault Tree Analysis, Methods, and Applications-A Review*, *IEEE Transactions on Reliability*, 34(3), 194-203, 1985.
- [48] Whitesitt, J. E., *Boolean Algebra and Its Applications*, Courier Corporation, Mineola, New York, 2012.
- [49] The Institute of Internal Auditors, *Practice Advisory 2320-2: Root Cause Analysis, Primary Related Standard, 2320-Analysis and Evaluation*, 2011.
- [50] Serrat O., *The Five Whys Technique*, Knowledge Solutions, Springer, Singapore, 2017.
- [51] Dizdar, E. N., *Fault Tree Analysis For System Reliability*, *Teknoloji*, 6(3-4), 35-40, 2003.
- [52] Kum, S., *Petrol Tankerlerinde Risk Değerlendirmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, 2005.

Taşkın ve Rüşubat Kontrolünde Yeni Öneri: Gemiburnu Tip Geçirgen Bent

Emre AKÇALI¹

ÖZ

Dağlık havzalarda ciddi hasarlara ve can kaybına neden olan taşkın olayları, büyük ölçüde taşkın sırasında köprü ve menfezleri tıkayan odunsu malzemenin taşınmasıyla meydana gelmektedir. Son yıllarda, odunsu malzemeleri tuzaklamak üzere geçirgen tersip bentleri inşa edilmeye başlanmıştır. Ancak, bu yapılar özellikle büyük taşkınlarda odunsu malzemelerle kısa sürede tıkanabilmekte, bu nedenle malzeme filtreleme ve odunsu materyali tuzaklama işlevini hızla kaybetmektedir. Bu çalışmada, bu sorunun önlenmesi adına gemiburnu şeklinde tasarlanmış yeni tip bent, işletme halindeki iki farklı tipteki klasik yarı geçirgen tersip bendi ile laboratuvar ortamında karşılaştırılmıştır. Sonuçlar yeni tipin hızlı tıkanma ve üstten aşma sorununa karşı etkili olduğunu göstermiştir. Bu yapının uygulanmasıyla taşkın zararlarının azaltılması adına önemli bir katkı sağlanmış olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Geçirgen tersip bendi, odunsu malzeme, gemiburnu, yarı geçirgen, taşkın, rüşubat kontrolü.

ABSTRACT

New Approach to Control Flood and Transport of Debris Material: Shipnose Type Open Check Dam

Flood events, which cause serious damage and loss of life in mountainous basins, are mostly caused by the transport of woody material that blocks bridges and culverts during flooding. In recent years, open check dams have begun to be built to trap woody materials. However, these structures can become blocked with woody materials in a short time, especially in large floods. So the material quickly loses its function of filtering and trapping the woody material. In this study, in order to prevent this problem, the new type of dam designed in the shape of the ship nose was compared against two different types of classical semi permeable open check dams in operation, in a laboratory. The results showed that the new type is effective against the problem of rapid clogging and overrun of woody materials. With the

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 15 Şubat 2021 günü ulaşmıştır. 25 Ağustos 2021 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Ocak 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.880224>

¹ Devlet Su İşleri 22. Bölge Müdürlüğü, Trabzon - emreakcali@dsi.gov.tr
<https://orcid.org/0000-0002-4825-7265>

implementation of this structure, an important contribution could be made to reduce flood damages.

Keywords: Open check dam, woody debris, ship nose, semi permeable, flood, debris control.

1. GİRİŞ

Türkiye'nin nehir havzalarında oldukça fazla taşkın olayları meydana gelmekte ve taşkınlar özellikle yoğun yağışların sık görüldüğü Doğu Karadeniz Havzası'nda (DKH) çok fazla can ve mal kayıplarına sebep olmaktadır [1,2]. Taşkınlar, yağış-akış miktarı ve dere yatağı kesiti dışında çok önemli başka bir parametre olan rüşubattan da tetiklenirler. Oluştugu yerden çökeldiği yere kadar suda asılı halde veya tabanda sürüntü maddesi olarak su tarafından taşınan katı maddeler olarak tanımlanan rüşubat, kilden iri bloklara kadar zemin türlerini kapsarken, aynı zamanda kök, ağaç ve dallar gibi odunsu materyalleri de içermektedir. Yüksek eğime sahip vadiler ve dere yatakları, kayma potansiyeli yüksek jeolojik yapıya sahip yamaçlar, kıyı oyulmasına uygun yamaç topukları ve sığ köke sahip bitki örtüsü gibi etmenler, yukarı havzalarda oluşabilecek rüşubat hareketinin ana nedenleridir. Yüksek yağış rejimi ile de birleşen bu tip yerlerde; dere yatağına kayan zemin malzemeleri ve odunsu materyal barındıran heyelan kütleleri, kıyı oyulmasıyla oluşan sediment birikimi, yatak içerisinde doğal olarak yetişen ağaçlar ve bitkiler uygun akış koşullarıyla birlikte mansaba ilerlerler [3]. Özellikle rüşubi harekete sahip bu dağlık havzaların memba kesimlerinden hareketlenen bu malzemeler, mansapta dere geçiş yapıları (köprü, menfez, büz vb.) başta olmak üzere kapalı kesitlerde ve hatta ıslahlı kesitlerde tıkanmalara neden olurlar (Şekil 1). Bunun sonucunda ise çoğu zaman hasarsız atlatılabilecek olan akışlar, kesitten taşarak öngörülemeyen taşkınlara dönüşürler. Bundan dolayı, taşkın yönetiminde sadece akarsuların debisine göre kesit belirlenmesi ve uygulanması yeterli olmamaktadır. Bu bağlamda taşkın kontrolü için yukarı havza rüşubat durumunun incelenmesi ve gerekli önlemlerin buna göre alınması gerekmektedir.



Şekil 1 - Doğu Karadeniz Havzası'nda taşkın anında biriken sediment ve odunsu malzemenin köprü vb. yapıların kesitlerini tıkaması (Trabzon Beşikdüzü İlçesi ve Rize İyidere İlçesi Taşkınları)

Yukarı havza önlemleri için, özellikle Doğu Karadeniz Havzası gibi dağlık nehir havzalarında uygulanan başlıca yapılar; sel kapanları, eğim düzenleyen britler, taban malzemesini yerinde tutmayı amaçlayan taban kuşakları, heyelanlara topuk olan ve eğim düzenleyen ıslah sekileri ve sediment tutmayı amaçlayan tersip bentleridir. Ancak tersip

bentlerinin odunsu materyali tutamamasından hareketle son yıllarda dünyada geliştirilen yapı genellikle filtreleme özelliği gösteren demir profilli ızgara ve beton ayaklar ile oluşturulmuş geçirgen tersip bentleri olmuştur. Geçirgen tersip bentleri, özellikle büyük taşkınlar sırasında taşınan odunsu malzeme, sediment vb. rüsubi malzemeyi kontrol ederek bir nehir havzasının yönetimi ve geliştirilmesinde önemli rol oynarlar [4]. Sedimentler, düşük akımlarda bent aralıklarından geçerken, büyük akımlarda memba tarafında birikme meydana gelir [5]. Bu yapılar, belli çaptaki malzemenin geçişine imkân vererek akarsu yatağının beslenmesini ve doğal yapısını korumasını sağlamakta, bu şekilde mansap tarafındaki oyulmaları da önlemektedir. Aynı zamanda iri malzemelerin taşkın anında tutulmasını sağlayarak mansapta yer alan köprü, menfez gibi sanat yapılarının tıkanması engelleyerek taşkın zararlarını önemli ölçüde azaltmaktadır [6,7]. Bu olgu, geçirgen bentlerin kendi kendini temizlemesi (self-cleaning) ve birikim tahkimat işlemi (deposit armoring processes) olarak adlandırılabilir [8].

Ancak taşkın sırasında odunsu materyal ve sedimentlerin bendin ızgaralarını çok hızlı tıkanması nedeniyle, geçirgen tersip bentleri de kısa sürede klasik tersip bendi haline dönüşebilmektedir [9,10], (Şekil 2). Bu da taşkın anında koruyucu özelliğinin yeterli olmamasına sebep olmaktadır. Bu tür durumlar, bazı yönetim sorunlarını da ortaya çıkarmaktadır [11]. Bunlardan biri, etkili bir depolama kapasitesinin sürdürülmesi için bendin memba tarafındaki nehir yatağını temizleme çalışmalarını gerektirmesidir. Bundan dolayı teknik ve ekonomik fizibilitenin değerini azalmış olmaktadır [12,13]. Bu nedenle geçirgen bentler ile sediment akışlarının kontrolü teorik analiz, deneysel çalışmalar ve saha araştırmalarıyla incelenmektedir [5,7,14,15,16,17]. Armanini ve Larcher [14] tarafından gerçekleştirilen laboratuvar deneyleri sonucunda sediment tutma performansını belirlemek için bir tasarım kriteri elde edilmiştir. Farklı geçirgen bent tipleri için de bazı deneysel ve sayısal araştırmalar yapılmıştır [18]. Takahashi vd. [19], Hui-Pang [20] ve Armanini vd. [21], geçirgen bentlerin tuzaklanma ve düzenleyici özelliklerini belirlemek için çalışmalar yapmışlardır. Kanal deneylerine ve sayısal analize dayalı olarak, Shrestha vd. [22], Itoh vd. [23] ve Shima vd. [24] ızgaralı tip geçirgen bentlerin tuzaklama özelliklerini değerlendirmişlerdir. Ayrıca, geçirgen bentlerin rolünü ve etkinliğini değerlendirmeyi amaçlayan birkaç araştırmacı tarafından farklı indeksler de önerilmiştir [25]. Arazi ve küçük ölçekli modellerin tamamlayıcısı olarak, sediment birikim süreçlerini modellemek için sayısal yaklaşımlar da geliştirilmiştir [5,7,26,27]. Bu çalışmaların tümü, geçirgen bentlerin sediment akışını kontrol etmede hayati bir rol oynadığı ve etkilerinin farklı yöntemler kullanılarak ölçülebileceği sonucuna varmaktadır.

Bu araştırmaların çoğu yalnızca sediment akışına odaklanmıştır. Ancak dağlık nehir havzalarında odunsu materyaller geçirgen bentlerde sedimentlerden çok daha kısa sürede tutulmakta ve bendin memba tarafını tamamen doldurmakta, hatta bent üzerinden aşarak aşağı havzada yıkıcı etkilere sebep olmaktadır. Bunun için, odunsu malzeme akışının davranışını anlamak ve önleyici tedbirlere odaklanmak taşkın tehlikelerinin azaltılmasında oldukça önemlidir. Bunun için ise, geçirgen bentlerin tasarımı ve işleyişinin anlaşılması iyi bir değerlendirme gerektirir. Ancak, geçirgen bentlerin odunsu materyal tutma verimliliği konusunda çok az araştırma mevcuttur. Maricar ve Hashimoto [15] ve Hashimoto vd. [28], deneysel kanal çalışmalarında odun modellerini hareketli yatağa yerleştirerek odun-sediment-su karışım akışını oluşturmuşlardır. Laboratuvar kanalında bu karışım için geçirgen bentlerin malzeme tuzaklama verimliliğini incelemişlerdir. Daha güncel olarak, Meninno vd. [29] ve Rossi ve Armanini [30] tarafından yapılan çalışmalarda geçirgen bentlerin işleyişinde

odunsu materyalin davranışı ve bu yapıların en iyi tasarım parametreleri deneysel olarak araştırılmıştır.



Şekil 2 - Odunsu malzemenin geçirgen bentte birikmesi (Rize Güneysu ve Avusturya Salzburg)

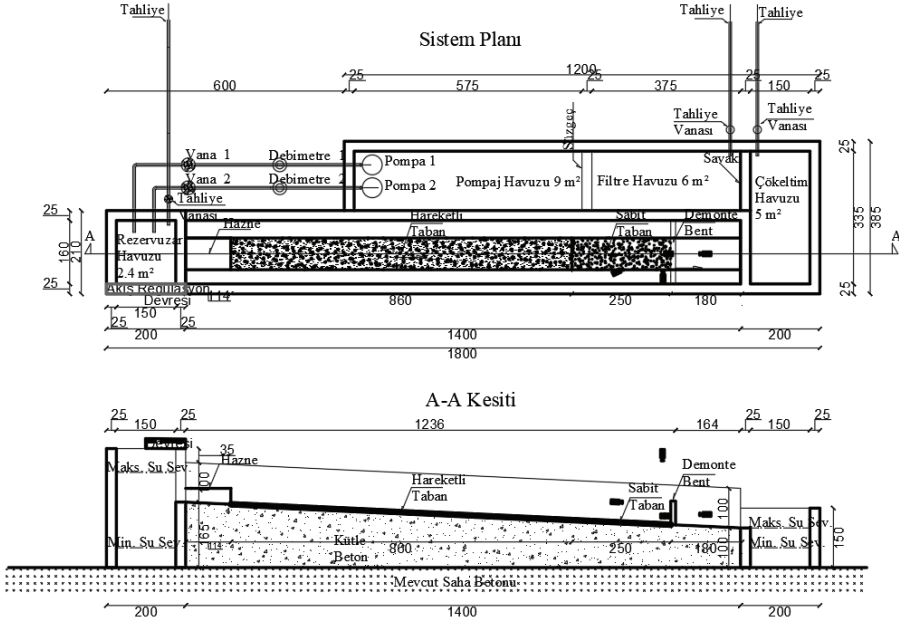
Bu çalışmada, dünyada yaygınlaşmaya başlayan, ancak işletme aşamasındaki hızlı tıkanma mekanizması nedeniyle istenilen işlevi yeterince yerine getiremeyen geçirgen tersip bentlerine alternatif olarak tasarlanan gemiburnu modeli irdelenmiştir. Bu şekilde, klasik biriktirmeli tersip bendi tipinin tasarım amacına hizmet edecek, ancak odunsu materyali de yeterince tuzaklayabilecek ve üstten aşmasını da engelleyecek bir tip tasarımı geliştirilmiştir. Yapının gemiburnu şeklinde modellenmesi sayesinde bendin önüne gelen odunsu materyal, suyun hareketi ile sürekli bir devinime ve yanal deplasmana maruz kalacak ve kısa süredeki tıkanma önlenmiş olacaktır. Bu tipin uygulanabilirliği için de dikdörtgen bir kanalda odunsu malzeme ve sedimentlerle bir dizi deney gerçekleştirilmiştir.

2. YÖNTEM

2.1. Hidrolik Model Düzeneği

Geçirgen tersip bentlerindeki odunsu malzeme ve sediment ve tuzaklanmasını incelemek için Devlet Su İşleri (DSİ) 22. Bölge Müdürlüğü (Trabzon) Hidrolik Model Laboratuvarında bir dizi deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan parametreler belirlenirken Doğu Karadeniz Havzasını temsil edebilecek özelliklere sahip Rize ili Taşlıdere Havzası'nın parametrelerinden yararlanılmıştır.

Deney için her iki yanı düz cam olan 14 m uzunluğunda, 80 cm genişliğinde ve 25 cm yüksekliğinde dikdörtgen bir kanal oluşturulmuştur. Kanal için Froude benzeşimine dayalı olarak 1:25 benzerlikte geometrik ölçek kullanılmıştır. Şekil 3, kanalın plan ve boy kesit görünümünü göstermektedir. Kanal yatağı hareketli ve sabit bölümlerden oluşmaktadır. Hareketli yatak 6.1 m uzunluğunda ve sabit yatak 2.5 m uzunluğundadır. Sabit yatak, hareketli yatak için kullanılan malzeme ile pürüzlendirilmiştir. Sediment ve odunsu malzemeler hareketli yatağa konulmuş ve geçirgen bent modelleri yatağın sabit kısmına yerleştirilmiştir.



Şekil 3 - Deney kanalı plan ve boy kesiti

Modeldeki su temini kapalı bir devir daim sistemi ile sağlanmış ve borularla pompalanarak yükleme havuzuna getirilmiştir. Havuzdan savaklandırılan su akım kanalına ulaşmaktadır. Besleme borusuna monte edilmiş elektromanyetik debimetre, geçen suyun debisini ölçmekte ve su miktarı istenilen debiye göre uzaktan kumandalı vanalarla ayarlanmaktadır. Su, deney kanalına 2.5 m uzunluğundaki bir akış düzleştiriciden girmekte ve sonra hareketli yatağa ulaşmaktadır. 6.1 m uzunluğunda hareketli yatak bölümünden sonra sabit yatak devam etmektedir. Geçirgen bentler, sabit yatağın 2.5 m mansabında kurulmuştur. Geçirgen bentlerin mansabında 1.80 m uzunluğunda sabit bir bölüm bulunmaktadır. Kanalın çıkışında, bentten geçen odunsu materyal sayılarını belirlemek için materyalleri toplayan bir elek bulunmaktadır. Kanalın mansap ucunda, akış serbestçe bir toplayıcıya düşmekte ve devreyi tamamlamak için depolama tankına geri dönmektedir. Kanal eğimi % 4 tür. Ölçeklendirme gerçek boyutun 1/25 küçültülmüş halidir. Modelin davranışını kaydetmek için kameralar kanalın üst, sağ ve bentlerin mansap tarafına monte edilmiştir. Kameralar, 1920 x 1080 piksel çözünürlüğe ve saniyede 60 kare (fps) kare hızına sahip Panasonic LUMIX DMC-GH4 modelidir.

2.2. Kanal Yatağı Malzemesi ve Odun Modelleri

Deneylerde kullanılan eğim ve odunsu malzemeler için taşkın felaketlerinin sıklıkla meydana geldiği Güneysu Rize, Taşlıdere Nehri, Gürgen Kolu baz alınmıştır. Bu havzanın drenaj alanı yaklaşık 131 km²'dir ve kanalın uzunluğu 23 km'dir, eğimi ise ortalama %10'dur. Bu nehir, Doğu Karadeniz Havzası'ndaki birçok nehri temsil etmektedir. Tersip bentleri ise mümkün

mertebe düşük eğime sahip (%2-4) kesimlerde uygulanarak depolama kapasitesinin artırılması hedeflenmektedir. Hidrolik kanal da bu yüzden % 4 eğime göre ayarlanmıştır. Bölgedeki taşkınlarla büyük çoğunlukta kızılâğaçlar akışla birlikte sürüklenmektedir.

Model odunlar, bölgeyi temsil eden ve özgül ağırlığı 0.68 g/cm^3 olan bu kızılâğaçlarından yapılmıştır. Ağaçların yükseklik ve çapları arazi gözlemleriyle belirlenmiş ve Rize'de daha önceki taşkın olayları sırasında gözlemlenen doğal odunsu materyale göre ölçeklenmiştir. Odunların hacmi ve boyutları, havzadaki klasik geçirgen tersip bentinin arkasında biriken odunsu molozlardan hesaplanmıştır. Boy ve çapları 2 farklı silindirik boyutta kullanılmıştır. (Tablo 1). Sediment malzemesi ortalama $d_{50} = 15 \text{ mm}$ çapa, maksimum $d_{\max} = 19 \text{ mm}$ çapa, üniformaluluk katsayısı $C_u = 4.1$ ve eğrilik katsayısı $C_e = 2.9'$ a sahiptir. Hareketli yatak, 2.65 g/cm^3 özgül yoğunluğa sahip sediment karışımı ile doldurulmuştur.

Tablo 1 - Odun modelleri

	Çap (mm)	Uzunluk (cm)
Odun modeli 1	10	11
Odun modeli 2	15	16.5

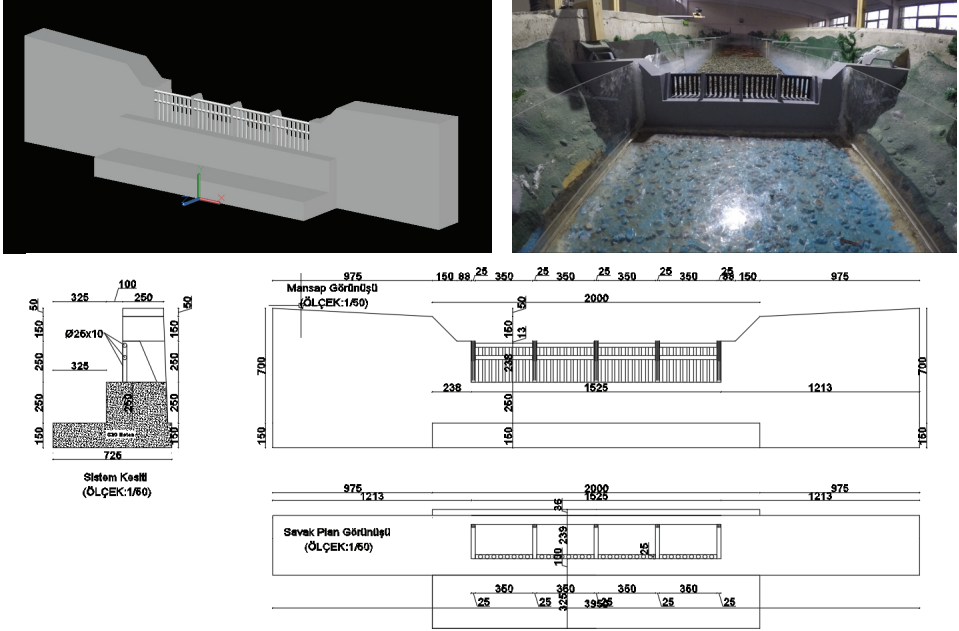
2.3. Odunsu Malzeme Hacim Tayini ve Tuzaklama Kapasitesi

DKH gibi dağlık nehir havzalarında, odunsu malzeme esas olarak taşkınlarla gelmektedir [10]. Köprülerin ve menfezlerin dar bölümleri, odunsu malzeme birikimi için potansiyel alanlardır. Bundan dolayı odunsu malzeme oluşumunun tahmini önem kazanmaktadır. Taşkın özellikleri göz önüne alındığında, beklenen odunsu malzeme hacminin tahmin edilmesi Piton and Reckling [31] çalışmalarında bulunmaktadır.

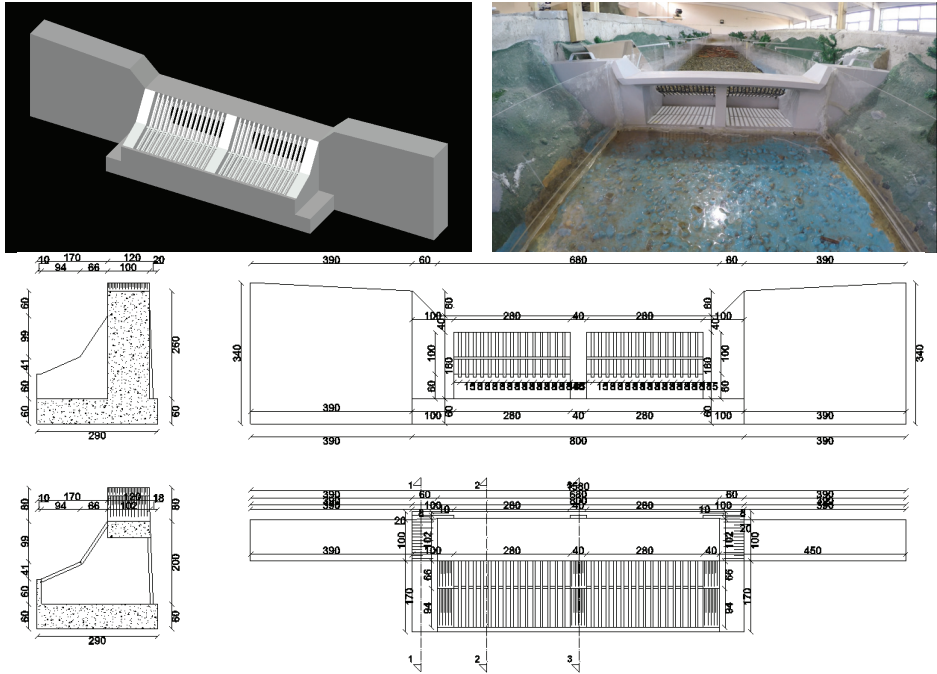
Odunsu malzemeyi tuzaklamak, aşağı havzadaki yerleşim, altyapı, su yapıları vb. taşkın riskini azaltır ancak, yüksek tuzaklama kapasitesi de bu yapıların kolayca dolmasına ve tasarlanan düzenleme işlevini süratle kaybetmesine neden olur. Bu nedenle geçirgen bentler tasarlanırken makul bir oran belirlemek önemlidir. Tuzaklama kapasitesinin temel indeksi, tuzaklanan ve geçen odunsu malzeme hacimleri arasındaki oran olarak ifade edilir. Detaylı bilgiler Piton and Reckling [31] çalışmalarında bulunmaktadır.

2.4. Model Bentler ve Önerilen Yeni Tipin Tasarım Kriterleri

Çalışma kapsamında dünyada kullanılmakta olan 2 farklı tip yarı geçirgen tersip bendi tipi ile bu çalışmada yeni tasarlanan gemiburnu (GB) tip geçirgen tersip bendi kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan tüm yarı geçirgen tiplerde gövdenin alt kısmı, askıda olmayan ve sürüklenerek gelen sedimenti tutacak şekilde geçirimsiz (klasik tersip bendi) biçiminde, üst kısmı ise odunsu materyali tuzaklayacak ızgaralardan tasarlanmıştır. Geçirgen bent modelleri geçirimsiz plywood'tan yapılmıştır ve prototiplerin küçültülmüş boyutu $1/25'$ dir. Modellerin yüksekliği 20 cm ve genişliği 64 cm 'dir. Deneylerde kullanılan ve karşılaştırmaya alınan yarı geçirgen tersip bendi hazneli tip 1 (YG1) ve yarı geçirgen tersip bendi hazneli tip 2 (YG2) modellerine ait en kesit görünümü ve çizimleri Şekil 4 ve Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 4 - YG1 tipine ait çizim ve model enkesit görüntüsü



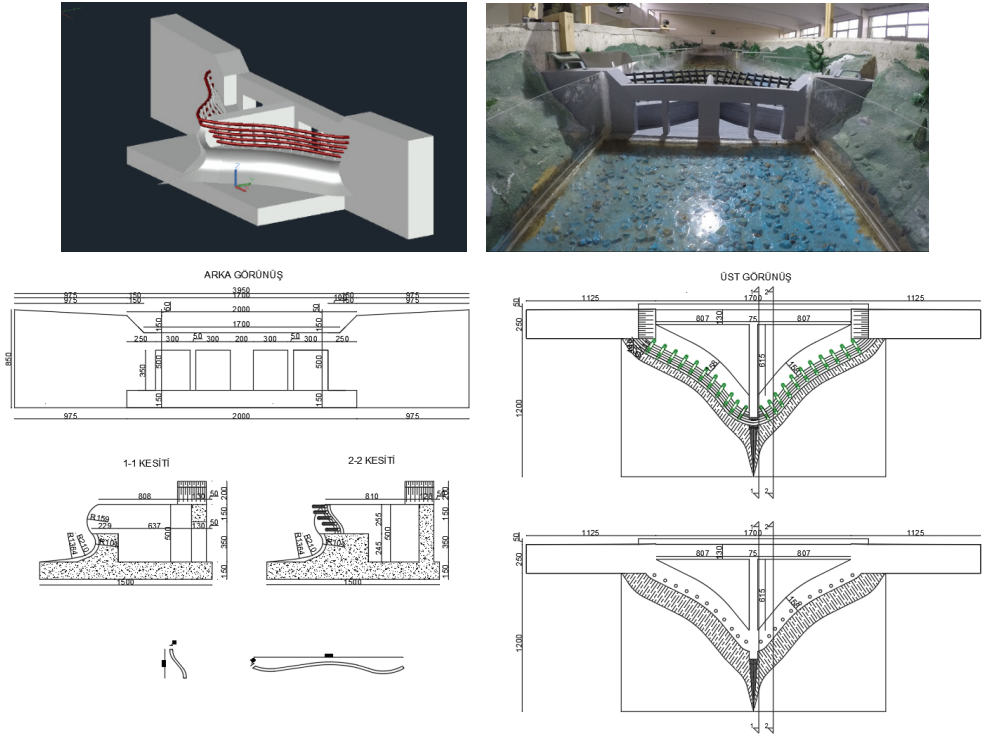
Şekil 5 - YG2 tipine ait çizim ve model enkesit görüntüsü

Taşkın ve Rüsubat Kontrolünde Yeni Öneri: Gemiburnu Tip Geçirgen Bent

Klasik yarı depolamalı geçirgen tersip bentleri, Şekil 5’de görüldüğü gibi suyun akışına dik olarak düzlemsel formda projelendirilmektedir. Bu projelendirme tipi, bende gelen ilk ağaçlardan itibaren hızlı bir yığılmaya ve suyun kuvveti ile sıkışmaya neden olmaktadır. Bunun sonucunda ağaçlar bendi tıkamaktadır. Bu durum ise bendin fonksiyonunu değiştirmekte ve depolamalı geçirgen yerine klasik bent olarak çalışmasına neden olmaktadır. Bu yüzden de hem depolama hacminin üzerinde rüsubat depolaması yapılmakta, hem de tutulması planlanan ağaçlar tıkanma sonrası bendin üzerinden aşmaktadır.

Bu çalışmada, yarı depolamalı geçirgen tersip bendine alternatif olarak gemiburnu modeli tasarlanmıştır. Bu modelin deney tipine ait en kesit, üst ve mansap görünümü ile deney kanalındaki deney öncesi kamera görüntüleri Şekil 6’da sunulmuştur.

Bu tasarım ile yarı depolamalı geçirgen tipin tasarım amacına hizmet edecek, ancak su ve askıdaki sediment akımına da engel olmayacak ve odunsu materyalin üstten aşmasını da engelleyecek bir tip tasarımı geliştirilmiştir. Önerilen bu tipin ciddi oranda ağaç tuzaklaması sağlaması, ancak klasik yarı hazneli tipteki gibi tıkanma dezavantajına sahip olmaması amaçlanmıştır. Yapının gemiburnu şeklinde modellenmesi sayesinde bendin önüne gelen odunsu materyal, suyun hareketi ile sürekli ötelenmeye ve bir devinime maruz kalacak, bu sayede orta bölümdeki malzemeler sağ ve sol sahile doğru yönlenecektir. Bunun sonucu olarak bendin önü uzun süre açık kalacaktır. Gemiburnu şeklindeki yapı tasarımı ayrıca odunsu materyalin üstten aşmasına da engel olacaktır.



Şekil 6 - Gemiburnu tipine ait çizim ve model enkesit görüntüsü

2.5. Deney Programı

Bu çalışmada önerilen gemiburnu tip geçirgen bendi ile klasik tip bendenin sediment ve odunsu malzeme biriktirme kapasitelerini karşılaştırmak ve bent önü tıkanıklığını gözlemlemek için deneyler yapılmıştır (Tablo 2). Hareketli yatak, sediment ve odunsu malzeme ile doldurulmuştur. Model bentler, kanalın aşağı akış ucundan 1.8 m uzaklıkta sabit yatak üzerinde konumlandırılmıştır. Kanala bent yerleştirilmeden önce akış rejimini gözlemlemek için bir dizi referans testleri yapılmıştır. Her deneyden önce yatak yeniden düzenlenmiş ve tüm deneyler için dağılımının aynı kalmasına özen gösterilmiştir.

Odun sayısının (N) malzeme tutma kapasitesine etkisini belirlemek için (1 adet/(20*20) cm, 1 adet/(25*25) cm ve (1 adet/30*30)) cm odun aralıkları için $N_1=172$, $N_2=110$ ve $N_3=76$ olmak üzere üç adet N kullanılmıştır ve buna göre deney setleri oluşturulmuştur. Odun malzemesinin kanal yatağına yerleştirme biçimleri Şekil 7'de görülmektedir. Rize Güneysu Taşlıdere Nehri prototip havza olarak dikkate alınmış ve 500 yıl tekerrür süreli taşkın debisi seçilmiştir. Bu havzadaki geçirgen bendenin 500 yıl tekerrür süreli taşkın debisi $Q_p=72.69$ m³/sn iken, model debisi Froude ölçeğine göre $Q_m=0.02326$ m³/sn olarak hesaplanmıştır. Bir deney seti 25 saniyede gerçekleştirilmiştir ve sabit debi ile kanal eğimi kullanılmıştır. Daha uzun bir akış süresi, sediment ve odunsu malzemenin birikme profilinin sonuçlarını etkilememiştir. Benzer kanal boyutlarına sahip diğer çalışmalarda, her bir deneysel çalışmanın süresi 8-20 saniye civarında tutulmuştur [15, 17, 28, 32, 33]. Tuzaklanma ve birikme profilleri ölçülmüş ve kameralar tarafından kaydedilmiştir.



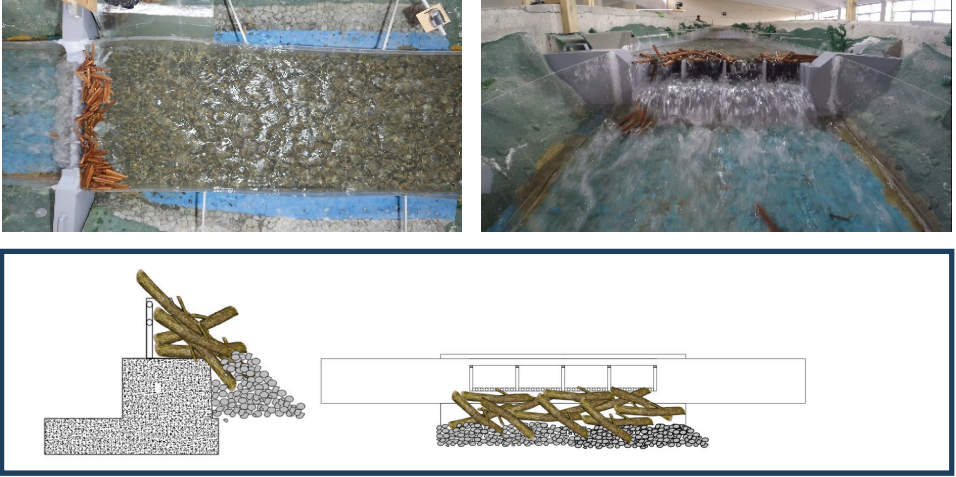
Şekil 7 - Odun malzemesinin kanal hareketli yatağına yerleştirilmesi

Tablo 2 - Deney setleri

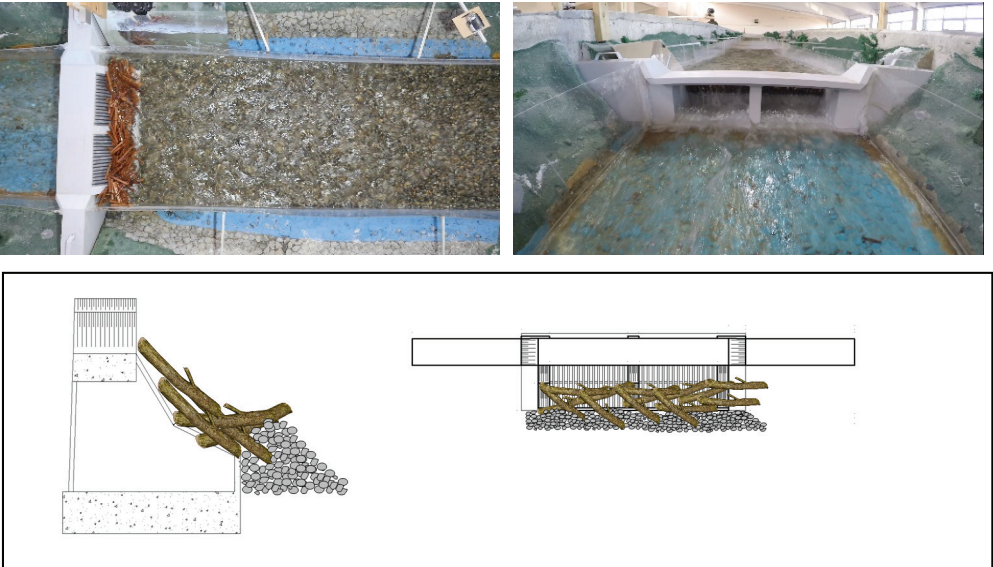
Senaryo	Odun uzunluğu, L (cm)	Odun çapı, d (mm)	Odun sayısı, N
1	11	10	172
2	11	10	110
3	11	10	76
4	16,5	15	172
5	16,5	15	110
6	16,5	15	76

3. BULGULAR

Deneylerde elde edilen odunsu materyalin tuzaklanma biçimleri ve bentlerin memba yüzünde oluşan biriktirme profilleri karşılaştırılmıştır. YG1 bent ile yapılan deneylerde önce odunsu materyallerin bentin memba yüzündeki ızgaralarda homojen bir dağılım ile tutulduğu, buna karşın ızgaraları tıkamaya başladığı görülmüştür. Akabinde bendin hızla klasik tersip bendi haline gelmesiyle, yeni gelen odunsu malzemeler üstten aşmaya başlamaktadır (Şekil 8).



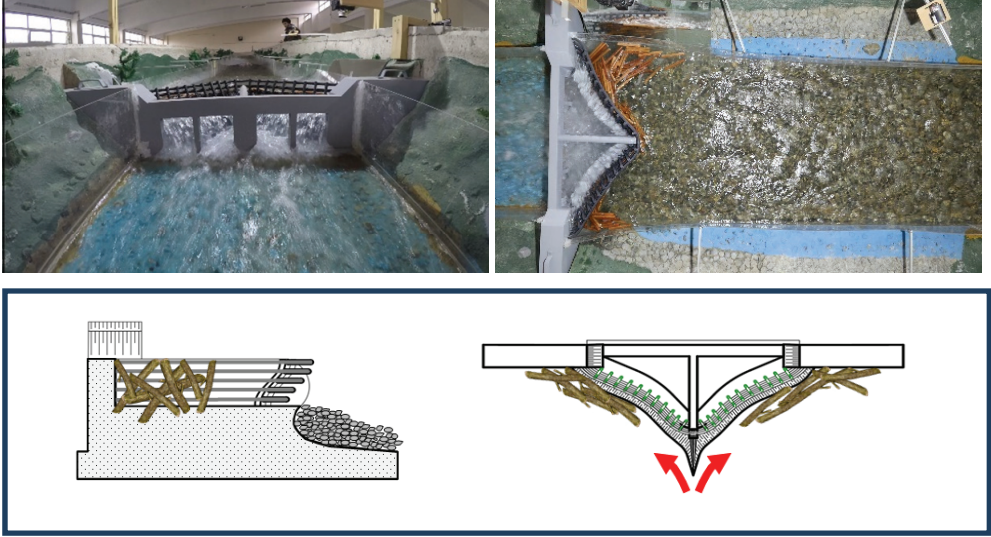
Şekil 8 - YG1 bent malzeme birikme profili



Şekil 9 - YG2 bent malzeme birikme profili

YG2 bent yapılan deneylerde odunsu materyallerin bendin memba yüzündeki ızgaralarda homojen bir dağılım ile tutulduğu, buna karşın ızgaraları tıkamaya başladığı görülmüştür (Şekil 9). Bu durum bendin hızla klasik tersip bendi haline gelmesine, dolayısıyla geçirimli kesim olarak projelendirilen kısmında geçirimsiz hale gelip sediment ile dolmasına ve yeni gelecek odunsu malzemelerin üstten aşmasına sebep olacaktır.

Gemiburnu tip geçirgen bent ile yapılan deneylerde odunsu materyalin bendin tipi nedeniyle suyun itici gücüyle birlikte sağ ve sol taraflara doğru yığıldığı, bendin önünün tıkanmadığı ve bu sayede bendin yarı geçirgen özelliğini sürdürdüğü tespit edilmiştir (Şekil 10). Bu sayede bendin üzerinden de herhangi bir odunsu materyal taşınımı olmadığı tespit edilmiştir.

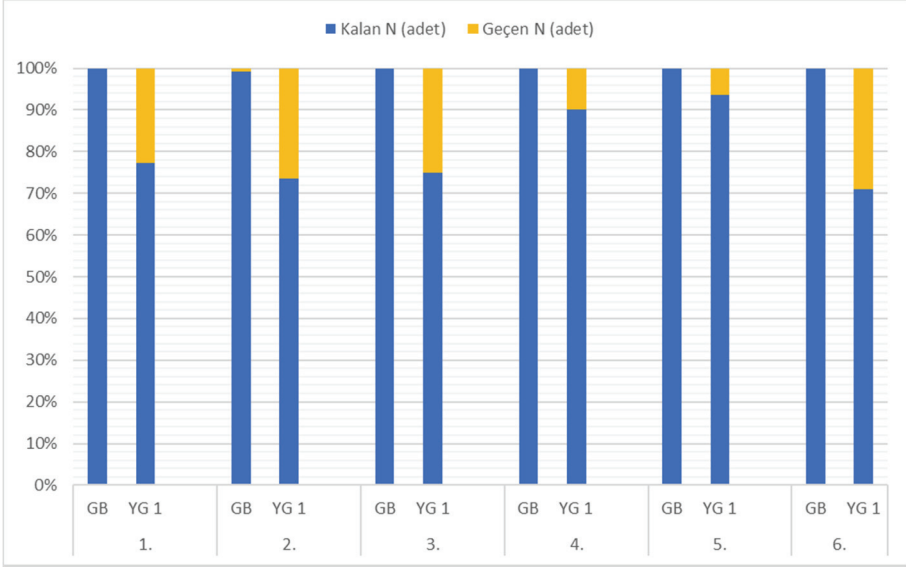


Şekil 10 - Gemiburnu tip geçirgen bent malzeme birikme profili

Gemiburnu tip geçirgen bent ile YG1 bent, odunsu materyalin tuzaklanması için karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlar aşağıdaki grafikte sunulmuştur (Şekil 11). Grafikten görüldüğü üzere YG1 bentte odunsu materyalin bazı deney setlerinde % 30 lara varan üstten aşımı gözlenmiştir. Buna karşın Gemiburnu bent tipinde neredeyse hiç üstten aşım gözlenmemiştir. Bu sonuçlar, gemiburnu bent tipinin odunsu materyalin üstten aşmama noktasında ne kadar başarılı olduğunu göstermektedir.

Gemiburnu tip geçirgen bent ile YG2 bent, odunsu materyalin ızgaraları tıkaması konusunda karşılaştırıldığında elde edilen sonuçlar aşağıdaki fotoğraflarla sunulmuştur (Şekil 12). Görüldüğü üzere YG2 bentte odunsu materyal bendin ızgaralarında hızlı bir birikim ve blokaj oluşturmaktadır. Buna karşın Gemiburnu bent tipinde neredeyse ön cephede odunsu materyal birikimi gözlenmemiş, malzeme sağ ve sola yönlendirilmiş ve bendin önü açık kalmıştır. Bu sayede suyun bent ızgaralarından kolayca akışı devam etmiş ve işletme ömrü uzatılmıştır.

Taşkın ve Rüşubat Kontrolünde Yeni Öneri: Gemiburnu Tip Geçirgen Bent



Şekil 11 - Gemiburnu tip geçirgen bent ile YG1 bendin odunsu malzeme tuzaklama karşılaştırma grafiği



Şekil 12 - Gemiburnu tip geçirgen bent ile YG2 bendin ön cephede odunsu malzeme birikim ve blokaj durumları

Deneydeki sonuçlar, bentlerin ızgaralarının odunsu materyallerle tıkanması yönüyle karşılaştırıldığında, bendin memba yüzü ile suyun akış yönünün birbirine dik olmasının her halükarda bendin kısa sürede tıkanmasına yol açtığını göstermektedir. Nitekim sahada yapılan uygulamalarda yapılan gözlemlerde de bu sorun tespit edilmiş ve bu çalışma ile soruna çözüm aranmıştır. Gemiburnu tipinden esinlenerek tasarlanan tipte ise odunsu materyalin tüm ızgara boyunca blokaj oluşturmadığı ve böylece “tıkanmadan kaçınma” hedefine ulaşılmış olduğu görülmüştür. Bunun sonucunda hem tıkanma, hem de tıkanmadan dolayı meydana gelebilecek üstten aşma sorununa çözüm bulunduğu görülmüştür.

Elde edilen tüm bu sonuçlar, gemiburnu bent tipinin odunsu materyalin bendi tıkamama ve üstten aşmama noktasında ne kadar başarılı olduğunu göstermektedir. Bu olumlu sonuçlara istinaden DSİ 22. Bölge Müdürlüğü bünyesinde uygulamaya esas projelendirme çalışmalarına başlanmış olup, inşaat çalışmalarına da kısa zamanda başlanması planlanmıştır.

4. SONUÇLAR

Odunsu materyalleri tuzaklayan geçirgen tersip bentleri, sadece taşkın riski altındaki bölgelerde değil, taşkın riskinin nispeten düşük olduğu bölgelerde dahi hayati öneme sahip yapılardır. Nitekim yatak kesitinin yeterli, akarsu debisinin düşük olduğu durumlarda dahi akışlar ile sürüklenen odunsu materyaller, köprü, menfez veya yatak kesitini tıkayarak taşkınlara neden olabilmektedirler. Bu risk, yoğun yağış alan ve taşkın olasılığı daha yüksek yerlerde ise çok daha fazladır.

Son yıllarda dünyada uygulaması sıklaşan geçirgen bentlerde görülmüştür ki, büyük taşkınlarda geçirgen bentler çok kısa sürede odunsu materyallerle tıkanabilmekte ve bu durumda yapıların malzeme tuzaklama ve düzenleme kapasiteleri olumsuz etkilenmektedir.

Bu çalışmada, bu sorunun önlenmesi adına gemiburnu şeklinde tasarlanmış yeni tip bent, işletme halindeki iki farklı tipteki klasik yarı geçirgen tersip bendi ile laboratuvar ortamında karşılaştırılmıştır. Sonuçlar yeni tipin hızlı tıkanma ve üstten aşma sorununa karşı etkili olduğunu göstermiştir. Bu yapının sahada uygulanmasıyla taşkın zararlarının azaltılması adına önemli bir katkı sağlanmış olacaktır.

Kaynaklar

- [1] Anılan, T., Yüksek, Ö., Perception of Flood Risk and Mitigation: Survey Results From the Eastern Black Sea Basin, Turkey. *Natural Hazard Review*, 18(2): 05016006, 2017.
- [2] Anılan, T., Nacar, S., Kankal, M., Yuksek, O., Prediction of Maximum Annual Flood Discharges Using Artificial Neural Network Approaches. *Gravevinar*, 72(03.), 215-224, 2020.
- [3] Akçalı, E., Arman H., Yağış Eşiği Bazlı Heyelan Erken Uyarı Sistem Önerisi: Trabzon İli Örneği, *İMO Teknik Dergi*, 396, 6307-6332, s., 2013.
- [4] Akçalı, E., Kuduban, H., Efeoğlu, A., Fakraden, E.Ç., Deniz, S., Yeni Tip Taşkın Kontrol Sistemleri ve Türkiye'deki Uygulama İmkanları, 4. Ulusal Taşkın Sempozyumu, 23-25 Kasım 2016, Rize, 335-346, 2016.
- [5] Busnelli, M. M., Stelling, G.S., Larcher, M., Numerical Morphological Modeling of Open-Check Dams. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(2), 105-114, 2001.
- [6] Armanini, A., Larcher, M., Rational Criterion For Designing Opening of Slit-Check Dam. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(2), 94-104, 2001.
- [7] Campisano, A., Cutore, P., Modica, C., Improving the Evaluation of Slit-Check Dam Trapping Efficiency by Using a 1D Unsteady Flow Numerical Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(7), 04014024, 2014.

- [8] Catella, M., Paris, E., Solari, L., Case Study: Efficiency of Slit-Check Dams in the Mountain Region of Versilia Basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(3), 145-152, 2005.
- [9] Xie, T., Wei, F., Yang, H., Gardner, J.S., Xi, X., A Design Method for a Debris Flow Water-Sediment Separation Structure. *Engineering Geology* 220, 94-98, 2017.
- [10] Akçalı, E., Taşkın ve Sediment Kontrolünde Yenilikçi Yaklaşımlar. 2. International Natural Disasters and Disaster Management Symposium Proceedings Book, 4-6 Mayıs 2018, Sakarya, Türkiye, 31-40, 2018.
- [11] Comiti, F., Macconi, P., Marchi, L., Arattano, M., Borga, M., Brardinoni, ... and Vischi, M., Debris Flow Monitoring and Warning System: a New Study Site in the Alps. In Work Group F Thematic Workshop on Implementation of the Floods Directive 2007/60/EC, Flash Floods and Pluvial Flooding, 2010.
- [12] Schwindt, S., Franca, M.J., Schleiss, A., The Influence of the Opening Width of Check Dams on Bedload Continuity of Mountain Rivers (No. CONF, pp. 1156-1160), 2016.
- [13] Petrus, F., Pallu, H. M. S., Thaha, M. A., Maricar, F., Experimental Study on Control of Mixed Debris Flow with the Check Dam Combination. *International Journal of Civil Engineering (IJCIET)*, 10(10):159-166, 2019.
- [14] Armanini, A., Dalri, C., Larcher, M., Slit-Check Dams for Controlling Debris Flow and Mudflow. In *International Symposium Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides*, Universal Academy Press, Inc (pp. 141-148), 2006.
- [15] Maricar, F., Hashimoto, H., A Comparison of Wood-Sediment-Water Mixture Flows at a Closed Type and an Open Type of Check Dams in Mountain Rivers. In *River Flow 2014 Conf. Proc* (pp. 711-716), 2014.
- [16] Piton, G., Recking, A., Design of Sediment Traps with Open Check Dams. I: Hydraulic and Deposition Processes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(2), 04015045, 2016.
- [17] Yuan, D., Liu, J., You, Y., Zhang, G., Wang, D., Lin, Z., Experimental Study on the Performance Characteristics of Viscous Debris Flows with a Grid-Type Dam for Debris Flow Hazards Mitigation. *Bulletin Engineering of Geologic Environment* 78(8), 5763-5774, 2019.
- [18] Sun, H., You, Y., Li, J. F., Experimental Study on Characteristics of Trapping and Regulating Sediment with an Open-Type Check Dam in Debris Flow Hazard Mitigation. *Journal of Material Sciences*, 15(9), 2001-2012, 2018.
- [19] Takahashi, T., Nakagawa, H., Harada, T., Yamashiki, Y., Routing Debris Flows with Particle Segregation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 118(11), 1490-1507, 1992.
- [20] Hui-Pang, LIEN., Design of Slit Dams for Controlling Stony Debris Flows. *International Journal of Sediment Research*, 18(1), 74-87, 2003.
- [21] Armanini, A., Dalri, C., Larcher, M., Slit-Check Dams for Controlling Debris Flow and Mudflow. In *International Symposium Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides*, Universal Academy Press, Inc (pp. 141-148), 2006.

- [22] Shrestha, B. B., Nakagawa, H., Kawaike, K., Baba, Y., Numerical Simulation on Debris-Flow Deposition and Erosion Processes Upstream of a Check Dam with Experimental Verification. *Disaster Prevention Research Institute Annuals*, 51(B):613-624, 2008.
- [23] Itoh, T., Horiuchi, S., Mizuyama, T., Kaitsuka, K., Hydraulic Model Tests for Evaluating Sediment Control Function with a Grid-Type Sabo Dam in Mountainous Torrents. *International Journal of Sediment Research*, 28(4), 511-522, 2013.
- [24] Shima, J., Moriyama, H., Kokuryo, H., Ishikawa, N., Mizuyama, T., Prevention and Mitigation of Debris Flow Hazards by Using Steel Open-Type Sabo Dams. *International Journal of Erosion Control Engineering*, 9(3), 135-144, 2016.
- [25] Castillo VM, Mosch WM, García CC, Barberá GG, Cano JN, López-Bermúdez F (2007) Effectiveness and geomorphological impacts of check dams for soil erosion control in a semiarid Mediterranean catchment: El Cárcavo (Murcia, Spain). *Catena*, 70(3), 416-427.
- [26] Shrestha, B. B., Nakagawa, H., Kawaike, K., Baba, Y., Zhang, H., Driftwood Deposition from Debris Flows at Slit-Check Dams and Fans. *Natural Hazards*, 61(2), 577-602, 2012.
- [27] Li, S., You, Y., Chen, X., Liu, J., Chen, J., Regulation Effectiveness of a Window-Check Dam on Debris Flows. *Engineering Geology*, 253, 205-213, 2019.
- [28] Hashimoto, H., Hashimura, K., Nagano, H., Maricar, F., Experimental Investigation into Flow Behavior of Wood-Sediment-Water Mixture at a Grid Type of Open Check Dam. *International Journal of Erosion Control Engineering*, 9(4), 188-193, 2016.
- [29] Meninno, S., Canelas, R. B., Cardoso, A. H., Coupling Check Dams with Large Wood Retention Structures in Clean Water. *Environmental Fluid Mechanics*, 1-16, 2019.
- [30] Rossi, G., Armanini, A., Experimental Analysis of Open Check Dams and Protection Bars Against Debris Flows and Driftwood. *Environmental Fluid Mechanics*, 1-20, 2019.
- [31] Piton, G., Recking, A. Design of Sediment Traps with Open Check Dams. II: Woody Debris. *Journal of Hydraulic Engineering*, 142(2), 04015046, 2016
- [32] Tateishi, R., Horiguchi, T., Sonoda, Y., Ishikawa, N. Experimental Study of the Woody Debris Trapping Efficiency of a Steel Pipe, Open Sabo Dam. *International Journal of Sediment Research*, 35(5), 431-443, 2020.
- [33] Zhou, G. G., Hu, H. S., Song, D., Zhao, T., Chen, X. Q. Experimental Study on the Regulation Function of Slit Dam Against Debris Flows. *Landslides*, 16(1), 75-90, 2019.

Çok Amaçlı Ardışık Baraj Haznelerinin İşletmesinin HEC-ResSim ile Simülasyonu

Seda SEVER¹
Recep YURTAL²

ÖZ

Çok amaçlı ardışık baraj haznelerinin işletilmesinde, sistemin davranışını incelemeye olanak sağlayan simülasyon tekniği uygulamalarda tercih edilmektedir. Bu çalışmada, geliştirilmiş simülasyon programı HEC-ResSim kullanılarak Ceyhan Havzası'nda ardışık olarak inşa edilmiş Aslantaş Barajı, Berke Barajı ve Sır Barajı'nda üretilen yıllık toplam enerjiyi eniyilemek amaçlanmıştır. Barajlar, mevcut durumda üretebilecekleri maksimum enerji için belirlenen kurallar doğrultusunda çoklu rezervuar sistem yaklaşımıyla işletilmiştir. Gerçekleştirilen işletme çalışması ile sistemin Ceyhan Master Planı'nda üretilen yıllık toplam enerjiden %57,87 daha fazla enerji üretebileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çoklu rezervuar sistemi, rezervuar işletmesi, hidroelektrik enerji, simülasyon, HEC-ResSim.

ABSTRACT

Simulation of Multi-Purpose Multi-Reservoir System Operations by HEC-Ressim

In the operation of multi-purpose multi-reservoir system, simulation technique that allows to examine the behavior of the system is preferred. In this study, it was aimed to optimize the annual total energy generated in Aslantaş Dam, Berke Dam and Sır Dam, which were constructed consecutively in Ceyhan Basin, by using the generalized simulation program (HEC-ResSim). Dams have been operated with a multiple reservoir system approach in line with the rules determined for the maximum energy they can generate at present. With this operation policy, it has been concluded that the system can generate 57.87% more than the annual total energy produced in the Ceyhan Master Plan.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 25 Şubat 2021 günü ulaşılmıştır. 29 Kasım 2021 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Ocak 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.886723>

1 Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana
ssever@cu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-1187-2704>

2 Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Adana
ryurtal@cu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-3175-6567>

"Bu makale, 2020 yılında yazarın Prof. Dr. Recep YURTAL'ın danışmanlığında tamamladığı Yüksek Lisans tezinden üretilmiştir."

Keywords: Multi-reservoir system, reservoir operation, hydroelectric energy, simulation, HEC-ResSim

1. GİRİŞ

Sanayileşmedeki gelişmeler ve nüfus artışı, enerjiye olan talebin artmasına sebep olmaktadır. Bu enerji talebinin yerli ve yenilenebilir enerji kaynağı olan hidroelektrik enerjiden karşılanması büyük bir öneme sahiptir. Ancak, küresel ısınma hidroelektrik enerji kaynaklarını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu etkilerin azaltılması, sistemden maksimum faydanın elde edilmesi ancak hidroelektrik enerji kaynaklarının verimli kullanılması ile mümkündür. Hidroelektrik enerji üretiminin yanı sıra su temini, taşkın kontrolü gibi farklı amaçlar için inşa edilen barajların işletilmesi bu konuda önem taşımaktadır.

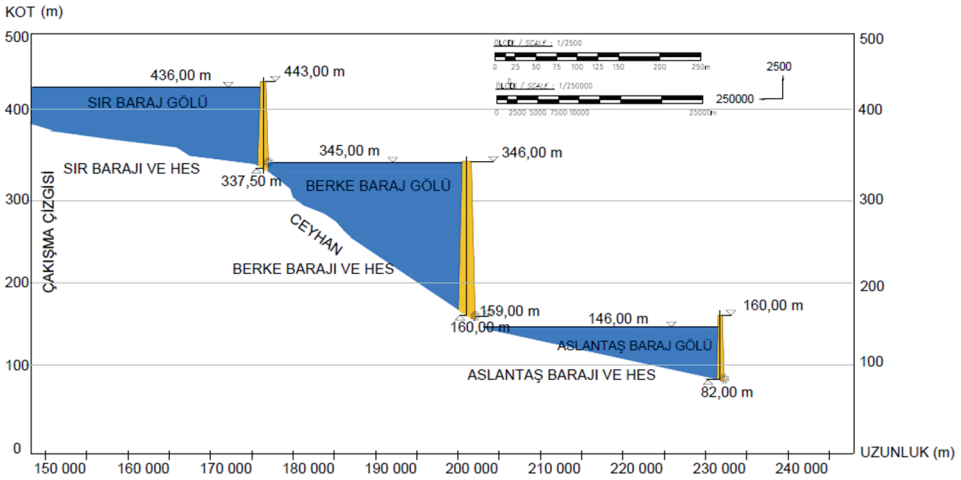
Doğal mevsimsel farklılıklar ve iklim değişikliğine bağlı olarak giriş akımının değişkenlik göstermesi, rezervuar işletme kurallarının güncel tutulmasını zorunlu kılmaktadır. Su temini ve enerji üretimi için sistem performansını artıran, salıverilecek su için istenmeyen sapmayı en aza indiren işletme kuralları en uygun kurallardır [1]. Bu kuralların belirlenmesinde planlayıcıların deneyimlerini ve değerlendirmelerini modele dahil eden rezervuar simülasyon modelleri [2], tercih edilen yaygın bir tekniktir [3]. Simülasyon yöntemlerinin su kaynakları planlaması ve yönetimine uygulanması, ABD Ordusu Mühendisler Birliği'nin (USACE) Missouri Nehri'nin simülasyonunu yapması ile başlamıştır. Sonrasında Nil Havzası'ndaki rezervuarların ekonomik performanslarıyla ilgili simülasyon çalışması yapılmıştır [4].

Her havza farklı topografik ve hidrolojik özelliklere sahip olduğu için araştırmacılar her bir havzaya özgü simülasyon yöntemi uygulamak yerine genelleştirilmiş simülasyon modellerini kullanmayı tercih edebilmektedir. Babel vd. [5], çevresel akış ve hidroelektrik enerji ihtiyaçlarının karşılanması için işletme kurallarının belirlenmesinde simülasyon tekniğinden faydalanmışlardır. Choo vd. [6], taşkın kontrolü ve hidroelektrik enerji üretimi için inşa edilmesini önerdikleri barajın planlamasını genelleştirilmiş simülasyon programı (HEC-ResSim) ile doğrulamışlardır. Shrestha vd. [7], yaptıkları yağış tahminlerine bağlı olarak nehir akışındaki değişimin hidroelektrik enerji üretimi üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla yağışlı ve kurak dönemlerde farklı çalışma saatleri için simülasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Firoz vd [8], hidrolojik kuraklığın su temini, hidroelektrik enerji üretimi ve tarımsal üretim üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla simülasyon çalışması yapmışlardır ve HEC-ResSim'den faydalanmışlardır. Uysal vd. [9], Yuvacık Barajı'nın mevcut işletme kurallarını değerlendirmek ve yeniden düzenlemek için hidrolojik modelleme sistemi (HEC-HMS) ve rezervuar simülasyon modelinin (HEC-ResSim) kombinasyonu ile bir karar destek sistemi geliştirmişlerdir. Özbakır [10], Seyhan ve Ceyhan Havzalarının su potansiyelini incelemek için mevcut ve planlanan projeleri dikkate alarak alternatif işletme politikaları belirlemiştir. Seyhan Havzası'nda depolanamayan Akdeniz'e dökülen suların Ceyhan Havzası'na aktarılmasını önermiş ve bu durumu incelemiştir. Akbulut [11], Ceyhan Havzası için HEC-5 programıyla işletme kuralları belirlemiş ve Aslantaş Barajı'nın enerji üretim kapasitesini değerlendirmiştir. Sever [12], Ceyhan Havzası'nda bulunan Aslantaş Barajı, Berke Barajı ve Sır Barajı'nı bir sistem olarak ele almış ve bu sistemin ürettiği yıllık toplam enerjiyi maksimize etmek için genelleştirilmiş simülasyon programı (HEC-ResSim) kullanarak işletme çalışması yapmıştır.

Bu çalışmanın amacı, Ceyhan Havzası'nda ardışık inşa edilmiş Aslantaş Barajı, Berke Barajı ve Sır Barajı'nda üretilen yıllık toplam enerjinin eniyilenmesidir. Aslantaş Barajı enerji, sulama ve taşkın amaçlı, Berke Barajı ve Sır Barajı ise enerji amaçlı işletilmektedir. Genelleştirilmiş simülasyon programı HEC-ResSim kullanılarak çoklu rezervuar sistem yaklaşımı ile işletme çalışması yapılmıştır. Barajların hali hazırdaki durumları için işletme kuralları belirlenmiştir.

2. ÇALIŞMA ALANI

Ceyhan Nehri'nin Ceyhan Havzası, 36°55' ile 38°72' kuzey enlemleri 35°45' ile 37°81' doğu boylamları arasında Türkiye'nin Doğu Akdeniz Bölgesi'nde bulunmaktadır. 21391 km²'lik yüz ölçümüne sahip Ceyhan Havzası batıda Seyhan, kuzeyde ve doğuda Fırat, güneyde Asi ve Fırat havzaları ile sınırlanmıştır. Yer şekilleri ve iklim özellikleri bakımından Yukarı Ceyhan, Orta Ceyhan ve Aşağı Ceyhan olmak üzere üç alt havzaya ayrılmıştır. Yukarı Ceyhan Havzası'nda karasal iklim, Orta Ceyhan Havzası'nda karasal iklim ile akdeniz iklimi arasında geçiş iklimi, Aşağı Ceyhan Havzası'nda akdeniz iklimi hakimdir. Elbistan ilçe merkezinin 3 km doğusunda Pınarbaşı Mevkii'nde karstik kaynaklardan doğan Ceyhan Nehri, 509 km uzunluğa sahiptir [13]. Ana ve tali kolları üzerinde sulama, içme-kullanma suyu temini, taşkın kontrolü, hidroelektrik enerji üretimi, havzalar arası su aktarma gibi farklı amaçlar için inşa edilen barajlar mevcuttur. Aslantaş Barajı, Berke Barajı ve Sır Barajı ana kol üzerinde ardışık olarak inşa edilmiştir. Ardışık barajların boykesiti Şekil 1'de verilmiştir [13].



Şekil 1- Simülasyon çalışması yapılan ardışık barajların boykesiti

Aslantaş Barajı, Aşağı Ceyhan Havzası'nda, Osmaniye ilinde yer almaktadır. Kil çekirdekli zonlu toprak dolgu baraj olarak inşa edilmiştir. Su temini, taşkın kontrolü ve enerji amaçlı olarak 1984 yılında işletmeye açılmıştır. 14874 km²'lik yağış alanına sahiptir. Ortalama doğal akımı 5604 hm³/yıl'dır. Berke Barajı, Aşağı Ceyhan Havzası'nda, Osmaniye ilinde yer

almaktadır. Aslantaş Barajı'nın membasında, çift eğrili ince kemer baraj olarak inşa edilmiştir. Enerji amaçlı olarak 2002 yılında işletmeye açılmıştır. 13500 km²'lik yağış alanına sahiptir. Ortalama doğal akımı 4511 hm³/yıl'dır. Sır Barajı, Orta Ceyhan Havzası'nda, Kahramanmaraş ilinde yer almaktadır. Berke Barajı'nın membasında beton kemer baraj tipinde inşa edilmiştir. Enerji amaçlı olarak 1991 yılında işletmeye açılmıştır. Ortalama doğal akımı 424 hm³/yıl'dır. Barajlara ait teknik karakteristik bilgiler Tablo 1'de verilmiştir [13].

Tablo 1- Çalışmada kullanılan barajların teknik karakteristik özellikleri

	Aslantaş Barajı	Berke Barajı	Sır Barajı
Maksimum su kotu (m)	155	345	440
Normal işletme kotu (m)	146	345	436
Minimum su kotu (m)	130	290	417,50
Kret kotu (m)	160	346	443
Kret uzunluğu (m)	566	270	327
Dolusavak tipi	Karşıdan alışı, radyal kapaklı	1)Tünel dolusavak 2)Gövde yüzey dolusavak	Gövdeye bitişik, radyal kapaklı
Dolusavak eşik kotu (m)	139	290 - 337,50	423
Dolusavak kapak sayısı (adet)	6	2 - 4	3
Dolusavak deşarj kapasitesi (m ³ /s)	13800	2755*2 – 500*4	7646
Kurulu güç (MW)	138	514,50	261
Kuyruk suyu kotu (m)	84,15	159	346,72
Ünite sayısı (adet)	3	3	3
Net düşü (m)	62	186,31	89,28
Q _{proje} (m ³ /s)	270	100	114,25
Üretilen güvenilir (firm) enerji (GWh/yıl)	320	921	408,4
Üretilen ikincil (sekonder) enerji (GWh/yıl)	249	748	316,5
Üretilen toplam enerji (GWh/yıl)	569	1669	724,9

3. METOT

Barajlar taşkın kontrolü, su temini, hidroelektrik enerji üretimi gibi birden fazla amaca hizmet edecek şekilde ardişik olarak inşa edilebilirler. Çok amaçlı ardişik barajların her bir amaca

uygun şekilde işletilmesi, her amaca uygun kısıtlamayı beraberinde getirir. Bu kısıtlamaları karşılayacak doğrultuda işletme kurallarının belirlenmesini kolaylaştırmak maksadıyla rezervuar simülasyon modelleri geliştirilmiştir [3]. Rezervuar simülasyon modeli, rezervuarların özelliklerini matematiksel olarak ifade eden [2], her bir ardışık zaman aralığında, belirlenen alternatifler doğrultusunda sistemin davranışını tahmin etmeye olanak sağlayan tekniktir [14]. Rezervuar simülasyon modeli, bir rezervuarın giriş akımları ile çıkış akımları arasındaki su denge denklemine bağlı olarak tahminlerde bulunur.

Bir barajın t anında işletilmesine dair su denge denklemi Eş. 1'deki gibi ifade edilir:

$$S_t = S_{t-1} + I_t - R_t - Q_t - B_t \quad (1)$$

Burada; S_t , t süresince rezervuar depolaması, S_{t-1} , t-1 süresince rezervuar depolaması, I_t , t süresince rezervuar giriş akımı, R_t , t süresince rezervuar çıkış (dolusavak + su temini) akımı, Q_t , t süresince enerji üretimi için salınan su miktarı, B_t , t süresince buharlaşma miktarıdır.

Bu çalışmada, çok amaçlı çoklu rezervuar sisteminin işletilmesinde geliştirilmiş simülasyon programı HEC-ResSim kullanılmıştır.

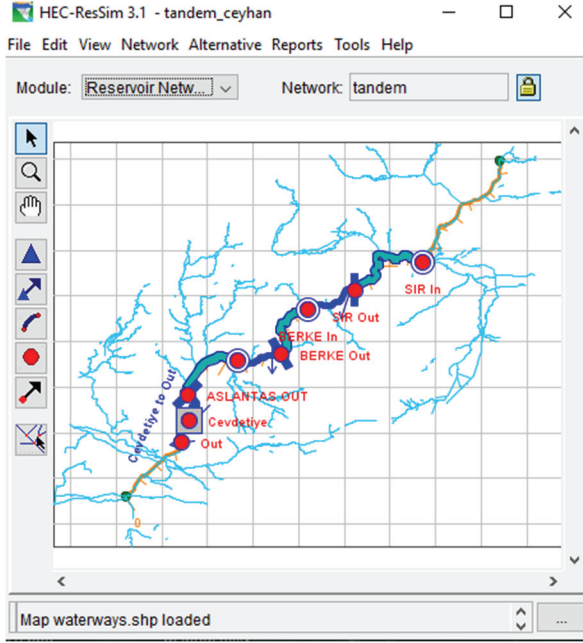
3.1. HEC-ResSim Modeli

HEC-ResSim, ABD Ordusu Mühendisliği Birliği tarafından geliştirilen, çoklu rezervuar sistemlerinin değerlendirilmesine olanak sağlayan geliştirilmiş rezervuar simülasyon programıdır. Program, rezervuar operatörlerinin enerji üretimi, taşkın yönetimi ve çevresel akış için belirlediği kurallar altında sistemin davranışını belirler. Model, bir rezervuar akımını etkileyebilecek hidrolojik koşulları, sistemde bulunan diğer rezervuarların eş zamanlı işletilmesi gibi parametreleri içerir [15]. HEC-ResSim, havza kurulum modülü, rezervuar ağ modülü ve simülasyon modülü olmak üzere modül adı verilen üç işlev kümesine ayrılmıştır. Havza kurulum modülünde nehir güzergahı çizilir ve havzanın fiziksel düzenlemesi yapılır. Rezervuar ağ modülünde havzada bulunan yapıların fiziksel bileşenleri, işletme kuralları ve analiz edilecek alternatifler tanımlanır. Simülasyon ağ modülünde simülasyon zaman aralıkları ve simülasyonun yapılacağı alternatif seçilip, simülasyon başlatılır.

Programın karar verme mantığı, hedef yükseklik olarak kullanıcı tarafından tanımlanan kılavuz eğrisine dayanmaktadır. Tanımlanan işletme kurallarına bağlı olarak hedeflenen kılavuz eğrisini ya da hedeflenen kılavuz eğrisine en yakın eğriyi uygulayarak simülasyon yapmaktadır [16]. HEC-ResSim modeli, her bir rezervuarın işletilmesi esnasında rezervuar seviyesinin bulunduğu zondaki kuralı öncelik sırasına göre kullanır.

Bu çalışmada Aslantaş Barajı, Berke Barajı ve Sır Barajı dahil olmak üzere mevcut bir sistemin simülasyon modeli oluşturulmuştur. Simülasyon çalışması, Tablo 1'de verilen teknik karakteristik özellikler, 1970-2012 yılları arasındaki doğal akım değerleri, barajların işletme amaçları dikkate alınarak günlük zaman aralığında gerçekleştirilmiştir. Program, simülasyon süresinin her bir zaman aralığında giriş verisine ihtiyaç duyar. Bu çalışmada, sistemin girdisi iki rezervuar arasındaki ara havza doğal akımı ile mambadaki barajın çıkış akımlarıdır. Bu nedenle, giriş akımlarının ve çıkış akımlarının deşarj edildiği noktalar belirlenmiştir (Şekil 2). Su temin değerleri Ceyhan Master Planı'ndan alınmıştır. Su temin değerleri hesaplanırken Aslantaş Barajı için E20A20 Akım Gözlem İstasyonu (AGİ), Berke

Barajı ve Sır Barajı için E20A001, E20A010 ve E20A020 AGİ'lerinde ölçülen akım değerlerinden yararlanılmıştır [13]. 1970-2012 yıllarına ait akım verileri kullanılmıştır. Barajın işletilmesi esnasında giriş akımı ve çıkış akımı arasındaki su dengesine bağlı olarak depolama kapasitesinin belirlenmesi için kot-alan-hacim eğrisi tanımlanmıştır. Sadece buharlaşmadan kaynaklı su kaybı dikkate alınmıştır, sızma kayıpları ihmal edilmiştir.



Şekil 2- Mevcut sistemin HEC-ResSim Modeli

Bu çalışmada, barajlar ölü hacim, aktif hacim ve taşkın kontrol hacmi olmak üzere üç zona ayrılmış ve aktif hacim kılavuz eğrisi olarak tanımlanmıştır. Ceyhan Master Planı ile karşılaştırma yapılabilmesi için Kılavuz Eğrileri Ceyhan Master Planı'nda olduğu gibi Aslantaş Barajı için Kasım-Nisan ayları arası 143 m, Mayıs-Ekim ayları arası 153 m, Berke Barajı için sabit 344 m, Sır Barajı için sabit 438 m olarak belirlenmiştir. Barajların zonlarına işletme amaçları göz önünde bulundurularak kurallar tanımlanmış ve önem derecelerine göre sıralanmıştır. Çevresel akışın devamlılığını sağlamak için salıverilmesi gereken minimum su kuralı, üç baraj için en öncelikli kural olarak uygulanmıştır. Bu kural, 2003-2012 yılları arası doğal akımların ortalamasının %10'u alınarak belirlenmiştir. Çevresel akış kuralından sonra, barajın işletme amacına göre su temini, hidroelektrik enerji üretimi, dolusavak deşarjı ile ilgili kurallar sıralanmıştır. Ancak, önemli bir kuralı kısıtlayan herhangi bir kısıtlayıcı kuralın varlığında bu kısıtlayıcı kurala öncelik verilmiştir. Berke ve Sır Barajı enerji amaçlı işletildikleri için bu barajlara çevresel akış kuralı, hidroelektrik enerji üretimi için kurallar ve olası taşkın anında suyun salıverilmesi için dolusavak deşarjı ile ilgili kurallar tanımlanmıştır. Aslantaş Barajı'nın Cevdetiye Regülatörü'ne su temin etme amacı olduğu için Cevdetiye Regülatörü için akış aşağı aylık su gereksinim kuralı tanımlanmıştır.

Hidroelektrik enerji kuralı tanımlanırken 2018 yılında üretilen enerji dikkate alınmış ve aylık enerji üretimi MWh talep edilmiştir. Türbinlerden salıverilebilecek suyun maksimum fiziksel kapasiteyi aşmaması önemli olduğundan, türbinlerden salıverilecek maksimum su için sınırlama kuralı belirlenmiştir. Türbinlerden salıverilecek minimum su kısıt olarak tanımlanmıştır. Ayrıca, barajların fiziksel karakteristikleri tanımlanırken enerji üretimi için tasarım debisinin her cebri boruda eşit dağıtıldığı, hidrolik kayıpların her baraj için sabit 1 m, jeneratör veriminin %97 olduğu kabul edilmiştir.

Dolusavak deşarjı ile ilgili kural tanımlanırken barajların geçmiş yıllardaki gözlenen giriş akımları dikkate alınmıştır. Eğer rezervuar su seviyesi taşkın kontrol hacminde bulunmuyorsa, giriş akımına bağlı olarak Aslantaş Barajı için Kasım-Mayıs, Berke Barajı için Nisan-Mayıs, Sır Barajı için Ocak-Mayıs ayları arasında dolusavaktan suyun salıverilmesine izin verilmiştir. Bu zaman aralıkları geçmiş yıllarda savaklanan akım değerlerinin yine aynı zaman aralıklarında tekrarlanacağı düşünülerek gözlenen akım verilerinin analizi sonucunda belirlenmiştir. Ancak, rezervuar su seviyesi taşkın kontrol hacminde bulunuyorsa on iki ay boyunca dolusavaktan su salıverilmesine izin verilmiş ve olası taşkın ihtimali düşünülerek maksimum deşarj kapasiteleri sınır olarak belirlenmiştir.

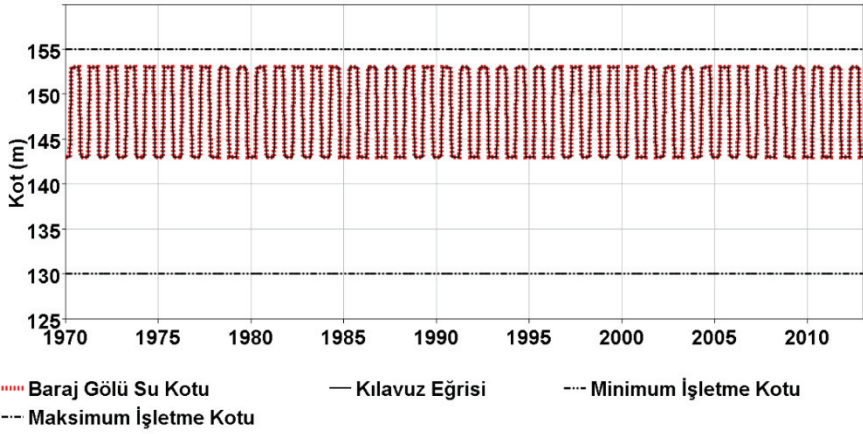
4. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu simülasyon çalışmasında Aslantaş Barajı, Berke Barajı ve Sır Barajı'nın ürettikleri yıllık toplam enerjiyi maksimize etmek amaçlanmıştır. HEC-ResSim ile yapılan simülasyon sonuçları ile Ceyhan Master Plan sonuçları kıyaslanmıştır (Tablo 2).

Tablo 2- Ceyhan Master Planı ve HEC-ResSim ile simülasyon sonucunda üretilen yıllık toplam enerji (GWh)

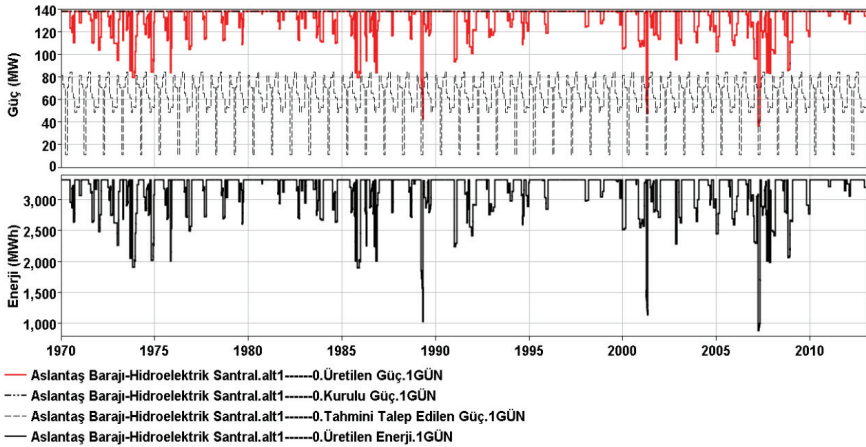
	Ceyhan Master Planı	HEC-ResSim ile simülasyon sonucu
Aslantaş Barajı	674	1150,44
Berke Barajı	1730,9	3084,07
Sır Barajı	812,6	842,70

Aslantaş Barajı'nda üretilen yıllık enerjiyi maksimum seviyede tutmak için Kılavuz Eğrisi Kasım-Nisan ayları arası 143 m, Mayıs-Ekim ayları arası 153 m olarak belirlenmiştir. Çalışmanın temel amacı üretilen yıllık toplam enerjiyi maksimum seviyede tutmak olsa da Aslantaş Barajı çok amaçlı işletilmekte olduğu için diğer işletme amaçları da değerlendirilmiştir. Simülasyon sonucunda Aslantaş Barajı, çevresel akış ve Cevdetiye Regülatörü için gerekli olan akış aşağı su ihtiyacını karşılayabilmiştir. Ayrıca taşkın riskine rastlanmamıştır (Şekil 3).



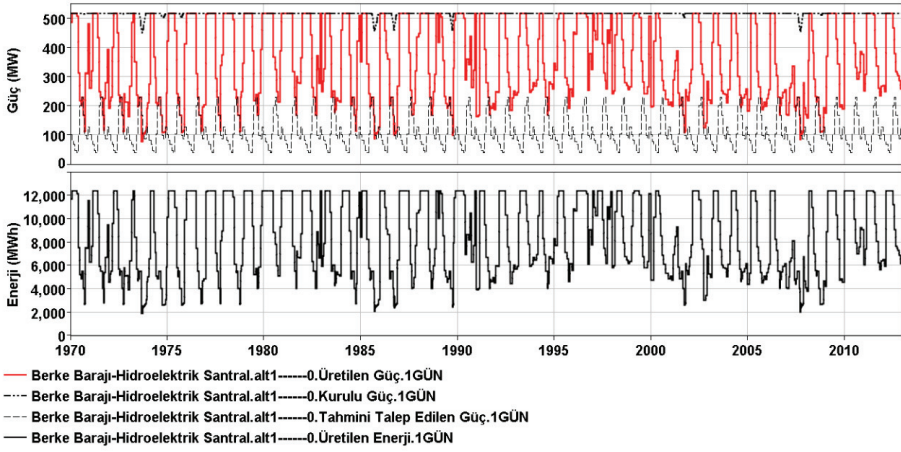
Şekil 3- Simülasyon sonucunda Aslantaş Barajı Kılavuz Eğrisi

Aslantaş Baraj gölünde depolanan suyun tünel ve cebri boru ile 83 m kotuna düşürülmesiyle enerji üretilmiştir. Yıllık toplam 1150,44 GWh enerji üretebildiği sonucuna ulaşılmıştır (Tablo 2.). Ceyhan Master Planı raporuna göre Aslantaş Barajı'nın bir yılda toplam 674 GWh enerji üretmesi beklenmektedir. Bu iki sonuç kıyaslandığında Aslantaş Barajı'nın ürettiği yıllık toplam enerjide artış görülmektedir. Şekil 4'de simülasyon sonucunda üretilen gücün, kullanıcı tarafından belirlenen tahmini talep edilen güçten daha fazla olduğu görülmektedir. Aslantaş Barajı, 321,21 GWh/yıl güvenilir enerji ve 829,23 GWh/yıl ikincil enerji üretmiştir. Aslantaş Barajı, 43 yıllık zaman aralığında talep edilen minimum enerjiyi sağlamış ve Nisan 2007'de minimum enerji üretmiştir (Şekil 4).

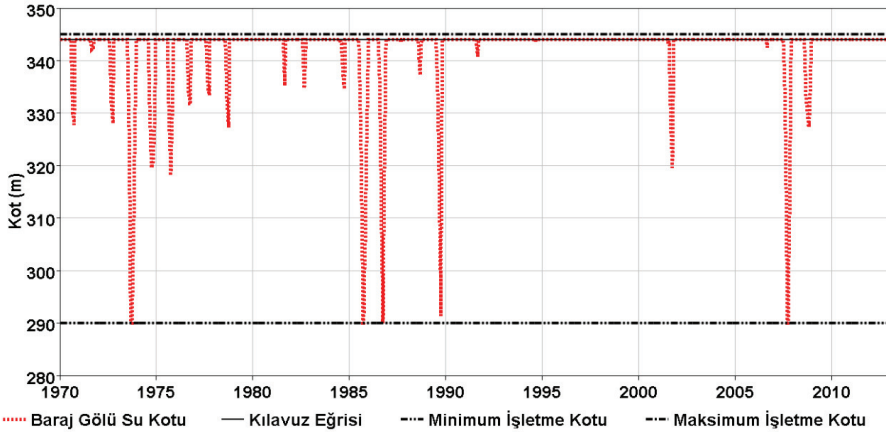


Şekil 4- Simülasyon sonucunda Aslantaş Barajı'nın ürettiği güç ve enerji

Enerji amaçlı işletilmekte olan Berke Barajı için Kılavuz Eğrisi on iki ay boyunca sabit 344 m belirlenmiştir. Simülasyon sonucunda barajın yıllık toplam 3084,07 GWh enerji ürettiği Tablo 2’de verilmiştir. Berke Barajı, 688,92 GWh/yıl güvenilir enerji ve 2393,55 GWh/yıl ikincil enerji üretmiştir. İşletme çalışmasında Berke Barajı’nda üretilen yıllık toplam enerji için maksimum seviyeye ulaşılmış ancak kurak dönemlerde talep edilen minimum enerjinin istenilen seviyede olmadığı sonucuna varılmıştır (Şekil 5). Simülasyon çalışması boyunca en düşük aylık toplam enerji üretimi Eylül 2007 tarihinde 89,18 GWh olarak gözlenmiştir (Şekil 5). Şekil 6’da görüldüğü gibi kurak dönemlerde barajda depolanan su minimum işletme kotuna düşmüştür ancak çevresel akış için gerekli suyu sağlamıştır.

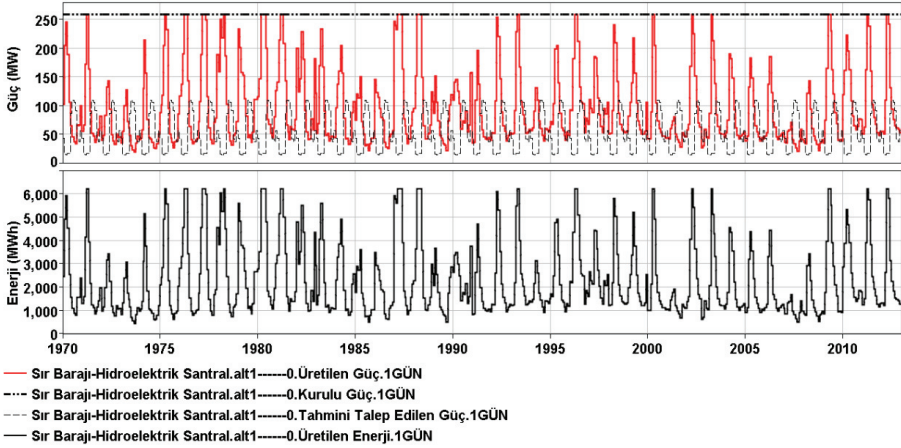


Şekil 5- Simülasyon sonucunda Berke Barajı'nın ürettiği güç ve enerji

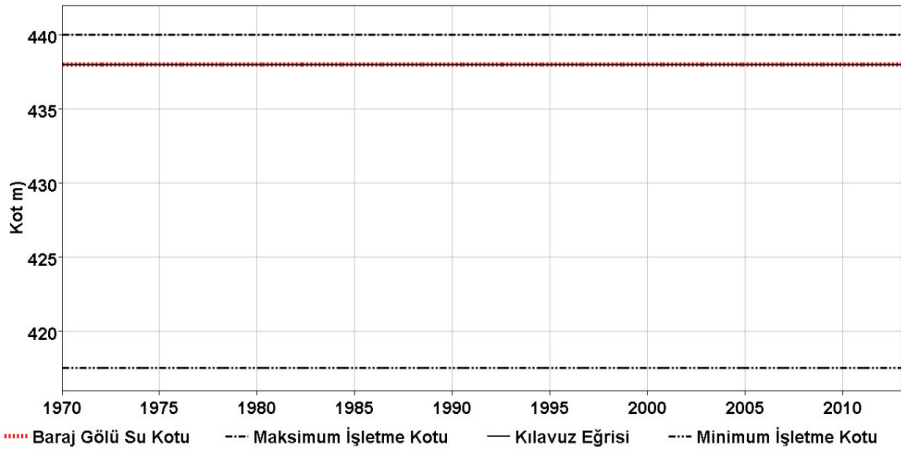


Şekil 6- Simülasyon sonucunda Berke Barajı Kılavuz Eğrisi

Sır Barajı için kılavuz eğrisi on iki ay boyunca sabit 438 m belirlenmiştir. Tablo 2’de verilen değerler karşılaştırıldığında Sır Barajı 842,70 GWh enerji üreterek Ceyhan Master Planı sonuçlarına göre daha fazla enerji üretmiştir. 160,89 GWh/yıl güvenilir enerji, 681,80 GWh/yıl ikincil enerji üretmiştir. 43 yıllık zaman periyodunda genellikle Temmuz, Ağustos ve Eylül aylarında üretilmesi talep edilen minimum enerjiye ulaşamamıştır (Şekil 7). Kullanıcı tarafından belirlenen kılavuz eğrisini uygulamış, çevresel akış için su yetersizliğine rastlanmamıştır (Şekil 8).



Şekil 7- Simülasyon sonucunda Sır Barajı'nın ürettiği güç ve enerji



Şekil 8- Simülasyon sonucunda Sır Barajı Kılavuz Eğrisi

5. SONUÇLAR

Ardışık inşa edilen barajlar nehirdeki akım rejimini düzenli hale getirmekte ve her baraj kendisinden bir sonraki baraj için giriş akımı sağlamaktadır. Bu nedenle ardışık barajların bir sistem olarak değerlendirilmesinin gerekli olduğu söylenebilir. Bu çalışmada, Aslantaş Barajı, Berke Barajı ve Sır Barajı bütüncül bir yaklaşımla bir sistem olarak işletilmiş, yıllık toplam üretebilecekleri enerji maksimize edilmiş ve Ceyhan Master Planı sonuçları ile kıyaslanmıştır.

Bu üç baraj bir sistem olarak değerlendirildiğinde Ceyhan Master Planı sonuçları ile kıyaslandığında toplamda %57,87 daha fazla enerji üretmiştir. Üretilen toplam enerjideki bu artış, çalışmada sadece üç barajın ele alınması ve bu üç barajın bütünsel olarak ürettiği yıllık toplam enerjisi maksimize edecek işletme kurallarının uygulanmış olmasıyla açıklanabilir. Ayrıca, bu çalışmada Berke Barajı'nın beş defa minimum hazne kotuna düşmesine izin verilmiştir. Bu durumun da Ceyhan Master Planı sonuçları ile bu çalışma arasındaki farka sebep olabileceği düşünülmektedir. Barajlarda üretilen enerjideki artış incelendiğinde Aslantaş Barajı ve Berke Barajı'nda üretilen enerjideki artışın, Sır Barajı'nda üretilen enerjideki artıştan daha fazla olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Bu durumun nedeni Aslantaş Barajı ile Berke Barajı'nın daha mansapta bulunması ve bu barajlara gelen akımın kendilerinden önceki baraj tarafından düzenlenmesi ile ilişkilendirilebilir. Çalışmanın amacı üç barajın birlikte yıllık toplam enerjisini maksimize etmek olduğu için güvenilir enerji için alt sınır tanımlanmamıştır. Bu sebeple, Berke ve Sır Barajlarında üretilen güvenilir enerji Master Planı sonucuna göre düşük, Aslantaş Barajı'nda üretilen güvenilir enerji ise bir miktar yüksek çıkmıştır.

Çalışmada oluşturulan model farklı amaçlar için de kullanılabilir şekilde esnek ve her türlü alternatif çalışmalar için hazırdır. Çalışmada oluşturulan model ile mevcut verilerle sistemin toplam enerjisi eniyilenmiştir. Ancak model, sonraki yıllar için farklı veri ve talep senaryoları girilerek, ileriye dönük sonuçlar almak için de uygundur. Buradan da modelin ileriye dönük iklim değişikliği senaryoları için rahatlıkla kullanılabilirliği söylenebilir.

Semboller

$AG\dot{I}$: Akım Gözlem İstasyonu
B_t	: t sürede buharlaşma miktarı
HEC-ResSim	: Reservoir System Simulation
HES	: Hidroelektrik Santral
I_t	: t sürede rezervuar giriş akımı
R_t	: t sürede rezervuar çıkış (doluşavak + su temini) akımı
S_t	: t süre sonundaki rezervuar depolaması
S_{t-1}	: t-1 süre sonundaki rezervuar depolaması
Q_t	: t sürede enerji üretimi için salıverilen su miktarı

Teşekkür

Bu çalışma, Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (Proje No: FYL-2019-12041) tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Ostadrahimi L., Mariño M. A., Afshar A., Multi-reservoir Operation Rules: Multi swarm PSO-based Optimization Approach, *Water Resour Manage*, 26, 407–427, 2011.
- [2] Yeh W. W-G., Reservoir Management and Operations Models: A State-of-the-Art Review, *Water Resources Research*, 21 (12), 1797-1818, 1985.
- [3] Wurbs R. A., Comparative Evaluation of Generalized River/Reservoir System Models, Technical Report No. 282, Texas Water Resources Institute the Texas A&M University System College Station, Texas, 2005.
- [4] Emery D. A., and Meek B. I., The Simulation of a Complex River System, in *Les Choix Exonomiques*, Dunod, Paris, 1960.
- [5] Babel M. S., Dinh C. N., Mullick Md. R. A., and Nanduri U. V., Operation of A Hydropower System Considering Environmental Flow Requirements: A Case Study in La Nga River Basin, Vietnam, *Journal of Hydro-environment Research*, 6, 63-73, 2012.
- [6] Choo T. H., Huh, J. Y., Yoon H. C., Yun G. S., and Son J. K, Method for New Conceptual Securing Water Resources: A Case Study of the Miryang Multipurpose Dam in Korea, *Environmental Earth Sciences*, 75, 857, 2016.
- [7] Shrestha S., Khatiwada M., Babel M. S., and Parajuli K., Impact of Climate Change on River Flow and Hydropower Production in Kulekhani, Hydropower Project of Nepal. *Environmental Processes*, 1, 231-250, 2014.
- [8] Firoz A. B. M., Nauditt A., Fink M., and Ribbe L., Quantifying Human Impacts on Hydrological Drought Using A Combined Modeling Approach in A Tropical River Basin in Central Vietnam, *Hydrology and System Sciences*, 22, 547-565, 2018.
- [9] Uysal G., Şensoy A., Şorman A. A., Akgün T., Gezgin T, Basin/Reservoir System Integration for Real Time Reservoir Operation, *Water Resour Manage*, 30, 1653-1668, 2016.
- [10] Özbakır B., Seyhan ve Ceyhan Nehir Havzalarının Hec-ResSim Programı ile Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 136s, 2009.
- [11] Akbulut U., Çok Amaçlı Baraj İşletme Çalışmaları ve Ceyhan Havzasının HEC-5 Simülasyon Programı ile Modellenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2003.
- [12] Sever S., Çok Amaçlı Ardışık Baraj Haznelerinin İşletmesinin HEC-ResSim ile Simülasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 2020.

- [13] DSİ Genel Müdürlüğü, Ceyhan Master Planı, Türkiye, 2016.
- [14] Wurbs R. A., Reservoir-System Simulation and Optimization Models, Journal of Water Resources Planning and Management, 119 (4), 455-472, 1993.
- [15] Seyoum T., and Theobald S., Modeling of Cascade Dams and Reservoirs Operation for Hydropower Energy Generation, Proceedings of the 11th International Conference on Hydroscience & Engineering, Karlsruhe-Bundesanstalt für Wassereserbau, 109-118, 2014.
- [16] Klipsch T., HEC-ResSim Enhancements: Better Tools to Simulate the Operation of California Reservoirs, Water and Environmental Modeling Forum (CWEMF) Annual Meeting, Sacramento, CA, USA, 2007.

Doğu Karadeniz Havzası Lokal Meteorolojik Değişkenleri İçin Bir Ölçek İndirgeme Uygulaması ve Senaryo Esaslı Öngörüler

Sinan NACAR¹
Murat KANKAL²
Umut OKKAN³

ÖZ

İklim değişikliği konusu çevresel, ekonomik ve sosyal etkileri nedeniyle dünya çapında tartışılan en önemli sorunlardan biri haline gelmiştir. İklim değişikliği etkisinin büyüklüğünün belirlenmesi ve olası uyum çalışmaları için en önemli iklim değişkenlerinden olan sıcaklık ve yağışın, gelecek dönemlerdeki değişimlerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla genel dolaşım modellerinin (GDM) kaba çözünürlüklü senaryo çıktıları kullanılmaktadır. Bu çıktıların düşük çözünürlüğe sahip olması bölgesel ölçekteki iklim değişikliği etkilerinin belirlenmesinde doğrudan kullanımlarını kısıtlamaktadır. Bölgesel ölçekteki değişimlerin belirlenebilmesi için GDM çıktılarının uygun bir ölçeğe indirgenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada Türkiye'nin en önemli hidrolojik havzalarından biri olan Doğu Karadeniz Havzası'nda (DKH) iklim değişikliğinin aylık toplam yağış ve aylık ortalama sıcaklık değişkenleri üzerindeki olası etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla GFDL-ESM2M GDM modelinin iyimser (RCP4.5) ve kötümser (RCP8.5) senaryolarına ait düşük çözünürlüklü çıktıları Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (ÇDURE) ve klasik regresyon analizi yöntemleri kullanılarak bölgesel ölçeğe indirgenmiştir. Yöntemlerin ölçek indirgeme başarılarının karşılaştırılabilmesi için çeşitli performans istatistikleri kullanılmış ve en yüksek performansı veren yöntem bu istatistiklere göre seçilmiştir. Çalışma kapsamında DKH içinde ve çevresinde yer alan 12 adet meteoroloji istasyonuna ait gelecek dönem (2021-2050, 2051-2080, 2081-2100) aylık ortalama sıcaklık ve aylık toplam yağış değerleri en iyi performans gösteren ÇDURE tabanlı modeller kullanılarak iki farklı senaryo için elde edilmiştir. Elde edilen senaryo verilerine ayrıca Mann-Kendall eğilim analizi uygulanmıştır. Sonuçlar DKH'nın karasal iklim karakteristiğine sahip güney bölümünde

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 11 Mart 2021 günü ulaşmıştır. 8 Eylül 2022 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Ocak 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.895112>

1 Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tokat
sinan.nacar@gop.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-2497-5032>

2 Bursa Uludağ Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Bursa
mkankal@uludag.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-0897-4742>

3 Balıkesir Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Balıkesir
umutokkan@balikesir.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-1284-3825>

(Bayburt, Gümüşhane, Suşehri ve Şebinkarahisar istasyonları) gelecek dönem 2021-2050 periyodunda sıcaklık değerlerinde RCP4.5 senaryosuna göre ortalama 1,0 °C, RCP8.5'e göre ise ortalama 1,5 °C artış beklendiğini göstermektedir. Bunun yanında Rize, Pazar ve Hopa istasyonlarının yer aldığı kıyı şeridinde sıcaklık değerlerinde 2,5 °C'ye varan artışlar öngörülmektedir. Uzun süreli yağış ortalaması değerlerinde ise havza genelinde her iki senaryoya göre düşüş beklenmektedir. 2051-2080 ve 2081-2100 dönemlerinde ise sıcaklık ve yağış değerlerinde beklenen değişimlerin 2021-2050 dönemine kıyasla daha fazla olacağı öngörülmektedir. Eğilim analizi sonuçlarına göre sıcaklık ve yağış için RCP4.5 senaryosuna göre gelecek dönemlerde %5 anlamlılık düzeyinde herhangi bir eğilim beklenmezken RCP8.5 senaryosuna göre sıcaklık için artış, yağış için düşüş eğilimleri tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri, Doğu Karadeniz Havzası, GFDL-ESM2M, iklim değişikliği, ölçek indirgeme, eğilim analizi.

ABSTRACT

A Downscaling Application for Local Meteorological Variables of Eastern Black Sea Basin and Scenario Based Predictions

Climate change has become one of the most important problems discussed around the world due to its environmental, economic and social impacts. In order to determine the magnitude of the impact of climate change and possible adaptation studies, it is necessary to determine the changes in the future periods of temperature and precipitation being the most important variables of the climate. For this purpose, scenario outputs of general circulation models (GCM) with coarse spatial resolution are used. The low resolution of these outputs limits their direct use in determining the effects of climate change on a local scale. Therefore, GCM outputs should be downscaled into finer scale. The aim of this study is to determine the possible effects of climate change on precipitation and temperature values of Eastern Black Sea Basin (EBSB), which is one of the most important hydrological basin in Turkey. For this purpose, the coarse resolution outputs of the GFDL-ESM2M model under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios were reduced to local scale using the multivariate adaptive regression splines (MARS) and classical regression analysis (CRA) methods. Various performance statistics were used to compare the downscaling capabilities of MARS and CRA based models, and the method with the highest performance was determined according to these statistics. Within the scope of the study, the monthly average temperature and total precipitation values for the next period (2021-2050, 2051-2080, 2081-2100) of 12 meteorology stations located in and around the basin were produced by using MARS-based models that give the best performance values. Mann-Kendall trend analysis was also applied to the scenario data obtained. According to the results, it is expected that the temperature values in the southern part of the basin with terrestrial climate characteristics (Bayburt, Gümüşhane, Suşehri ve Şebinkarahisar stations) will increase by an average of 1 °C according to the RCP4.5 scenario and 1.5 °C according to the RCP8.5 scenario in the period 2021-2050. In addition, temperature increases of up to 2.5 °C are foreseen on the coastline of the basin where the Pazar, Rize and Hopa stations are located. According to the outputs of both scenarios, is expected in long-term precipitation average values in almost all of the basin. In the periods of 2051-2080 and 2081-2100, it is foreseen that the increases and decreases in temperature and precipitation values will be more than the 2021-2050 period.

According to the results of the trend analysis, the RCP4.5 scenario for temperature and precipitation, no trend is expected in the future, while according to the RCP8.5 scenario, an increase trend for temperature and a decrease trend for precipitation have been determined.

Keywords: Multivariate adaptive regression splines, Eastern Black Sea Basin, GFDL-ESM2M, climate change, downscaling, trend analysis.

1. GİRİŞ

Son yıllarda meydana gelen nüfusa bağlı endüstriyel aktivitelerdeki artış ve ekosistemin bilinçsiz bir şekilde kullanılması ve tahrip edilmesi sera gazı salınımlarının yükselmesine neden olmuştur [1, 2]. Bu yükselme mevcut sera etkisini daha da artırarak küresel ısınmayı şiddetlendirmiş ve yeryüzündeki iklim karakteristiklerinin hızlı ve şiddetli bir biçimde değişmesine yol açmıştır [3]. Yaşanan değişimlerin nedenlerini ve sonuçlarını kapsamlı bir şekilde araştırmak amacıyla, 1988 yılında kurulan Dünya Meteoroloji Örgütü ve Birleşmiş Milletler Çevre Programı tarafından farklı dönemlerde Hükümetlerarası İklim Değişikliği Panelleri (IPCC) gerçekleştirilmiştir. IPCC'nin 2013 yılında yayınlamış olduğu raporda iklim sisteminde meydana gelen değişimlerin %100 insan etkisi ile meydana geldiği kesin bir dille vurgulanmıştır [4]. Ayrıca 2018 yılında yayınlamış olan IPCC raporunda, iklim sisteminde son birkaç on yılda meydana gelen değişikliklerin gelecek dönemlerde en az birkaç on yıl etkisini sürdüreceğini ve bu durumun doğal döngüde çok ciddi bozulmalara neden olacağı ifade edilmektedir [5]. Bunun yanında iklim değişikliği etkilerinin incelenmesi üzerine yapılan çalışmaların birçoğu iklim değişikliğinin ülkelerin ekonomik ve sosyal gelişimini önemli ölçüde etkilediğini ve ekosistemde geri dönüşmez bir bozulmaya neden olduğunu açıkça göstermektedir [6]. Ouhamdouch ve Bahir [7] yapmış oldukları çalışmada iklim sisteminde meydana gelen değişimler sonucu son otuz yılda küresel anlamda meydana gelen sıcaklık artışı, 1850 yılından bu güne kadar geçen sürede meydana gelen en yüksek artış olduğunu ifade etmişlerdir. Trenberth [8] ise yer kürede meydana gelen her 1 °C'lik sıcaklık artışının atmosferin su tutma kapasitesini yaklaşık olarak %7 oranında artıracakını ve bu durumun ise yağış miktarını etkileyeceğini ortaya koymuştur. Bugüne kadar yapılmış olan iklim değişikliği etkilerinin incelendiği çalışmalar, bu etkilerin farklı şiddetlerde olsa da dünyanın bütün bölgelerinde hissedileceğini ortaya koymuştur [9-13]. Türkiye meydana gelmesi muhtemel bu iklim değişikliği etkilerini Akdeniz İklim Kuşağı'nda yer alması sebebiyle çok daha belirgin bir şekilde hissedilen ve gelecekte de hissedecek olan bir ülke durumundadır. Ayrıca Türkiye'nin farklı bölgeleri için yapılan tüm iklim değişikliği etki çalışmaları, Türkiye'nin hemen her bölgesinin beklenen değişikliklerden çok ciddi bir biçimde etkileneceğini açıkça ortaya koymaktadır [14-16]. İklim değişikliği sonucunda meydana gelecek bu değişimlerin etkilerini ötelemek ve bu etkilerin oluşturacağı sonuçlara uyum sağlayabilmek için bu konunun tüm yönlerinin bilinmesi ve tüm bölgeler için gerekli çalışmaların yapılmış olması gerekmektedir [17, 89].

Doğu Karadeniz Havzası (DKH) Türkiye'nin yıl boyunca yağış alan önemli hidrolojik havzalarından biridir. Havzada özellikle ilkbahar aylarında meydana gelen şiddetli yağışlar ve havaların ısınmasıyla yüksek kesimlerindeki kar erimesi sonucu sık sık taşkınlar meydana gelmiş ve bu taşkınlar sonucu büyük ölçekli ekonomik zararların yanında birçok can kaybı yaşanmıştır [18]. Ayrıca DKH sahip olduğu coğrafi özellikler nedeniyle birçok nehir tipi hidroelektrik santrali içerisinde barındırmaktadır. Bir bölgenin iklimini tayin etmede

kullanılan ve hidrolojik çevrimin en önemli değişkenleri olan sıcaklık ve yağış değerlerinin DKH için iklim değişikliği etkisi altında gelecek dönemlerde nasıl değişeceğinin bilinmesi havzada gelecekte yaşanması muhtemel aşırı hava olayları sonucunda oluşacak doğal afetlerin önceden tahmin edilmesi bakımından çok önemlidir. İklim değişikliğinin gelecek dönemlerde hidrolojik çevrimin en önemli değişkenleri olan sıcaklık ve yağış üzerindeki etkilerinin belirlenmesi tüm doğal ve sosyo-ekonomik sistemlerin suya bağlı olmasından dolayı hayati bir öneme sahiptir [19]. Gelecek dönemlere ait iklimin ve iklim değişkenlerinin belirlenmesinde genellikle üç yaklaşım kullanılmaktadır. Bunlar, geçmiş iklim verilerinden gelecekteki iklimin istatistiksel bir yaklaşımla yansıtılması, sentetik iklim senaryolarının kullanılması ve genel dolaşım modelleri (GDM) çıktılarının kullanılması yaklaşımlarıdır. Bu yaklaşımlardan iklim değişikliği çalışmalarında en yaygın kullanılanı GDM çıktılarının kullanılmasıdır [10]. GDM çıktıları kullanılarak üretilen senaryolar diğerleri ile kıyaslandığında çok daha güvenilir sonuçlar vermektedir. Bu durum GDM senaryolarının araştırmacılar tarafından tercih edilmesine sebep olmuştur [20]. GDM'ler küresel anlamdaki iklim değişkenlerinin durumunun görülmesini sağlarken, sahip oldukları düşük çözünürlük nedeniyle bölgesel ölçekteki iklim değişikliğinin çevresel ve hidrolojik parametreler üzerindeki etkilerinin belirlenmesinde kullanılması hatalara neden olabilmektedir [21-23]. Bu nedenle GDM'lere ait kaba çözünürlüklü çıktıların bölgesel ölçüğe indirgenmesi gerekmektedir [24, 25]. Ölçek indirgeme yöntemleri genel olarak istatistiksel ve dinamik ölçek indirgeme yöntemleri olmak üzere iki ana başlık altında toplanmaktadır [7]. Dinamik ölçek indirgeme yönteminde bölgesel iklim modelleri kullanılarak ortalama 200 km çözünürlüğündeki GDM çıktıları 3 km çözünürlüğe kadar düşürebilmektedir. Ancak dinamik ölçek indirgeme yöntemleri kullanımı uzun zaman alan, işlem gücü yüksek bilgisayarlar ve konusunda uzman personel gerektiren yöntemlerdir. İstatistiksel ölçek indirgeme yöntemi ise GDM çıktılarından yer alan kaba çözünürlüklü atmosferik değişkenler ile gözlem verileri arasındaki istatistiksel ilişkileri kullanan ölçek indirgeme yöntemleridir [26]. İstatistiksel ölçek indirgeme yöntemleri dinamik ölçek indirgeme yöntemlerine kıyasla kullanımı daha kolay, çok fazla veri gerektirmeyen ve farklı bölgelere kolaylıkla uyarlanabilen yöntemlerdir [27]. Dinamik ve istatistiksel ölçek indirgeme yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları hakkında daha detaylı bilgilere Feng [28] ve Bermudez vd. [29] tarafından yapılan çalışmalarından ulaşılabılır. Literatürde geçmişten günümüze kadar kaba çözünürlüklü GDM çıktılarından bölgesel ölçüğe indirgemek amacıyla Türkiye [72, 73] ve dünyanın farklı bölgeleri için çoklu lineer regresyon [30], korelasyon analizi [31], istatistiksel ölçek indirgeme modeli [19], yapay sinir ağları yöntemi [2], tekrarlayan sinir ağları yöntemi [32], evrişimli sinir ağları yöntemi [33] ve ampirik istatistiksel ölçek indirgeme [34] gibi birçok istatistiksel ölçek indirgeme modelleri kurulmuş ve uygulanmıştır. Bu çalışmada istatistiksel ölçek indirgeme yöntemi olarak mühendislik problemlerinin çözümünde hızlı ve yüksek performans değerleri vermesi nedeniyle son yıllarda kullanımına sıklıkla rastlanan çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri (ÇDURE) yöntemi kullanılmıştır [35-39]. Ayrıca ÇDURE yönteminin performansını değerlendirmek için biri doğrusal diğeri doğrusal olmayan (eksponansiyel) iki fonksiyon içeren klasik regresyon analizi (KRA) uygulanarak istasyon tabanlı istatistiksel ölçek indirgeme modelleri kurulmuştur. GDM çıktılarından bölgesel ölçüğe indirgenmesinde üç farklı yaklaşım vardır. Bu yaklaşımlar bağımsız değişkenlerin (I) GDM çıktılarından, (II) yeniden analiz veri setlerinden ve (III) kaba ölçekli gözlem verilerinden seçilmesi yaklaşımlarıdır [73, 91]. Bu çalışma kapsamında ölçek indirgeme modellerinin kurulduğu çalışmalarda da sıklıkla kullanılan ERA-Interim yeniden analiz veri seti kullanılmıştır [25, 41, 42]. Yeniden analiz veri setleri geçmiş dönemlerden günümüze küresel atmosfer

analizlerini içeren ve ülkelerin ulusal arşivleri, meteoroloji gözlem istasyonları, gemi ve uçak gözlemleri, uydu verileri ve hava tahmin modelleri kullanılarak spektral istatistiksel interpolasyon yöntemi ile hazırlanan veri setleridir [40].

Bu çalışmanın amacı iklim değişikliğinin Doğu Karadeniz Havzasındaki sıcaklık ve yağış değişkenleri üzerindeki olası etkilerini incelemektir. Bu amaçla havzada ve yakın çevresinde yer alan 12 meteoroloji istasyonu için ÇDURE ve KRA yöntemleri ile ERA-Interim yeniden analiz veri setinde yer alan atmosferik değişkenler kullanılarak istatistiksel ölçek indirgeme modelleri kurulmuştur. Kurulan modeller arasından en yüksek performansa sahip olanları ile küresel ölçekli GFDL-ESM2M modelinin iyimser ve kötümser senaryoyu temsil eden temsili konsantrasyon rotaları (RCP4.5 ve RCP8.5) senaryo çıktıları istasyon ölçeğine indirgenmiş ve yanlılıkları kantil delta haritalama yöntemi ile düzeltilerek gelecek dönemler için değerlendirmeler yapılmıştır. Ayrıca gelecek dönem senaryo verilerine ait eğilimler Mann-Kendall yöntemi ile incelenmiştir. Bu çalışma ile istatistiksel ölçek indirgeme yöntemlerinin sıcaklık ve yağış değişkenlerinin bölgesel ölçeğe indirgenmesindeki performansları belirlenmiştir. Bunun yanında havza içerisinde ve çevresinde belirlenen meteoroloji istasyonları için gelecek dönem verileri noktasal olarak elde edilmiş ve bu değişkenlerin geçmiş döneme kıyasla olası değişim miktarları incelenmiştir.

2. ÇALIŞMA ALANI, KULLANILAN VERİLER VE YÖNTEMLER

2.1. Çalışma Alanı

Türkiye 25 adet büyük ölçekli hidrolojik havzaya ayrılmıştır [43]. Çalışma bölgesi olan DKH Türkiye'nin kuzeydoğusunda yer almaktadır ve doğuda Yeşilirmak, batıda Çoruh havzalarıyla, kuzeyde ise Karadeniz ile çevrelenmiştir. Havza coğrafi bakımdan 40°15'–41°34' kuzey enlemleri ile 36°43'–41°35' doğu boylamları arasında bulunmaktadır. Kuzeyde Karadeniz, doğuda Kaçkar Dağları, güneyde Yamanlı, Soğanlı, Kemer, Iğdır Dağları, batıda Çarşamba Ovası'nın doğusuna kadar uzanan bu havza Türkiye'nin alansal olarak %2,92'sini teşkil etmektedir [44]. Toplam yağış alanı 22.844 km² olan DKH'nın yıllık ortalama yağış yüksekliği 1.198 mm; yıllık ortalama akışı 566,23 m³/s ve akış katsayısı 0,62'dir [45]. DKH Türkiye'nin en fazla yağış alan havzasıdır. Hopa, Pazar ve Rize civarına düşen yağış miktarı Türkiye yıllık toplam yağış ortalamasının yaklaşık dört katına ulaşmaktadır [44]. Havzanın yıllık ortalama sıcaklık değeri ise 1970-2016 yılları arasında 249 istasyon verisi kullanılarak belirlenen Türkiye yıllık ortalama sıcaklık değerinden (13,1 °C) yaklaşık 1 °C fazladır. Havza sınırları içerisinde irili ufaklı pek çok akarsu yer almaktadır (Şekil 1) [85]. Güney-kuzey doğrultusunda uzanan bu akarsular, sularını birbirilerinden bağımsız olarak Karadeniz'e boşaltırlar. DHK'da bulunan akarsular güneyde yer alan dağların doruklarındaki kar ve havzaya her mevsim düşen yağış ile beslendiklerinden yıl boyu kurumazlar.

Havzanın sahip olduğu coğrafi özellikler nedeniyle yamaçlardan hızla inen akarsular özellikle sağanaklardan sonra bölgede taşkınlara neden olmaktadır. DKH'da 1955-2005 yılları arasında meydana gelen 51 büyük taşkın olayında 258 kişi yaşamını kaybetmiş ve 500 milyon dolarlık ekonomik kayıp yaşanmıştır. Havzada meydana gelen taşkınlardan çoğu Haziran-Ağustos aylarında meydana gelmiştir [18, 46]. Ayrıca ülkemizde, 2018 yılı içerisinde toplam 871 meteorolojik karakterli doğa kaynaklı afet rapor edilmiştir. Uzun yıllar dağılımına bakıldığında 2018 yılı içerisinde meydana gelen meteorolojik afet sayısı 1940-2018 periyodu içerisindeki en yüksek değer olmuştur. 2018 yılında meydana gelen

Çizelge 1 - Çalışmada kullanılan meteoroloji istasyonlarından ölçülen sıcaklık ve yağış değişkenlerine ait temel istatistikler

Değişken	Sıcaklık (°C)				Yağış (mm)			
	Minimum	Ortalama	Maksimum	Std. Sapma	Minimum	Ortalama	Maksimum	Std. Sapma.
Trabzon	3,8	14,7	27,0	6,1	0,0	70,5	226,1	44,7
Akçaabat	3,1	14,4	26,3	6,2	0,0	61,3	204,0	42,4
Rize	3,1	14,3	27,0	6,3	8,2	189,0	516,6	105,8
Pazar	2,1	13,4	24,7	6,0	15,3	175,1	703,2	107,1
Giresun	3,5	14,5	27,0	6,0	0,2	107,2	521,6	65,3
Şebinkarahisar	-7,2	9,2	24,6	8,1	0,0	49,1	187,0	35,7
Ordu	3,0	14,4	26,7	6,3	2,3	87,4	251,0	51,4
Ünye	3,2	14,3	26,9	6,2	1,6	97,5	298,7	59,1
Gümüşhane	-6,2	9,5	24,2	8,0	0,0	39,2	141,9	28,1
Hopa	2,0	14,4	28,3	6,1	9,3	188,1	607,5	110,2
Bayburt	-11,7	6,9	22,5	9,0	0,0	38,2	145,3	27,2
Suşehri	-7,8	10,0	24,8	8,1	0,2	36,4	162,2	27,5

Çizelge incelendiğinde en düşük aylık ortalama sıcaklık Bayburt istasyonu için $-11,7$ °C, en yüksek aylık ortalama sıcaklık ise Hopa istasyonu için $28,3$ °C olarak belirlenmiştir. En yüksek aylık toplam yağışın havza içerisindeki en büyük değeri $703,2$ mm olarak Pazar istasyonunda en düşük değeri ise $141,9$ mm ile Gümüşhane istasyonunda ölçülmüştür. En yüksek standart sapma (Std. Sapma) değeri sıcaklık değişkeni için $9,0$ °C ile Bayburt istasyonundan, yağış değişkeni için ise $110,2$ mm ile Hopa istasyonundan elde edilmiştir.

2.3. ERA-Interim Yeniden Analiz Verileri

Kaba çözünürlüklü GDM senaryo çıktılarının yerel ölçekte noktasal sıcaklık ve yağışlara dönüştürülebilmesi için bölgesel atmosferik değişkenler ile meteoroloji istasyonlarından ölçülmüş olan sıcaklık ve yağış değişkenleri arasında istatistiksel ilişkilerin kurulması önerilmektedir [26, 48, 49]. İstatistiksel ölçek indirgeme yöntemi olarak isimlendirilen bu tür ilişkilerin kurulabilmesi için meteoroloji uyduları, küresel kara gözlem ağı ölçümleri, uydulu ölçümleri ve radiosonde vb. birçok veri tabanında yer alan verilerin asimilasyonu ile oluşturulan yeniden analiz verilerinden yararlanılmaktadır [50]. Çalışma kapsamında istatistiksel ölçek indirgeme modellerinin kurulmasında ERA-Interim yeniden analiz veri seti kullanılmıştır. ERA-Interim yeniden analiz veri seti 1 Ocak 1979 tarihinden 31 Ağustos 2019 tarihine kadar olan dönem için hazırlanmış atmosferik değişkenlere ait verileri içermektedir. Bu veri seti yatayda $0,75^{\circ} \times 0,75^{\circ}$ çözünürlüğe sahip, düşeyde ise yüzeyden $0,1$ hPa basınç seviyesine kadar 60 seviyede atmosferik değişkenleri içermektedir [51, 52]. ERA-Interim yeniden analiz veri takımlarının oluşturulması ve içerdiği değişkenler ile ilgili daha detaylı bilgiler için Berrisford vd. [53] tarafından yapılan çalışma incelenebilir.

2.4. Genel Dolaşım Modelleri (GDM) ve RCP Senaryoları

1970'li yıllarda bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ve bu teknolojinin bilimsel çalışmalarda kullanılmasının yaygınlaşmasıyla birlikte iklim modelleme çalışmaları başlamıştır. İlk modelleme çalışmalarında iklim sadece gözlem verilerine bağlı kalınarak modellenmiştir. Bu modeller boyutsuz ya da bir boyutlu enerji dengesi kullanılarak oluşturulmuştur. Gelişmiş iklim modelleri ise ilk iklim modellerine kıyasla daha gerçekçi, hesaplama maliyeti yüksek ve çok daha fazla bağımsız değişken ve ilişkiyi içerecek şekilde oluşturulmuştur. Son yıllardaki bilgisayar teknolojisinin gelişmesiyle birlikte en gelişmiş ve karmaşık iklim modelleri olan GDM'ler geliştirilmiştir [54, 55]. GDM'ler bilgisayar gücüne bağlı olarak ortalama 200 km'lik sayısal ağ aralıklarına sahip olarak üretilmiştir. Küresel iklim ve hava olayları bu büyüklükteki sayısal ağ aralıklarına sahip verilere bağlı olarak belirlenebilir de bu veriler bölgesel ölçekli model sonuçlarıyla karşılaştırıldıklarında orografik, topografik, yüzey ve arazi örtüsü özelliklerinin zenginliği ve çeşitliliği gibi konularda ciddi bazı sınırlamaları olduklarından gerçekçi sonuçlar verememektedir. Bu çalışmada Türkiye için daha önce Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından dinamik ölçek indirgeme yöntemi kullanılarak yapılan projede [56] de kullanılan, CMIP5 arşivinden seçilmiş GFDL-ESM2M (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory) modeline ait çıktılar kullanılmıştır. Geçmişte kullanılan iklim modellerinde öncelikle sosyo-ekonomik senaryolar belirlenmiş ve bu senaryolar sonucunda oluşacak ekonomik gelişmelere bağlı olarak emisyon salınımlarına göre senaryolar oluşturulmuştur. Daha sonra bu emisyonların neden olacağı ışınımsal zorlamalar hesaplanmış ve iklim modellerine girdi olarak verilmiştir. Ancak daha sonra IPCC'de bu senaryolar ile ilgili yeni kararlar alınmış ve senaryolar yeniden belirlenmiştir. Yeni oluşturulan senaryolar temsili konsantrasyon rotaları (RCP) olarak adlandırılmış ve geçmiş çalışmalar incelenerek ışınımsal zorlama seviyeleri ve rotaları için dört adet RCP tipi tanımlanmıştır. Bunlar ışınımsal zorlama değerleri en küçükten en büyüğe sırası ile RCP3-PD (RCP2.6), RCP4.5, RCP6.0 ve RCP8.5 senaryolarıdır. Senaryolar içerisinde RCP2.6 senaryosu mevcut durumda gerçekleşmesi mümkün olmayan, hali hazırda sınır değerleri aşılmış olan bir senaryo olduğu için dikkate alınmamıştır. Kalan senaryolar arasında ise en iyimser senaryoyu RCP4.5, aşırı durumu ise RCP8.5 temsil etmektedir [2, 54, 57]. Bu doğrultuda çalışmada GFDL-ESM2M modeline ait iyimser senaryoyu temsil eden RCP4.5 ve kötümser senaryoyu temsil eden RCP8.5 senaryo verileri kullanılmıştır.

2.5. Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (ÇDURE) Yöntemi

Pek çok bilim dalında ortak olan problem birçok bağımsız değişkenin bir fonksiyon yardımıyla bir bağımlı değişkeni doğru bir şekilde modellenmesidir. ÇDURE Friedman [58] tarafından geliştirilen, çok boyutlu verilerin modellenmesinde kullanılabilen bir regresyon analizi yöntemidir [59]. Bu yöntemin en önemli avantajı aralarında doğrusal ilişki bulunmayan bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki ilişkiyi basit eşitlikler ile açıklayabilmesidir [60]. Bu yöntemde bağımlı ve bağımsız değişkenler arasında herhangi bir ilişki varsayımı yapılmamaktadır. ÇDURE yöntemi ürettiği temel fonksiyonlar yardımıyla değişkenler arasındaki ilişkiyi ortaya koyulmaktadır. Böylece bağımsız değişkenlerin farklı aralıklarına karşılık gelen temel fonksiyonlar yardımıyla esnek bir regresyon modeli kurulmaktadır [61, 62]. ÇDURE yönteminde analiz sonucunda elde edilen temel eşitlik aşağıdaki gibidir;

$$Y = \beta_0 + \sum_{k=1}^K a_k \beta_k(X_t) + \varepsilon_i \quad (1)$$

Bu eşitlikte k düğüm sayısını, K : temel fonksiyon sayısını, X : bağımsız değişkeni, a_k : k . temel fonksiyonun kat sayısı, β_0 : modeldeki sabit terim, $\beta_k(X_t)$: t . bağımsız değişken için k . temel fonksiyonu ifade etmektedir. Eşitlikte geçen temel fonksiyon ifadesi ise aşağıda verilen eşitlik ile tanımlanır;

$$B_m(x) = \prod_{t=1}^{L_m} [S_{1,m}(x_{v(1,m)} - k_{1,m})] \quad (2)$$

Burada; L_m : etkileşim derecesini, $S_{1,m}$: $\varepsilon[\pm 1]$, $x_{v(1,m)}$: bağımsız değişken değerini ve $k_{1,m}$: düğüm değerini göstermektedir. Regresyon yöntemlerinde genellikle regresyon eşitlikleri girdi ve çıktı değişkenleri arasındaki ilişkiyi tek bir fonksiyon kullanarak açıklamaya çalışırlar. Ancak ÇDURE yönteminde parçalı polinomik bir fonksiyon kullanılmaktadır. Bu sayede veri setinde yer alan tüm değerler görülebilir. ÇDURE yöntemi ile oluşturulan eşitlik parçalı temel fonksiyonların düğüm noktalarında birleştirilmesi ile oluşturulur. Temel fonksiyonlardaki sabitler en küçük kareler yöntemi ile belirlenir. Genel denklemde kullanılan bu temel fonksiyonlar analizi yapılacak olan veri setinin dağılımına daha uygun olduğu için tek fonksiyona kıyasla daha fazla esneklik sağlamaktadır. ÇDURE bu özelliği sayesinde her veri tipine yüksek derecede uyum sağlayabilir ve düğüm noktalarını ve derecelerini otomatik olarak seçen bir algoritma oluşturur [61]. ÇDURE yönteminde istenilen model çıktıları elde edilene kadar birbirini takip eden iki aşamalı bir süreç vardır. Bu süreçlerin ilkinde modele tanımlanan en fazla temel fonksiyon sayısına göre eşitlikler oluşturularak modelin karmaşıklığı maksimum seviyeye çıkarılır. İkinci süreçte ise oluşturulan bu karmaşık model modele etkisi en düşük olan parametreler ve karşılıklı ilişkileri budanarak hata kareler toplamı en uygun olan model elde edilir [62, 63]. ÇDURE yöntemi hakkında daha detaylı bilgilere ulaşmak için Kisi ve Parmar [60], Özfalcı [61], Nacar vd. [62] ve Ünal [63] tarafından yapılan çalışmalar incelenebilir.

2.6. Yanlılık Düzeltme Yöntemi

Kaba çözünürlüklü GDM'lerin bölgesel ölçeğe indirgenmesinde istatistiksel ölçek indirgeme yöntemleri yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bölgesel hidro-meteorolojik değişkenlerin ileriye yönelik verilerinin üretilmesinde kullanılan bu iklim modelleri bünyesinde barındırdıkları yanlılıklar nedeniyle istatistiksel ölçek indirgeme modellerinin tahmin performanslarını etkilemektedir. Ölçeği düşürülen verilerin gerçeği daha iyi yansıtabilmesi için bu yanlılığın giderilmesi gerekmektedir [64]. Ölçeği indirgenen verilerdeki yanlılıklar, yanlılık düzeltme yöntemleri ile giderilebilmektedir. Yanlılık düzeltme yöntemlerinin sistematik hataların giderilmesinde kullanışlı olmaları, onların iklim değişikliği etki çalışmalarında sıklıkla kullanılmalarını sağlamıştır. Yanlılık düzeltme yöntemleri incelenen değişkene ait verilerin çeşitli dağılım momentlerine uygulanmasıyla birlikte [65, 66], değişkenin uyum gösterdiği dağılım yapısı da esas alınarak yapılmaktadır [67, 68]. Kırdemir ve Okkan [64] yanlılık düzeltme yöntemleri üzerine yapmış oldukları çalışmada dağılım tabanlı yanlılık düzeltme yöntemlerinin diğer yöntemlere kıyasla daha

doğru sonuçlar ürettiğini ifade etmişlerdir. Dağılım tabanlı yanlılık düzeltme yöntemleri genel olarak GCM dağılımlarının gözlenmiş dağılımların üzerine haritalanması esasına dayanmaktadır. Bu bilgiler ışığında bu çalışma kapsamında kantil delta haritalama (KDH) yanlılık düzeltme yöntemi kullanılmıştır. KDH yöntemi Cannon vd. [69] tarafından önerilmiş bir yöntemdir. Bu yöntemde rölatif değişimler dikkate alınarak modellenmiş verilerdeki yanlılıkların düzeltilmesi yoluna gidilmiştir. Yanlılık düzeltme yöntemleri ile ilgili daha detaylı bilgilere Kırdemir ve Okkan [64] çalışmasından ulaşılabilir. KDH ile düzeltilmiş değerler aşağıdaki eşitlik yardımıyla elde edilmektedir.

$$y_{cor}(t) = F^{-1}(F(y_{mod}(t), \theta_{mod}), \theta_{obs}) \left(\frac{y_{mod}(t)}{F^{-1}(F(y_{mod}(t), \theta_{mod}), \theta_{REF})} \right) \quad (3)$$

Burada, $y_{cor}(t)$ t zamanındaki düzeltilmiş değişken değerini, $y_{mod}(t)$ t anındaki kombine edilmiş iklim modelinden elde edilen referans dönem senaryosu veya 8.5 senaryosuna ait değişken değerini, θ_{REF} , θ_{obs} ve θ_{mod} ifadeleri ise sırasıyla benzeştirilmiş referans dönem senaryo verilerinden ve gözlenmiş verilerden elde edilmiş dağılım parametrelerini, modellenmiş geçmiş veya gelecek döneme ait verinin dağılım parametrelerini, $F(\cdot)$ ve $F^{-1}(\cdot)$ ise sırasıyla referans dönem senaryo verileri dağılımına ait kümülatif olasılık fonksiyonunu ve gözlenmiş verilere ait ters kümülatif olasılık fonksiyonunu temsil etmektedirler [64]. Çalışma kapsamında yağışlar için Gamma-2, ortalama sıcaklıklar için Normal dağılım uygunluğu altında KDH yöntemi her bir ay için ayrı ayrı çalıştırılmıştır.

2.7. Mann-Kendall Eğilim Analizi

Mann ve Kendall [79,80] tarafından sunulan yöntemin test istatistiği şu şekilde hesaplanır;

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n sgn(x_j - x_i) \quad (4)$$

Eşitlikte yer alan n veri uzunluğunu, x_i ve x_j i ve j anındaki veri değerini ifade etmektedir.

$$sgn(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & ; x_j > x_i \\ 0 & ; x_j = x_i \\ -1 & ; x_j < x_i \end{cases} \quad (5)$$

Eğer $n > 10$ ise S'nin varyansı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Var(S) = [n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^p t_i(t_i-1)(2t_i+5)]/18 \quad (6)$$

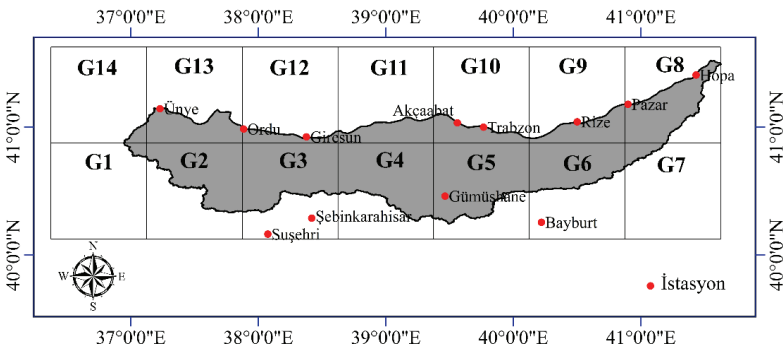
Bu eşitlikte yer alan p bağlı grupların sayısını temsil etmektedir. Bu zaman serilerinde eşit veri olduğu anlamına gelmekte t_i ise bir verinin kaç kez tekrarlandığını göstermektedir. Son olarak Z değeri aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır.

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & , \quad S > 0 \\ 0 & , \quad 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & , \quad S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Burada hesaplanan Z değerleri farklı anlamlılık düzeyleri için (%90, %95, %99) standart değerlerle karşılaştırılır. Eğer hesaplanan Z değeri standart z değerinden büyük ise (H_0) hipotezi reddedilir. Yani istatistiksel olarak anlamlı bir eğilim olduğu anlamına gelir. Aksi takdirde (H_0) hipotezi kabul edilir ve bu da anlamlı bir eğilimin olmadığı anlamına gelir. Eğer anlamlı bir eğilim varsa bu durumda S değeri pozitif ise artan negatif ise azalan bir eğilim söz konusu demektir [79, 80-82, 90].

3. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Çalışma kapsamında öncelikle istatistiksel ölçek indirgeme modellerinin kurulmasında kullanılacak olan atmosferik değişkenleri içeren ERA-Interim yeniden analiz veri takımının DKH'yı temsil eden sayısal ağ merkezleri belirlenmiştir (Şekil 3). Ölçek indirgeme modellerinde kullanılacak olan değişkenlerin seçimi ölçeği indirgenecek olan değişkene ve araştırılan bölgeye göre değişiklik göstermekle birlikte araştırmacıların üzerinde durduğu önemle bir konudur [72, 77, 78]. Yeniden analiz veri setlerinde çok fazla değişken olmakla birlikte bu değişkenlerden modellerde çok fazla sayıda kullanılmasının her zaman model performansını arttırmadığı ifade edilmektedir [26]. Bu çalışmada kullanılan değişkenler (Çizelge 2) daha önce Türkiye'nin farklı havzaları için yapılmış olan iklim değişikliği etki çalışmalarında da sıklıkla kullanılan değişkenlerden seçilmiştir [14, 16, 25, 57]. Ayrıca çalışılan havza Köppen iklim sınıflandırmasına göre okyanusal iklim ve dönencealtı iklimi sınıfında yer almaktadır. Bu tarz denizel iklimlerde yağış değişkeni geo-potansiyel yüksekliklerden ve deniz seviyesi basınçlarından etkilenebilmektedir [83, 84]. Bu bakımdan da bağımsız değişkenlerinin farklı basınç seviyelerindeki olası varyasyonlarının temel



Şekil 3 - DKH'yı temsil eden ERA-Interim yeniden analiz veri seti sayısal ağ merkezleri

bağımlı değişkenler üzerindeki etkisini vurgulamak adına 200, 500 ve 850 hPa seviyelerindeki değerlerde çalışmaya dâhil edilmiştir. Bunların yanı sıra çalışma kapsamında kullanılacak olan bağımsız değişkenlerin belirlenmesinde seçilen değişkenlerin GFDL-ESM2M modelinde ve ERA-Interim yeniden analiz veri setinde ortak bulunuyor olmasına da dikkat edilmiştir. Aksi halde ERA-Interim veri seti kullanılarak kurulacak olan modellere GDM verilerinin girdi olarak verilmesi söz konusu olamayacaktır.

Çizelge 2 - ERA-Interim yeniden analiz veri setinde ve GFDL-ESM2M modelinde ortak bulunan atmosferik değişkenler

Basınç Seviyesi	200 hPa		500 hPa			850 hPa			Yüzey			
Atmosferik Değişkenler	<i>air</i>	<i>hgt</i>	<i>air</i>	<i>hgt</i>	<i>rhum</i>	<i>air</i>	<i>hgt</i>	<i>rhum</i>	<i>air</i>	<i>press</i>	<i>slp</i>	<i>prate</i>
	(°C)	(m)	(°C)	(m)	(%)	(°C)	(m)	(%)	(°C)	(mb)	(mb)	(kg/m ²)

Çizelge 2’de listelenen atmosferik değişkenler satırında yer alan *air*: hava sıcaklığını, *hgt*: jeopotansiyel yüksekliği, *rhum*: rölatif nemi, *press*: yüzey basıncını, *slp*: deniz seviyesi basıncını, *prate*: yağışı temsil etmektedir. DKH’yı temsil eden 14 sayısal ağ merkezi için (Şekil 3) düzenlenmiş olan atmosferik değişkenlere ait veriler havzanın kuzey ve güney bölgesi için iki gruba ayrılmıştır. Kuzey bölümünde yer alan yedi sayısal ağ (G8-14) merkezindeki 12 atmosferik değişkenin ortalamaları alınarak kuzeyde bulunan sekiz istasyon, güneyinde yer alanların (G1-G7) ortalamaları alınarak da karasal iklimi temsil eden diğer dört istasyon için istatistiksel ölçek indirgeme modelleri kurulmuştur. İstatistiksel ölçek indirgeme modellerinin kurulması için veriler eğitim ve test kısımlarına ayrılmıştır. Verilerin %80’i (1981-2004) modellerin eğitiminde geriye kalan %20’lik kısmı ise (2005-2010) modellerin test aşamasında kullanılmıştır. Her bir istasyon için sıcaklık ve yağış değişkenlerini elde etmek amacıyla her bir yöntemde iki tane olmak üzere toplamda altı tane istatistiksel ölçek indirgeme modeli kurulmuştur. Wilby vd. [70] çalışmalarında verilere standardizasyon işleminin uygulanmasının model çıktılarındaki yanlılığı azalttığını ifade etmişlerdir. Bu nedenle veriler ölçek indirgeme modelinde kullanılmadan önce standardize edilmiştir. Standardizasyon işlemi sonucunda ortalaması 0, standart sapması 1 olan veri setleri elde edilmiştir. Modelleme işlemi tamamlandıktan sonra ters standardizasyon işlemi uygulanarak verilerin eski boyutuna dönmesi sağlanmıştır. Ayrıca GDM gelecek dönem RCP senaryo çıktıları da referans dönem senaryo verileri kullanılarak standardize edilmiştir. GDM verileri ölçek indirgeme modellerinin yeni girdileri olarak verilmeden önce ERA-Interim veri setinde olduğu gibi havzanın kuzey ve güneyi için düzenleme yapılmıştır. GDM’nin DKH’yi temsil eden altı sayısal ağ merkezi için düzenlenmiş olan atmosferik değişkenlere ait veriler havzanın kuzey ve güney bölgesi için iki gruba ayrılmıştır. Kuzey bölümünde yer alan üç sayısal ağ merkezindeki 12 atmosferik değişkenin ortalamaları kuzeyde bulunan sekiz istasyon, güneyinde yer alan üç sayısal ağ merkezindeki değişkenlerin ortalamaları karasal iklimi temsil eden diğer dört istasyon için istatistiksel ölçek indirgeme modellerine girdi olarak verilmiştir. Böylece ERA-Interim atmosferik değişkenleri kullanılarak kurulan ölçek indirgeme modellerine GDM atmosferik değişkenleri girdi olarak verilerek DKH için referans dönem ve gelecek dönem RCP senaryo çıktıları elde edilmiştir [25]. Verilerin eğitim ve test veri takımlarına ayrılmasından ve standardizasyon süreçlerinden sonra ilk olarak ÇDURE tabanlı istatistiksel ölçek indirgeme yöntemi kullanılarak istasyon özelinde gözlem değerlerine en yakın tahmin sonuçlarına sahip modeller belirlenmiştir. Daha sonra iki farklı

regresyon fonksiyonu kullanılarak (Eşitlik 8 ve 9) KRA yöntemi uygulanmıştır. KRA yönteminin uygulandığı bu eşitliklerden biri lineer fonksiyon (KRA_LF) diğeri ise ekspanansiyel fonksiyondur (KRA_EF). KRA yöntemi bu eşitliklerde yer alan değişkenlere (x_i) ait gözlem değerine en yakın tahmin sonuçlarını verecek en uygun katsayıların (w_i) belirlenmesini sağlamıştır.

$$y_{lineer} = w_0 + w_1x_1 + w_2x_2 + w_3x_3 + \dots + w_nx_n \quad (8)$$

$$y_{ekspanansiyel} = w_0 + \exp(w_1 + w_2x_1 + w_3x_2 + w_4x_3 + w_5x_4 + \dots + w_{n+1}x_n) \quad (9)$$

Sıcaklık ve yağış değişkenleri için kurulmuş olan ÇDURE ve KRA tabanlı istatistiksel ölçek indirgeme modellerinin performanslarının değerlendirilebilmesi ve karşılaştırılabilmesi için ortalama karesel hatanın karekökü (OKHK), saçılım indeksi (SI), ortalama mutlak hata (OMH), ve Nash-Sutcliffe (NS) performans istatistikleri kullanılmıştır. OKHK, SI, OMH ve NS istatistikleri aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$OKHK = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_{g,t} - Q_{m,t})^2} \quad (10)$$

$$SI = \frac{OKHK}{Q_{g,t}} \quad (11)$$

$$OMH = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |Q_{g,t} - Q_{m,t}| \quad (12)$$

$$NS = 1 - \frac{\left[\sum_{t=1}^n (Q_{g,t} - Q_{m,t})^2 \right]}{\left[\sum_{t=1}^n (Q_{g,t} - \bar{Q}_{g,t})^2 \right]} \quad (13)$$

Eşitliklerde yer alan $Q_{g,t}$ gözlem değerini, $Q_{m,t}$ model çıktısını, $\bar{Q}_{g,t}$ gözlem değerlerinin ortalamasını ve n veri sayısını temsil etmektedir. Moriasi vd. [71] yapmış oldukları çalışmada NS istatistiği için model performansının yeterlilik düzeyini belirleyen bir çizelge vermişlerdir (Çizelge 3). Modelleme çalışmalarına ait performans istatistiklerinin karşılaştırılmasında bu çizelge kullanılarak değerlendirmeler yapılmıştır.

Çizelge 3 - Nash-Sutcliffe etkinlik katsayısı için belirlenen performans aralıkları

Performans	Çok iyi	İyi	Yeterli	Yetersiz
NS	0,75<NS<1	0,65<NS<0,75	0,50<NS<0,65	NS<0,50

4. BULGULAR VE İRDELEME

İstasyon özelinde sıcaklık ve yağış değişkenleri için ERA-Interim yeniden analiz veri takımında yer alan atmosferik değişkenler kullanılarak kurulmuş olan ÇDURE ve KRA tabanlı ölçek indirgeme modellerinin eğitim ve test veri takımlarına ait performans istatistikleri sırasıyla Çizelge 4 ve Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 4 - Sıcaklık değişkeni ölçek indirgeme modellerine ait performans istatistikleri

Değişken/Veri takımı		Sıcaklık/Eğitim											
Yöntem	ÇDURE				KRA_EF				KRA_LF				
İstasyon/Performans	OKHK	SI	OMH	NS	OKHK	SI	OMH	NS	OKHK	SI	OMH	NS	
Akçaabat	0,440	0,031	0,345	0,995	0,462	0,033	0,365	0,994	0,457	0,032	0,361	0,994	
Bayburt	0,723	0,108	0,538	0,994	0,803	0,120	0,604	0,992	0,786	0,118	0,588	0,992	
Giresun	0,474	0,033	0,367	0,994	0,468	0,033	0,374	0,994	0,465	0,032	0,372	0,994	
Gümüşhane	0,503	0,054	0,407	0,996	0,520	0,055	0,420	0,996	0,505	0,054	0,408	0,996	
Hopa	0,768	0,054	0,565	0,983	0,793	0,056	0,592	0,982	0,795	0,056	0,594	0,982	
Ordu	0,384	0,027	0,307	0,996	0,441	0,031	0,351	0,995	0,440	0,031	0,354	0,995	
Pazar	0,446	0,034	0,346	0,994	0,450	0,034	0,349	0,994	0,450	0,034	0,352	0,994	
Rize	0,389	0,028	0,308	0,996	0,406	0,029	0,317	0,996	0,402	0,028	0,317	0,996	
Suşehri	0,518	0,053	0,391	0,996	0,578	0,059	0,432	0,995	0,560	0,057	0,416	0,995	
Şebinkarahisar	0,555	0,062	0,433	0,995	0,569	0,063	0,445	0,995	0,556	0,062	0,433	0,995	
Trabzon	0,426	0,029	0,334	0,995	0,479	0,033	0,377	0,994	0,478	0,033	0,378	0,994	
Ünye	0,427	0,030	0,335	0,995	0,484	0,034	0,392	0,994	0,484	0,034	0,391	0,994	
Değişken/Veri takımı		Sıcaklık/Test											
Yöntem	ÇDURE				KRA_EF				KRA_LF				
İstasyon/Performans	OKHK	SI	OMH	NS	OKHK	SI	OMH	NS	OKHK	SI	OMH	NS	
Akçaabat	0,571	0,037	0,470	0,992	0,679	0,045	0,561	0,988	0,668	0,044	0,546	0,989	
Bayburt	0,760	0,099	0,600	0,993	0,844	0,110	0,685	0,992	0,825	0,108	0,678	0,992	
Giresun	0,877	0,058	0,628	0,979	0,917	0,061	0,628	0,977	0,912	0,060	0,616	0,978	
Gümüşhane	0,591	0,058	0,461	0,995	0,584	0,057	0,465	0,995	0,579	0,057	0,460	0,995	
Hopa	1,210	0,080	0,894	0,967	1,193	0,079	0,886	0,967	1,197	0,079	0,886	0,967	
Ordu	0,533	0,035	0,443	0,993	0,544	0,036	0,458	0,993	0,532	0,035	0,447	0,993	
Pazar	0,498	0,035	0,400	0,993	0,531	0,038	0,443	0,993	0,525	0,037	0,433	0,993	
Rize	0,452	0,030	0,371	0,995	0,480	0,032	0,387	0,995	0,466	0,031	0,386	0,995	
Suşehri	0,602	0,056	0,476	0,995	0,652	0,060	0,514	0,994	0,633	0,059	0,498	0,994	
Şebinkarahisar	0,591	0,058	0,456	0,995	0,577	0,057	0,431	0,995	0,562	0,055	0,423	0,995	
Trabzon	0,436	0,028	0,350	0,995	0,461	0,030	0,372	0,995	0,449	0,029	0,362	0,995	
Ünye	0,630	0,042	0,495	0,990	0,650	0,043	0,530	0,990	0,646	0,043	0,523	0,990	

Çizelge 4'te verilen performans istatistikleri incelendiğinde sıcaklık değişkeni için kurulan modellerde NS değeri eğitim ve test veri takımı için tüm istasyonlarda ve her üç yöntem için de 0,967 üzerinde olduğu görülmektedir. Ayrıca eğitim ve test veri takımları için hesaplanan performans istatistiklerine göre yöntemler arasında çok önemli farklar bulunmamakla birlikte en yüksek performansa sahip yöntemin ÇDURE olduğu görülmektedir. Hesaplanan NS değerleri Moriasi vd. [71] çalışmalarında vermiş olduğu (Çizelge 3) aralıklara göre değerlendirildiğinde tüm yöntemlerle kurulan tüm modellerin her iki veri takımında da çok iyi sınıfında yer aldığı görülmektedir. Eğitim veri takımı için en düşük ve en yüksek OKHK değerleri ÇDURE yöntemi için sırasıyla 0,384 ve 0,768 olarak Ordu ve Hopa istasyonlarına ait modellerden, SI değerleri ise sırasıyla 0,027 ile 0,108 olarak Ordu ve Bayburt istasyonlarına ait modellerden elde edilmiştir. Test veri takımı için ise en düşük ve en yüksek RMSE değerleri sırasıyla 0,436 ve 1,210 olarak Trabzon ve Hopa istasyonları için, SI

değerleri ise sırasıyla 0,028 ile 0,099 olarak Trabzon ve Bayburt istasyonları için kurulan modellerden elde edilmiştir.

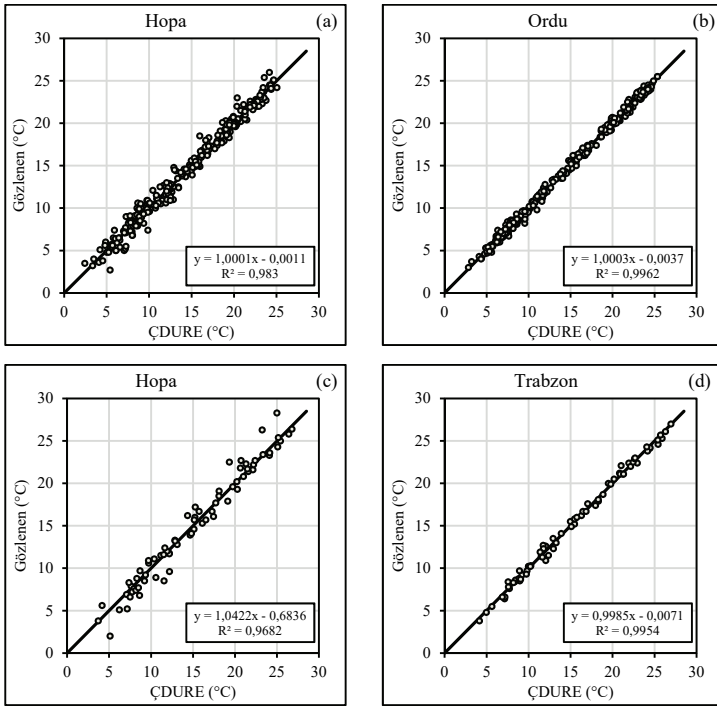
Çizelge 5 - Yağış değişkeni ölçek indirgeme modellerine ait performans istatistikleri

Değişken/Veri takımı		Yağış/Eğitim											
Yöntem	ÇDURE				KRA_EF				KRA_LF				
İstasyon/Performans	OKHK	SI	OMH	NS	OKHK	SI	OMH	NS	OKHK	SI	OMH	NS	
Akçaabat	28,186	0,457	21,845	0,568	27,879	0,452	21,814	0,578	28,748	0,466	22,831	0,551	
Bayburt	16,633	0,446	12,929	0,619	18,286	0,490	13,927	0,539	18,773	0,504	14,448	0,514	
Giresun	37,542	0,353	28,100	0,609	38,239	0,360	27,933	0,595	38,283	0,360	28,149	0,594	
Gümüşhane	15,641	0,411	12,227	0,671	17,993	0,473	13,663	0,564	18,239	0,479	14,085	0,552	
Hopa	64,816	0,346	48,092	0,639	67,464	0,360	50,225	0,609	67,784	0,362	50,576	0,605	
Ordu	31,777	0,367	24,026	0,609	31,090	0,359	23,665	0,626	31,112	0,359	23,709	0,626	
Pazar	64,879	0,376	47,180	0,628	63,614	0,369	46,294	0,642	64,354	0,373	47,428	0,634	
Rize	61,446	0,330	47,728	0,656	63,685	0,342	48,405	0,631	63,869	0,343	48,555	0,629	
Suşehri	16,706	0,461	12,232	0,641	17,997	0,497	13,560	0,583	18,498	0,511	14,069	0,560	
Şebinkarahisar	20,041	0,407	15,042	0,698	21,366	0,434	16,271	0,657	21,788	0,443	16,794	0,643	
Trabzon	30,784	0,434	22,954	0,513	29,964	0,423	22,830	0,539	30,037	0,424	22,948	0,536	
Ünye	37,314	0,391	27,224	0,588	37,588	0,394	27,698	0,582	37,594	0,394	27,717	0,582	

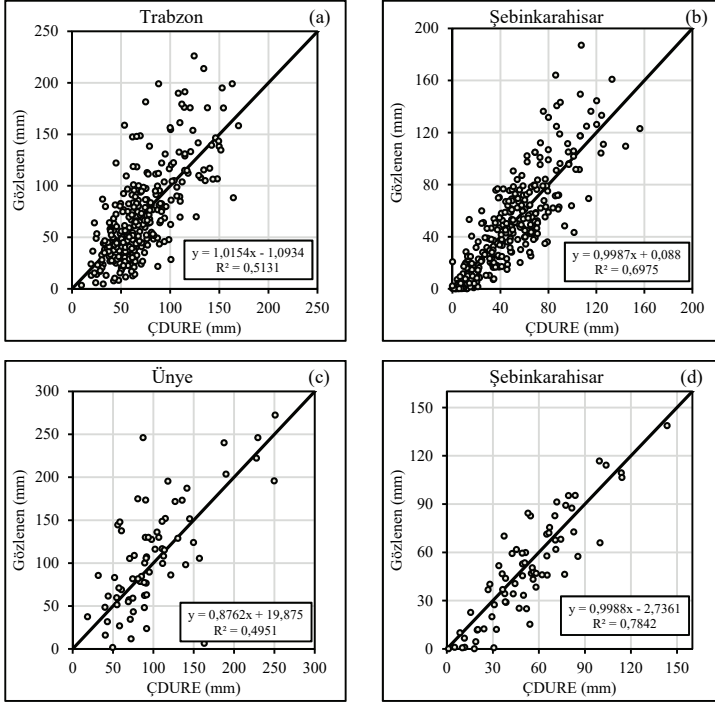
Değişken/Veri takımı		Yağış/Test											
Yöntem	ÇDURE				KRA_EF				KRA_LF				
İstasyon/Performans	OKHK	SI	OMH	NS	OKHK	SI	OMH	NS	OKHK	SI	OMH	NS	
Akçaabat	24,966	0,419	19,952	0,621	22,992	0,386	18,371	0,678	24,743	0,415	20,511	0,627	
Bayburt	19,260	0,458	14,539	0,529	21,088	0,501	15,841	0,435	22,248	0,529	16,847	0,371	
Giresun	58,500	0,528	35,174	0,501	59,261	0,535	35,928	0,488	59,428	0,536	36,413	0,485	
Gümüşhane	18,474	0,423	14,443	0,642	20,127	0,461	16,007	0,575	20,565	0,471	16,273	0,556	
Hopa	67,295	0,352	51,411	0,680	69,850	0,365	54,302	0,655	72,031	0,376	55,644	0,634	
Ordu	32,019	0,355	25,338	0,641	31,908	0,354	24,764	0,643	32,301	0,358	25,088	0,634	
Pazar	58,227	0,314	48,100	0,717	58,456	0,315	47,339	0,714	57,991	0,312	47,508	0,719	
Rize	62,511	0,313	50,159	0,671	61,088	0,306	48,203	0,686	61,498	0,308	48,879	0,681	
Suşehri	16,198	0,434	12,998	0,609	19,069	0,511	14,919	0,458	19,215	0,515	15,176	0,450	
Şebinkarahisar	15,172	0,311	12,398	0,777	20,229	0,415	16,120	0,603	20,880	0,429	16,799	0,577	
Trabzon	26,438	0,382	20,488	0,682	27,127	0,392	22,594	0,665	27,608	0,399	22,908	0,653	
Ünye	45,177	0,427	32,419	0,470	47,813	0,452	35,241	0,406	47,779	0,451	35,180	0,407	

Çizelge 5'te verilen ve yağış değişkeni için kurulan modellerde hesaplanan performans değerleri incelendiğinde eğitim veri takımına ait ÇDURE yöntemi NS değerlerinin 8 istasyonda KRA_EF ve KRA_LF yöntemlerinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca geri kalan 4 istasyonda en yüksek NS değerleri de KRA_EF yöntemine ait modellerden elde edilmiştir. Yöntemler arasında bir karşılaştırma yapılacak olduğunda ÇDURE tabanlı modellerin KRA tabanlı modellere kıyasla daha yüksek performans değerleri verdiği sonucuna ulaşılmaktadır. ÇDURE modellerine ait NS değerinin eğitim veri takımı için 0,513 ile 0,698 arasında, test veri takımı için ise 0,470 ile 0,777 arasında olduğu görülmektedir.

Eğitim veri takımı, ÇDURE yöntemi için hesaplanan NS değerleri değerlendirildiğinde Gümüşhane, Rize ve Şebinkarahisar istasyonları için kurulan modeller iyi sınıfta yer alırken diğer istasyonlar için kurulan modeller yeterli sınıfta yer almıştır. Benzer bir değerlendirme test veri takımı için yapıldığında Hopa, Pazar, Rize, Şebinkarahisar ve Trabzon istasyonları için kurulan modellerin iyi sınıfta, Akçaabat, Bayburt, Giresun, Gümüşhane, Ordu ve Suşehri istasyonları için kurulan modellerin ise yeterli sınıfta olduğu görülmüştür. Bunun yanında Ünye istasyonu için kurulan modelin yetersiz sınıfta yer aldığı ortaya çıkmıştır. Eğitim veri takımı için en düşük ve en yüksek NS değerleri sırasıyla Trabzon ve Şebinkarahisar istasyonları için, test veri takımı için ise sırasıyla Ünye ve Şebinkarahisar istasyonları için kurulan modellerden elde edilmiştir. Eğitim veri takımı için en düşük ve en yüksek OKHK değerleri sırasıyla 15,641 ve 64,879 olarak Gümüşhane ve Pazar istasyonlarına, SI değerleri ise sırasıyla 0,330 ile 0,461 olarak Rize ve Suşehri istasyonlarına ait modellerden elde edilmiştir. Test veri takımı için ise en düşük ve en yüksek OKHK değerleri sırasıyla 15,172 ve 67,295 olarak Şebinkarahisar ve Hopa istasyonları için, SI değerleri ise sırasıyla 0,311 ile 0,528 olarak Şebinkarahisar ve Giresun istasyonları için kurulan modellerden elde edilmiştir. En düşük ve en yüksek OMH değerleri eğitim veri takımı için sırasıyla 12,227 ve 48,092 değerleri ile Gümüşhane ve Hopa istasyonlarına, test veri takımı için ise sırasıyla 12,398 ve 51,411 değerleri ile Şebinkarahisar ve Hopa istasyonlarına ait modellerden elde edilmiştir. Sıcaklık ve yağış değişkeni için eğitim ve test veri takımlarında en düşük ve en yüksek NS değerlerini veren ÇDURE tabanlı modellere ait saçılım grafikleri sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 4 - Sıcaklık değişkeni ÇDURE yöntemi için en düşük ve en yüksek NS değerlerine sahip istasyonların eğitim (a, b) ve test (c, d) veri takımlarına ait saçılım grafikleri.



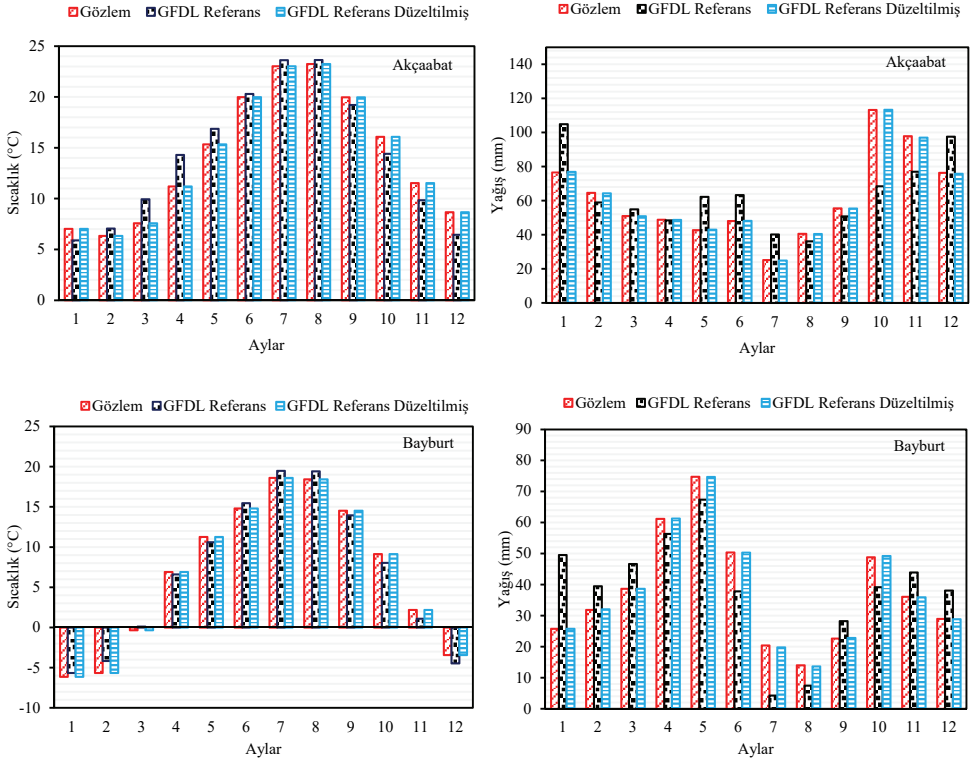
Şekil 5 - Yağış değişkeni ÇDURE yöntemi için en düşük ve en yüksek NS değerlerine sahip istasyonların eğitim (a, b) ve test (c, d) veri takımlarına ait saçılım grafikleri

Sıcaklık değişkeni için kurulan modellerin iki veri takımı için tüm istasyonlarda, yağış değişkeninde ise eğitim veri takımı için istasyonların tamamında test veri takımı için ise 11 istasyonda yeterli sonuçlar elde edilmiştir. Sonuç olarak ÇDURE yöntemi kullanılarak geliştirilen modellerin diğer iki yöntem kullanılarak geliştirilen modellerden daha iyi ve GDM senaryo çıktılarında kullanılması için yeterli doğrulukta olduğu ortaya çıkmıştır.

Her bir istasyona ait sıcaklık ve yağış değişkenleri için en iyi modeller belirlendikten sonra, senaryo verilerini elde etmek için bu modellere GDM referans dönem ve gelecek dönem RCP senaryo verilerinde yer alan atmosferik değişkenler girdi olarak verilmiştir. Modellerden elde edilen çıktılara KDH yanlılık düzeltme işlemi uygulanmış ve düzeltilmiş referans dönem ve gelecek dönem RCP4.5 ve RCP8.5 senaryo verileri üretilmiştir. İstasyon sayısının fazla olması nedeniyle çalışma kapsamında örnek olması bakımından sadece kuzeyde yer alan Akçaabat ve güneyde yer alan Bayburt istasyonları için 1981-2005 referans dönemi gözlem, GFDL yanlılığı düzeltilmiş ve GFDL yanlılığı düzeltilmemiş çıktılarının karşılaştırılması sıcaklık ve yağış değişkenleri için Şekil 6'da verilmiştir.

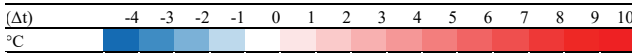
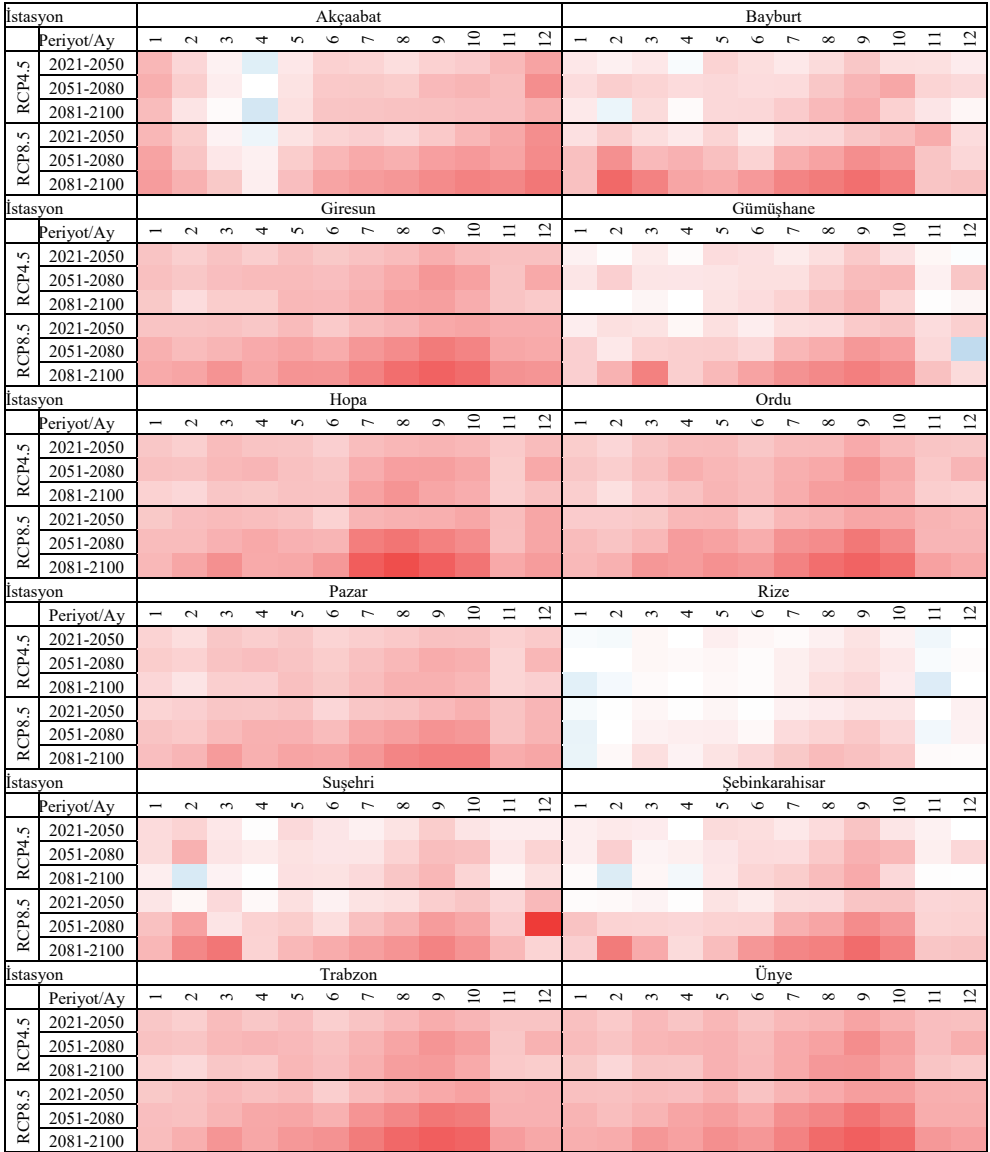
Şekil 6 incelendiğinde yanlılık düzeltme süreçlerinden sonra GDM referans dönem içi yanlılık giderilmiş ve hem sıcaklık, hem de yağış değişkeni için gözlem verileri ile GDM verileri aylık ortalamaları tüm aylar için birbirine yaklaşmıştır. Benzer yanlılık düzeltme süreçleri gelecek dönem RCP senaryo verilerine de uygulanmıştır. Daha sonra gelecek

dönem senaryo verileri üç dönem (2021-2050, 2051-2080, 2081-2100) için referans dönem verileri ile karşılaştırılmış ve olası gelecek dönem verileri ile referans dönem arasındaki değişim miktarları belirlenmiştir. Gelecek iki dönem için bir bölgenin ikliminin tayin edilmesinde kullanılan 30 yıllık veriler dikkate alınmıştır. Son dönem ise yüzyıl sonuna kadar yapılmış ve değerlendirme 20 yıllık veriler üzerinden gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık değişkeni RCP4.5 ve RCP8.5 senaryo çıktılarının gelecek dönemlerde referans dönemine göre aylık değişim miktarları Şekil 7’de verilmiştir.



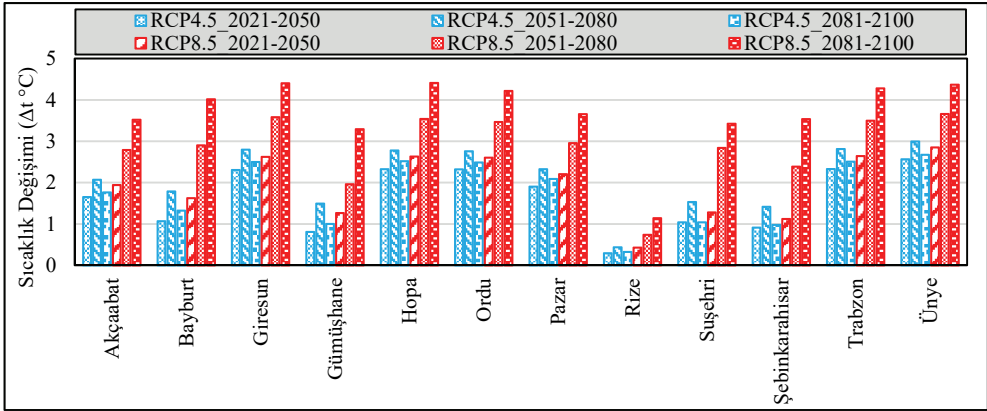
Şekil 6 - Akçaabat ve Bayburt istasyonları (1981-2005) dönemi gözlem ve GFDL genel dolaşım modeli referans ve yanlılığı düzeltilmiş referans senaryosu karşılaştırması

Şekil 6 incelendiğinde tüm istasyonlarda yaz aylarında sıcaklık artışlarının olması ve bu artışların bazı istasyonlarda 10 °C düzeyinde olması öngörülmektedir. Bunun yanında kış aylarında neredeyse havzanın tamamında sıcaklıklarda artışlar beklenmektedir. Ayrıca bu sıcaklık artışlarının yüzyıl sonlarına doğru daha da fazlaşacağı tahmin edilmektedir. RCP8.5 senaryo çıktılarına göre meydana gelmesi öngörülen sıcaklık artışları beklenildiği gibi RCP4.5 senaryosundan daha fazla çıkmıştır. En az değişim beklenen istasyon Rize istasyonu olurken, bu istasyonda ilkbahar aylarında sıcaklıklarda referans döneme göre düşüşlerin yaşanması öngörülmektedir. En fazla düşüşün ise 4 °C ile Gümüşhane istasyonunda olması beklenmektedir. Havzada hemen hemen bütün aylarda öngörülen



Şekil 7 - Gelecek dönem (2021-2050, 2051-2080, 2081-2100) RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına ait aylık ortalama sıcaklık değerlerinin referans dönem (1981-2005) senaryosuna göre değişimleri (Δt).

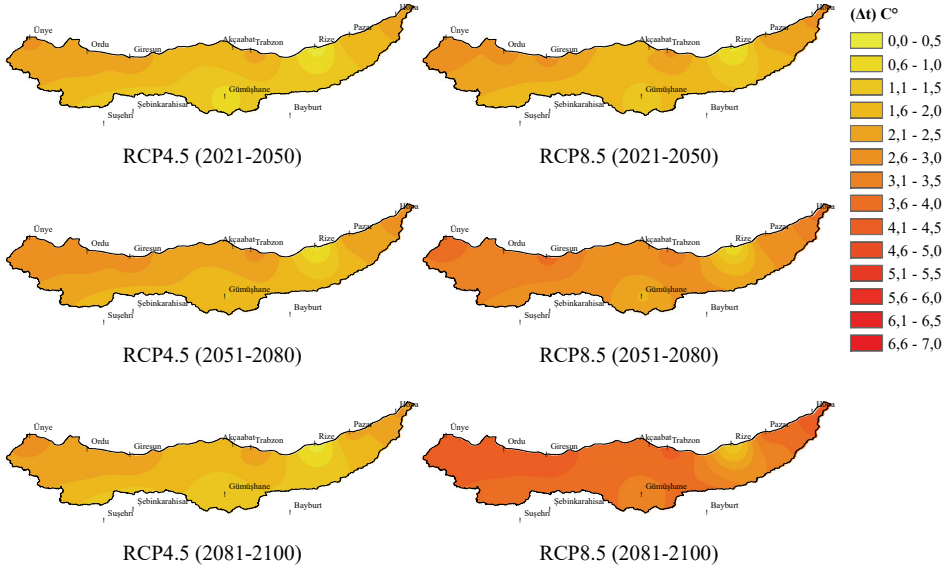
sıcaklık artışlarının buharlaşmayı arttıracığı düşünülmektedir. Bu sıcaklık artışlarının değerlendirilmesinde IPCC [5]'nin yayınlamış olduğu (1,5 °C) rapor yol gösterici olmaktadır. Rapora göre yüzyıl sonlarına kadar meydana gelecek 1,5 °C'lik sıcaklık artışının tatlı su kaynaklarını tehlikeye atacağı, Türkiye'nin de içinde bulunduğu Akdeniz Havzası gibi hassas havzalarda su kıtlığı riskini artıracığı ve kuraklık sorunlarının yaşanmasına neden olacağı vurgulanmaktadır. Bunlara bağlı olarak tarımsal faaliyetlerin tehlikeye gireceği ifade edilmektedir. Sıcaklık artışının 2 °C olması durumunda yağış rejimlerinin bozulacağı, daha şiddetli yağışların oluşacağı ve orman yangınlarının artacağı öngörülmektedir. Sıcaklık artışının 3 °C olması durumunda ise kuraklık etkilerinin şiddetini arttırabileceği, yeraltı su kaynaklarında ciddi azalmalar hatta deniz ekosisteminin çökebileceği ifade edilmektedir. Bu bilgiler ışığında DKH'da yukarıda öngörülen sıcaklık artışlarının havzada çok ciddi sorunlara neden olabileceği düşünülmektedir. Havzada yer alan istasyonların gelecek uzun dönem ortalama sıcaklıklarındaki öngörülen değişimler Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8 - RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına ait gelecek dönem (2021-2050, 2051-2080, 2081-2100) yıllık ortalama sıcaklık değerlerinin referans dönem senaryosuna (1981-2005) göre değişim (Δt).

Uzun yıllar yıllık ortalama sıcaklıklarda en fazla artış Giresun, Hopa ve Ünye istasyonlarında en az artış ise Rize istasyonunda öngörülmektedir. RCP4.5 senaryosuna göre yüzyıl sonlarında sıcaklık artış hızında bir önceki döneme göre düşüş beklenirken, RCP8.5 senaryosunda böyle bir durum söz konusu değildir. Havza geneline bakılacak olursa kötümser senaryoya göre 4 °C'yi aşan sıcaklık artışlarının beklendiği görülmektedir. Sıcaklık değişimlerinin havzanın geneline dağılımını görmek amacıyla sıcaklık değişim haritaları oluşturulmuştur (Şekil 9).

Haritalar incelendiğinde RCP8.5 senaryosunun RCP4.5 senaryosuna göre havza genelinde daha yüksek sıcaklıklar öngördüğü görülmektedir. Sıcaklıklardaki artışın RCP8.5 senaryosuna göre yüzyıl sonlarında en yüksek seviyelere çıkacağı sonucuna ulaşılmaktadır. RCP4.5 senaryosuna göre ise 2051-2080 döneminin en sıcak dönem olması beklenmektedir.

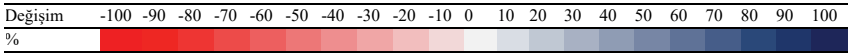
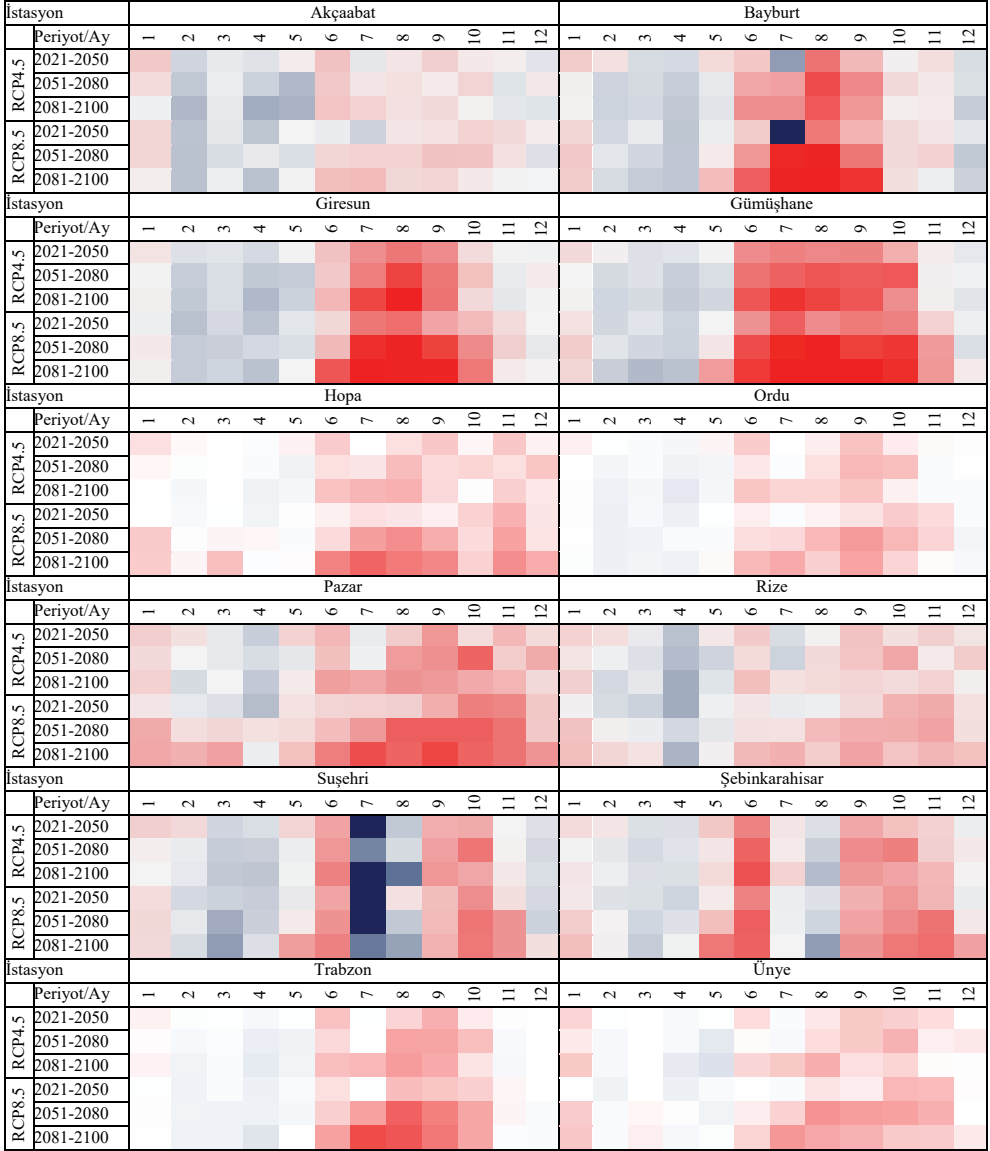


Şekil 9 - Gelecek dönem RCP4.5 ve RCP8.5 senaryo çıktılarının referans dönem senaryosuna göre değişimlerinin havzadaki dağılımı

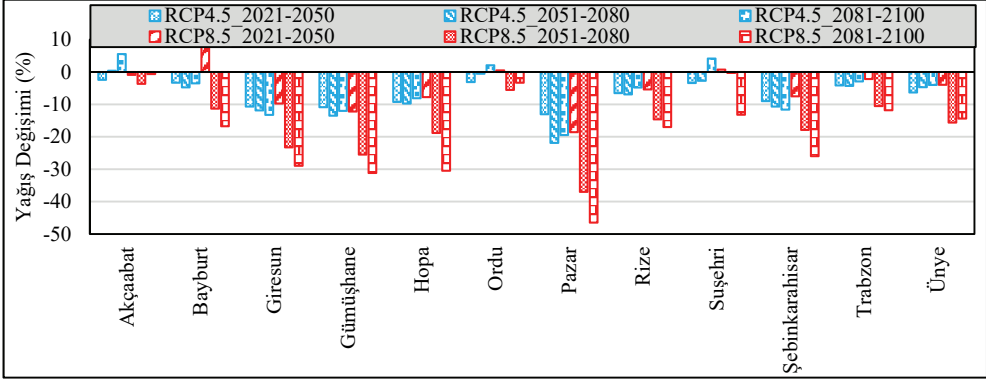
Yağış değişkeninin RCP4.5 ve RCP8.5 senaryo çıktılarının gelecek dönemlerde referans dönemine göre aylık değişim miktarları Şekil 10'da verilmiştir. Hesaplanan bu değişim miktarlarına göre yaz aylarında neredeyse havzanın tamamında yağışlarda %100'e varan düşüş beklenmektedir. Yaz aylarındaki düşüş özellikle Bayburt, Giresun ve Gümüşhane istasyonlarında ortaya çıkmaktadır. Gümüşhane ve Bayburt istasyonları karasal iklim karakteristiğine sahip bölgede bulunmaktadır ve yaz aylarında çok düşük miktarda yağış almaktadır. Bu nedenle bu bölgede yaz aylarında beklenen yağış miktarındaki yüzdesel düşüş değeri büyük bir öneme sahip değildir. Aynı şekilde Susehri istasyonunda yaz aylarında beklenen %100'lük artış durumu bu bölgenin yaz ayında çok fazla yağış almamasından dolayı göreceli olarak düşük öneme sahiptir. Bunun yanında Giresun, Hopa ve Pazar istasyonlarındaki yaz aylarında beklenen %100 oranındaki düşüş miktarı, bu istasyonların temsil ettiği bölgelerin yıl boyunca yağış almasından dolayı havza için önemlidir. Bunun yanında ilkbahar aylarında havzanın neredeyse tamamında yağışlarda artış beklenmektedir.

Havzanın özellikle ilkbahar ve yaz aylarında aldığı şiddetli yağışlar sonucunda taşkınlara maruz kaldığı göz önüne alınacak olursa %50'lere varan bu artışların havzanın gelecek dönemlerde de taşkınlarla karşı karşıya kalabileceğini göstermektedir. Özellikle havzada en fazla yağış değerlerinin kaydedildiği Hopa, Pazar ve Rize istasyonlarında gelecek dönemlerde ilkbahar aylarında öngörülen artışlar bu istasyonların temsil ettiği bölgeler için risk teşkil edeceği düşünülmektedir. RCP4.5 senaryo çıktılarına göre havzanın tamamında RCP8.5 senaryosuna kıyasla daha az değişim öngörülmektedir. Gelecek dönem ortalama yıllık toplam yağış miktarındaki değişimler Şekil 11'de verilmiştir.

Doğu Karadeniz Havzası Lokal Meteorolojik Değişkenleri İçin Bir Ölçek



Şekil 10 - Gelecek dönem (2021-2050, 2051-2080, 2081-2100) RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına ait aylık toplam yağış değerlerinin referans dönem (1981-2005) senaryosuna göre değişimleri (%).

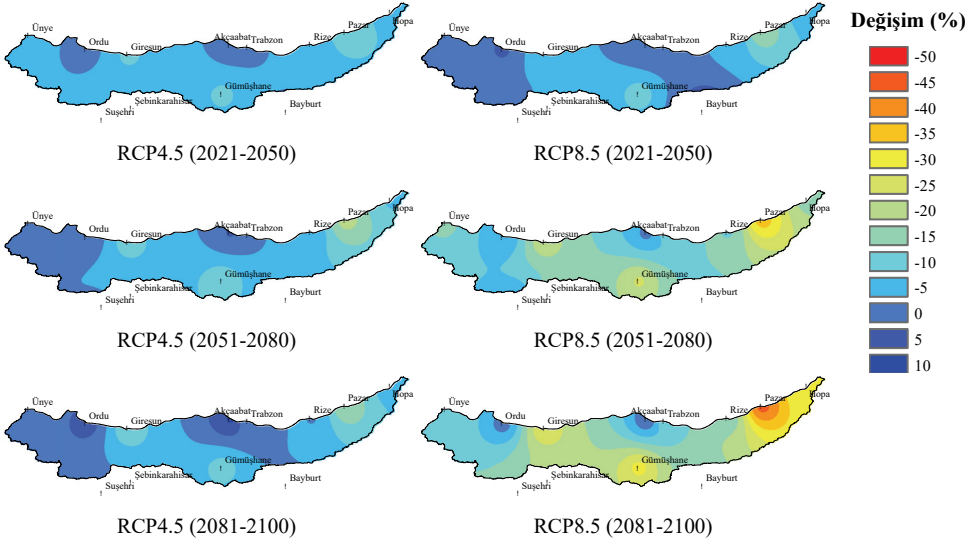


Şekil 11 - RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına ait gelecek dönem (2021-2050, 2051-2080, 2081-2100) yıllık toplam yağış değerlerinin referans dönem senaryosuna (1981-2005) göre değişim (%).

Yıllık toplam yağış miktarında en fazla düşüş Pazar istasyonunda beklenmektedir. RCP4.5 senaryosuna göre Pazar istasyonunda yüzyıl sonlarında %20'lere varan düşüş beklenirken RCP8.5 senaryosuna göre bu oran %40 seviyesindedir. En az değişim beklenen istasyonlar ise Akçaabat, Ordu ve Suşehri istasyonlarıdır. Bu istasyonlardaki değişim miktarları %10 civarındadır.

Yıllık toplam yağış miktarındaki değişimin havzadaki dağılımını gösteren değişim haritaları Şekil 12'de verilmiştir. Bu haritalarda da görüldüğü üzere RCP8.5 senaryosuna göre orta dönem ve yüzyıl sonlarına denk gelen dönemde yıllık ortalama yağış değerlerinde havza genelinde ortalama %20 oranında düşüş beklenmektedir. RCP4.5 senaryosuna göre ise havza genelinde %10'a varan düşüş öngörülmektedir. Yağış değişkeni için oluşturulan haritalar incelendiğinde havza genelinde gelecek dönemlerde yıllık ortalama toplam yağış miktarlarında %50'lere varan düşüşler beklenmektedir. En fazla düşüşün RCP8.5 senaryosuna göre ve yüzyılın son döneminde olması öngörülmektedir. Bunun yanında düşüşün her iki senaryo için de her geçen dönem daha artması beklenmektedir. Bu duruma göre bahar aylarında beklenen artış, diğer mevsimlerde beklenen düşüşten daha azdır. MGM [76] tarafından yapılan projede ve daha sonra Gürkan vd. [74] tarafından yapılmış olan çalışmada da GFDL-ESM2M modeli kullanılarak Türkiye için sıcaklık ve yağış projeksiyonları 20 km çözünürlükte, 1971-2000 referans periyoduna göre 2016-2040, 2041-2070, 2071-2099 yılları için üretilmiştir. Bu çalışmadan elde edilen çıktılara göre; yıllık ortalama sıcaklıkta RCP4.5 senaryosuna göre ortalama 1,5°C, RCP8.5 senaryosuna göre ortalama 2,5 °C artış ön görülmüştür. Ayrıca yağış miktarlarında RCP4.5 senaryosuna göre ortalama olarak 10-15 mm/yıl, RCP8.5 senaryosuna göre ortalama olarak 105-110 mm/yıl civarında azalışlar belirlenmiştir. Çalışma sonucunda sıcaklık ve yağış ortalamalarındaki değişikliklerin ülkemizin çok çeşitli coğrafik özelliklere sahip olması nedeniyle bölgesel, havza ve il bazında farklılıklar göstereceğini ifade etmişlerdir.

Doğu Karadeniz Havzası Lokal Meteorolojik Değişkenleri İçin Bir Ölçek



Şekil 12 - Doğu Karadeniz Havzası'ndaki meteoroloji istasyonlarında gelecek dönem (2021-2050, 2051-2080, 2081-2100) RCP4.5 ve RCP8.5 senaryolarına ait aylık toplam yağış değerlerinin referans dönem (1981-2005) senaryosuna göre değişimleri (%).

Turp vd. [75] tarafından yapılan bir başka çalışmada GFDL-ESM2M modeli RCP4.5 ve RCP8.5 senaryo verileri Türkiye ve çevresi için dinamik ölçek indirgeme ile 50 km çözünürlükte üretilmiştir. Turp vd. tarafından yapılan çalışmadan elde edilen çıktılar her ne kadar bu çalışmadan elde edilen çıktılara göre düşük çözünürlükte olsa da DKH için sıcaklık artışları ve yağışlarda düşüşler öngörmektedir. Çalışma kapsamında elde edilen verilerin uzun yıllık ortalamaları üzerinden yapılan değerlendirmelerde yukarıdaki çalışmalarla benzerlikler taşıdığı görülmüştür. Orman ve Su İşleri Bakanlığı tarafından yapılan ve dinamik ölçek küçültme yönteminin kullanıldığı bir çalışmada [54] gelecek dönem yağış ve sıcaklık değerleri HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR ve CNRM-CM5.1 GDM'leri RCP4.5 ve RCP8.5 senaryoları altında incelenmiştir. Çalışma sonucunda Doğu Karadeniz Havzası için iklim projeksiyonlarından elde edilen sonuçlara göre projeksiyon dönemi boyunca sıcaklıkların artması bu havzada görülen iklim değişikliği etkisi sonucunda ise yağışların da pozitif anomali sergilemesinin beklendiği ifade edilmiştir. Demircan vd. [86] tarafından yapılan bir çalışmada ise HadGEM2-ES modeline ait RCP4.5 ve RCP8.5 senaryo çıktıları dinamik ölçek indirgeme ile bölgesel ölçeğe indirgenmiştir. Projeksiyonlardan elde edilen sonuçlara göre 2013-2099'un ilk ve son dönemlerinde RCP4.5 senaryosuna göre sıcaklık artışlarının 3 °C ile 5 °C arasında artışlar ve RCP8.5'e göre ülke genelinde 6 °C'ye ulaşan artışların olabileceği öngörülmüştür. Yağış değerlerinde ise her iki senaryoya göre yüzyıl sonuna kadar kış mevsiminde ülke genelinde yağış artışı olacağı öngörülmektedir. Sıcaklık artışları da dikkate alındığında bu yağışların cinsinin kar ve donan yağış şeklinde olamayacağı dolayısıyla da kış mevsimindeki bu yağış artışının diğer mevsimlere su bütçesi açısından bir katkı sağlamayacağını ifade etmişlerdir. İlkbahar ve yaz yağışlarında ülkenin batı ve kuzey kıyı kesimleri ile kuzeydoğusu hariç ülke genelinde bir düşüş öngörülmektedir. Sonbahar yağışlarında ülke genelinde ve bütün dönemlerde bir azalış olacağı

öngörülmektedir. Bu çalışma ile Orman ve Su İşleri Bakanlığı'nın [54] çalışmasından özellikle yağış değişkeni için farklı sonuçlar elde edildiği görülmektedir. Bu durumun ölçek indirgeme yöntemi ve GDM modellerinin farklılıklarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Gelecek üç dönem (2021-2050, 2051-2080, 2081-2100) RCP4.5 ve RCP8.5 senaryo verilerinin eğilimleri Mann-Kendall eğilim analizi uygulanarak %5 anlamlılık düzeyi için incelenmiştir. Eğilim analizi yıllık ortalama sıcaklık ve yıllık toplam yağış değerleri kullanılarak yapılmıştır. Uygulanan eğilim analizi sonuçları sıcaklık ve yağış değişkenleri için sırasıyla Çizelge 6 ve Çizelge 7'de verilmiştir. Çizelge 6 incelendiğinde RCP4.5 senaryosuna göre gelecek üç dönem için de istasyonların hiç birinde %5 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı herhangi bir eğilim gözlenmediği görülmektedir. RCP8.5 senaryosuna göre ise 2021-2050 döneminde Giresun istasyonunda, 2051-2080 döneminde Bayburt, Gümüşhane, Rize, Suşehri ve Şebinkarahisar istasyonları dışındaki istasyonlarda ve 2081-2100 döneminde Bayburt, Hopa, Rize ve Suşehri istasyonları dışındaki istasyonlarda istatistiksel olarak anlamlı artış eğilimi söz konusudur. Z değerlerinin RCP4.5 (2081-2020) dönemi dışındaki durumlarda genellikle pozitif olması, sıcaklık değerlerinde artışın devam ettiğini göstermektedir. Ancak bu değerler RCP8.5 (2051-2080) ve RCP8.5 2081-2100 dönemi dışında istatistik olarak anlamlı çıkmamıştır. Ayrıca sıcaklıkların RCP 4.5'te yüzyıl sonunda istatistik olarak anlamlı olmayan azalma eğiliminde olduğu görülmektedir.

Çizelge 6 - Yıllık ortalama sıcaklık verilerine ait Mann-Kendall eğilim analizi sonuçları

Senaryo/Dönem	RCP4.5 (2021-2050)				RCP4.5 (2051-2080)				RCP4.5 (2081-2100)			
	S	Z	H ₀	Eğilim	S	Z	H ₀	Eğilim	S	Z	H ₀	Eğilim
Akçaabat	7	0,11	Kabul	Yok	-23	-0,39	Kabul	Yok	-22	-0,68	Kabul	Yok
Bayburt	-25	-0,43	Kabul	Yok	-29	-0,50	Kabul	Yok	-26	-0,81	Kabul	Yok
Giresun	43	0,75	Kabul	Yok	9	0,14	Kabul	Yok	-26	-0,81	Kabul	Yok
Gümüşhane	67	1,18	Kabul	Yok	43	0,75	Kabul	Yok	-36	-1,14	Kabul	Yok
Hopa	17	0,29	Kabul	Yok	27	0,46	Kabul	Yok	-20	-0,62	Kabul	Yok
Ordu	9	0,14	Kabul	Yok	-9	-0,14	Kabul	Yok	-24	-0,75	Kabul	Yok
Pazar	37	0,64	Kabul	Yok	5	0,07	Kabul	Yok	-18	-0,55	Kabul	Yok
Rize	-5	-0,07	Kabul	Yok	-15	-0,25	Kabul	Yok	-46	-1,46	Kabul	Yok
Suşehri	59	1,03	Kabul	Yok	53	0,93	Kabul	Yok	-38	-1,20	Kabul	Yok
Şebinkarahisar	23	0,39	Kabul	Yok	17	0,29	Kabul	Yok	-44	-1,40	Kabul	Yok
Trabzon	15	0,25	Kabul	Yok	19	0,32	Kabul	Yok	-28	-0,88	Kabul	Yok
Ünye	1	0,00	Kabul	Yok	-15	-0,25	Kabul	Yok	-20	-0,62	Kabul	Yok
Senaryo/Dönem	RCP8.5 (2021-2050)				RCP8.5 (2051-2080)				RCP8.5 (2081-2100)			
	S	Z	H ₀	Eğilim	S	Z	H ₀	Eğilim	S	Z	H ₀	Eğilim
Akçaabat	95	1,68	Kabul	Yok	119	2,11	Red	Artış	90	2,89	Red	Artış
Bayburt	-15	-0,25	Kabul	Yok	95	1,68	Kabul	Yok	60	1,91	Kabul	Yok
Giresun	117	2,07	Red	Artış	141	2,50	Red	Artış	96	3,08	Red	Artış
Gümüşhane	55	0,96	Kabul	Yok	93	1,64	Kabul	Yok	32	1,01	Kabul	Yok
Hopa	109	1,93	Kabul	Yok	127	2,25	Red	Artış	100	3,21	Red	Artış
Ordu	89	1,57	Kabul	Yok	139	2,46	Red	Artış	88	2,82	Red	Artış
Pazar	107	1,89	Kabul	Yok	123	2,18	Red	Artış	96	3,08	Red	Artış
Rize	-5	-0,07	Kabul	Yok	67	1,18	Kabul	Yok	60	1,91	Kabul	Yok
Suşehri	63	1,11	Kabul	Yok	53	0,93	Kabul	Yok	-16	-0,49	Kabul	Yok
Şebinkarahisar	-21	-0,36	Kabul	Yok	57	1,00	Kabul	Yok	90	2,89	Red	Artış
Trabzon	75	1,32	Kabul	Yok	129	2,28	Red	Artış	96	3,08	Red	Artış
Ünye	75	1,32	Kabul	Yok	113	2,00	Red	Artış	86	2,76	Red	Artış

Çizelge 7 - Yıllık toplam yağış verilerine ait Mann-Kendall eğilim analizi sonuçları

Senaryo/Dönem	RCP4.5 (2021-2050)				RCP4.5 (2051-2080)				RCP4.5 (2081-2100)			
	S	Z	H ₀	Eğilim	S	Z	H ₀	Eğilim	S	Z	H ₀	Eğilim
Akçaabat	43	0,75	Kabul	Yok	63	1,11	Kabul	Yok	52	1,65	Kabul	Yok
Bayburt	-11	-0,18	Kabul	Yok	-33	-0,57	Kabul	Yok	10	0,29	Kabul	Yok
Giresun	-41	-0,71	Kabul	Yok	29	0,50	Kabul	Yok	40	1,27	Kabul	Yok
Gümüşhane	-37	-0,64	Kabul	Yok	55	0,96	Kabul	Yok	-4	-0,10	Kabul	Yok
Hopa	9	0,14	Kabul	Yok	1	0,00	Kabul	Yok	36	1,14	Kabul	Yok
Ordu	43	0,75	Kabul	Yok	19	0,32	Kabul	Yok	24	0,75	Kabul	Yok
Pazar	-35	-0,61	Kabul	Yok	9	0,14	Kabul	Yok	28	0,88	Kabul	Yok
Rize	-5	-0,07	Kabul	Yok	25	0,43	Kabul	Yok	20	0,62	Kabul	Yok
Suşehri	25	0,43	Kabul	Yok	71	1,25	Kabul	Yok	10	0,29	Kabul	Yok
Şebinkarahisar	-37	-0,64	Kabul	Yok	25	0,43	Kabul	Yok	8	0,23	Kabul	Yok
Trabzon	29	0,50	Kabul	Yok	27	0,46	Kabul	Yok	46	1,46	Kabul	Yok
Ünye	9	0,14	Kabul	Yok	17	0,29	Kabul	Yok	20	0,62	Kabul	Yok
Senaryo/Dönem	RCP8.5 (2021-2050)				RCP8.5 (2051-2080)				RCP8.5 (2081-2100)			
	S	Z	H ₀	Eğilim	S	Z	H ₀	Eğilim	S	Z	H ₀	Eğilim
Akçaabat	-19	-0,32	Kabul	Yok	-25	-0,43	Kabul	Yok	-26	-0,81	Kabul	Yok
Bayburt	37	0,64	Kabul	Yok	-65	-1,14	Kabul	Yok	-22	-0,68	Kabul	Yok
Giresun	-73	-1,28	Kabul	Yok	-85	-1,50	Kabul	Yok	-76	-2,43	Red	<i>Azalış</i>
Gümüşhane	-51	-0,89	Kabul	Yok	-109	-1,93	Kabul	Yok	-50	-1,59	Kabul	Yok
Hopa	-127	-2,25	Red	<i>Azalış</i>	-89	-1,57	Kabul	Yok	-92	-2,95	Red	<i>Azalış</i>
Ordu	21	0,36	Kabul	Yok	-31	-0,54	Kabul	Yok	-50	-1,59	Kabul	Yok
Pazar	-91	-1,61	Kabul	Yok	-83	-1,46	Kabul	Yok	-98	-3,15	Red	<i>Azalış</i>
Rize	-41	-0,71	Kabul	Yok	-79	-1,39	Kabul	Yok	-78	-2,50	Red	<i>Azalış</i>
Suşehri	77	1,36	Kabul	Yok	-37	-0,64	Kabul	Yok	-34	-1,07	Kabul	Yok
Şebinkarahisar	-19	-0,32	Kabul	Yok	-51	-0,89	Kabul	Yok	-48	-1,52	Kabul	Yok
Trabzon	-27	-0,46	Kabul	Yok	-21	-0,36	Kabul	Yok	-58	-1,85	Kabul	Yok
Ünye	-47	-0,82	Kabul	Yok	-89	-1,57	Kabul	Yok	-28	-0,88	Kabul	Yok

Yağış değişkeni için hazırlanmış olan Çizelge 7 incelendiğinde yine RCP4.5 senaryosu için gelecek dönemlerin ve istasyonların hiçbirinde herhangi bir eğilime rastlanmamıştır. Bunun yanında, RCP8.5 senaryosuna göre 2021-2050 döneminde Hopa istasyonunda azalış eğilimi görülürken diğer istasyonlarda herhangi bir eğilim belirlenmemiştir. 2051-2080 döneminde herhangi bir istasyonda herhangi bir eğilim söz konusu olmazken 2081-2100 döneminde Giresun, Hopa, Pazar ve Rize istasyonlarında azalış eğilimi gözlenmiştir. Ayrıca her üç dönem içinde %5 anlamlılık düzeyi için istatistiksel olarak anlamlı olmasa da azalma eğiliminin neredeyse istasyonların tamamında devam ettiği görülmektedir. Ancak Karahan vd. [87] tarafından Mann-Kendal yöntemi kullanılarak yapılan bir çalışmada Doğu Karadeniz bölgesinde yer alan meteoroloji istasyonlarından elde edilen yağış şiddeti değerlerinde gözlem süresinin ikinci yarısında genellikle bir artış eğiliminin bulunduğu ve özellikle Trabzon ve Artvin illerinin yağış şiddetlerinde bu artma eğiliminin belirgin olduğu ifade edilmektedir. Ayrıca Zeybekoğlu ve Karahan [88] tarafından yapılan bir başka çalışmada da Trabzon ve Artvin illerinin kısa ve orta süreli yağış şiddetlerinde belirgin bir artış eğiliminin bulunduğu vurgulanmaktadır. Gelecek dönem aylık toplam yağış verilerine uygulanan eğilim analiz sonuçları ile meteoroloji istasyonlarından elde edilen gözlenmiş yağış şiddeti verilerine uygulanan eğilim analizi sonuçlarında farklılıklar olduğu belirlenmiştir. İklim değişikliği etkileri ile sıcaklıklarda meydana gelebilecek 1 °C'lik artışların ortalama yağış değerlerini %1-3 oranında, aşırı yağışları ise %7 oranında etkilemektedir [92]. Doğu

Karadeniz Havzası'nda olduğu gibi, iklim değişikliği ortalama yağış ve aşırı yağış değerlerini farklı derecede etkileyebilmektedir. Taşkınların sıklıkla yaşandığı havzada iklim değişikliğinin taşkınlar üzerine etkisinin net bir şekilde belirlenmesinin ancak farklı GMD çıktılarından elde edilecek standart süreli yağış şiddeti verilerinin değişiminin incelenmesi ile mümkün olacağı düşünülmektedir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada iklim değişikliğinin Doğu Karadeniz Havzası sıcaklık ve yağış değişkenleri üzerindeki olası etkileri incelenmiştir. Bunun için havza içerisinde ve yakın çevresinde yer alan 12 adet meteoroloji istasyonu belirlenmiştir. Belirlenen meteoroloji istasyonları için 2021-2100 yılı yağış ve sıcaklık verileri GFDL-ESM2M GDM modelinin RCP4.5 ve RCP8.5 senaryo çıktıları bölgesel ölçeğe indirgenerek üretilmiştir. GDM modelinin kaba çözünürlüklü atmosferik değişkenlerini bölgesel ölçeğe indirgemek için çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri (ÇDURE) tabanlı istatistiksel ölçek indirgeme yöntemi kullanılmıştır. Ayrıca ÇDURE yönteminin performanslarının karşılaştırılması amacı ile klasik regresyon analizi (KRA) tabanlı modeller kurulmuştur. Ölçek indirgeme modellerinin kurulmasında ERA-Interim yeniden analiz veri setinde bulunan atmosferik değişkenler kullanılmıştır. En yüksek performans değerlerini veren yöntemle ait modeller kullanılarak GDM modellerine ait RCP senaryo çıktıları 2021-2050, 2051-2080 ve 2081-2100 dönemleri olmak üzere üç dönem için ayrı ayrı incelenmiştir. Ayrıca gelecek üç dönem için üretilmiş olan veriler Mann-Kendall eğilim analizi uygulanmış ve %5 anlamlılık düzeyindeki eğilimleri belirlenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- ÇDURE yönteminin KRA_LF ve KRA_EF'ye kıyasla hem sıcaklık hem de yağış değişkeni için genel olarak daha yüksek performans değerleri verdiği belirlenmiştir.
- ÇDURE yönteminin ERA-Interim yeniden analiz veri takımında yer alan atmosferik değişkenleri kullanarak sıcaklık ve yağış değişkenlerinin bölgesel ölçeğe indirgenmesinde yeterli performans verdiği görülmüştür. Sıcaklık değişkeni için hesaplanan NS değerlerinin eğitim ve test veri takımı için tüm istasyonlarda 0,967 değerinin üzerinde olduğu, yağış değişkeni için ise eğitim veri takımında 0,513 ile 0,698 arasında, test veri takımında ise 0,470 ile 0,777 arasında olduğu ortaya çıkmıştır.
- Havzanın genelinde sıcaklık değerlerinde artışların yaşanacağı, bu artışların özellikle yaz aylarında etkisini daha da arttıracığı öngörülmüştür. RCP8.5 senaryo çıktılarına göre yaz ayları için öngörülen sıcaklık artışları havzanın güneyinde bulunan istasyonlarda 10 °C'lere varmaktadır.
- Yakın gelecek olarak ifade edilen 2021-2050 döneminde yıllık ortalama sıcaklık değerlerinde havza genelinde iyimser senaryoya göre yaklaşık 1,5 °C, kötümser senaryoya göre ise yaklaşık 2 °C'lik artış öngörülmektedir. Yüzyıl sonlarında ise bu değerlerin sırasıyla yaklaşık 2 °C ve 4 °C olması beklenmektedir.
- Aylık toplam yağış değerlerinde ilkbahar aylarında %50'lere varan artışlar beklenirken, yaz aylarında özellikle havzanın güney kesiminde %100'e varan düşüş öngörülmektedir.
- Yıllık ortalama toplam yağış değerlerinde havzanın genelinde RCP4.5 senaryosuna göre

yüzyıl boyunca ortalama -%10 ile %10 arasında bir değişim beklenirken, RCP8.5 senaryosuna göre yakın gelecekte çok fazla değişim beklenmemekle beraber orta vadede %30, uzun vadede ise %50'lere varan düşüş öngörülmektedir.

- RCP8.5 senaryo çıktılarından elde edilen sonuçlara göre sıcaklık ve yağış değerlerinde öngörülen artış ve düşüş değerleri RCP4.5 senaryo çıktılarına göre daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır.
- Gelecek dönemlerde RCP4.5 senaryosuna göre genel olarak artış eğilimi olmasına karşın bu eğilim %5 anlamlılık düzeyine istatistiksel olarak anlamlı değildir. RCP8.5 senaryosuna göre ise sıcaklıklarda istatistiksel olarak anlamlı artış, yağışlarda ise azalış eğilimi öngörülmektedir.

Havzada gelecek dönemde artan sıcaklıklarla beraber yağış değerlerinde özellikle ilkbahar ve yaz aylarında öngörülen artışların havzanın özellikle kıyı kesiminde taşkın riskini arttıracak, havzanın güney bölümünde ise yaz aylarında öngörülen sıcaklık artışlarının son dönemlerde bu mevsimde yaşanan kuraklığı daha da arttıracakı düşünülmektedir. Bunun yanında havzada yer alan, ülke ekonomisine önemli katkısı olan ve aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynağı olan hidroelektrik santrallerinin havzada uzun vadede öngörülen sıcaklık artışından ve yağış miktarındaki düşüşten olumsuz etkilenebileceği düşünülmektedir. Doğu Karadeniz Havzası'nda yukarıda bahsedilen değerlendirmelerin daha detaylı yapılabilmesi için havzada özellikle yakın gelecek için günlük verilerle daha fazla model çıktısı ile değerlendirilmesi, ayrıca havzada yer alan akarsularda kurulacak uygun yağış akış modelleri ile elde edilecek akım değerlerinin iklim değişikliği etkisi altında nasıl değişeceğinin irdelenmesi önerilmektedir. Bu çalışma kapsamında geleceğe yönelik verilerin GFDL-ESM2M GDM modelinin RCP4.5 ve RCP8.5 senaryo çıktıları kullanılarak 2021-2100 aralığı gibi uzun bir süre için elde edildiği ve güvenilirliğinin tartışmaya açık olduğu unutulmamalıdır.

Teşekkür

Kıymetli vakitlerini ayırarak çalışmayı değerlendiren, görüş ve önerileri ile çalışmaya değer katan hakemlere ve modelleme çalışmalarında kullanılan verilerin temininde desteklerini esirgemeyen Meteoroloji 11. Bölge Müdürlüğü çalışanlarına teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Al-Mukhtar, M., Qasim, M., Future predictions of precipitation and temperature in Iraq using the statistical downscaling model. *Arabian Journal of Geosciences*, 12(2), 25, 1-16, 2019.
- [2] Nourani V., Razzaghzadeh Z., Baghanam A.H., Molajou A., ANN-based statistical downscaling of climatic parameters using decision tree predictor screening method. *Theoretical and Applied Climatology*, 137, 1729-1746, 2019.

- [3] Smith, J. B., Schneider, S. H., Oppenheimer, M., Yohe, G. W., Hare, W., Mastrandrea, M. D., Patwardhan, A., Burton, I. Morlot, J. C., Magadza, C. H. D., Füssel, H. M., Pittock, A. B., Rahman, A., Suarez, A., Ypersele, J. P., Assessing dangerous climate change through an update of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)“reasons for concern”. Proceedings of the national Academy of Sciences, 106(11), 4133-4137, 2009.
- [4] IPCC Climate change 2013: The Physical Science Basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change In: Stocker T. F., Qin D., Plattner G. K., Tignor M., Allen S. K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P. M., (eds) Cambridge university press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, 2013.
- [5] IPCC Summary for policymakers 2018. In: Masson-Delmotte V, et al, editors. Global warming of 1.5°C: An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 32 pp, 2018.
- [6] Osses D.A., Casanueva A., Figueroa C.R., Uribe J.M., Peneque M., Climate change projection of temperature and precipitation in Chile based on statistical downscaling. *Climate Dynamics*, 54, 4309-4330, 2020.
- [7] Ouhamdouch, S., Bahir, M., Climate change impact on future rainfall and temperature in semi-arid areas (Essaouira Basin, Morocco). *Environmental Processes*, 4(4), 975-990, 2017.
- [8] Trenberth, K. E., Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, 47, 123-138, 2011.
- [9] Bergström, S., Carlsson, B., Gardelin, M., Lindström, G., Pettersson, A., Rummukainen, M., Climate change impacts on runoff in Sweden assessments by global climate models, dynamical downscaling and hydrological modelling. *Climate Research*, 16(2), 101-112, 2001.
- [10] Chu, J. T., Xia, J., Xu, C. Y., Singh, V. P., Statistical downscaling of daily mean temperature, pan evaporation and precipitation for climate change scenarios in Haihe River, China. *Theoretical and Applied Climatology*, 99(1-2), 149-161, 2010.
- [11] Goyal, M. K., Ojha, C. S. P., Downscaling of surface temperature for lake catchment in an arid region in India using linear multiple regression and neural networks. *International Journal of Climatology*, 32(4), 552-566, 2012.
- [12] Duhan, D., Pandey, A. Statistical downscaling of temperature using three techniques in the Tons River basin in Central India. *Theoretical and Applied Climatology*, 121(3-4), 605-622, 2015.
- [13] Kouhestani, S., Eslamian, S. S., Abedi-Koupai, J., Besalatpour, A. A., Projection of climate change impacts on precipitation using soft-computing techniques: A case study in Zayandeh-rud Basin, Iran. *Global and Planetary Change*, 144, 158-170, 2016.

- [14] Okkan, U., Fistikoglu, O., Evaluating climate change effects on runoff by statistical downscaling and hydrological model GR2M. *Theoretical and Applied Climatology*, 117(1-2), 343-361, 2014.
- [15] Yilmaz, A. G., The effects of climate change on historical and future extreme rainfall in Antalya, Turkey, *Hydrological Sciences Journal*, 60, 12, 2148-2162, 2015.
- [16] Serbes, Z. A., Yıldırım, T. Ö., Mengü, G. P., Akkuzu, E., Aşık, Ş., Okkan, U., Temperature and precipitation projections under AR4 scenarios: The case of küçük menderes basin, Turkey. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 20(1), 44-51, 2019.
- [17] Yilmaz, A. G., Imteaz, M. A., Climate change and water resources in Turkey: a review. *International Journal of Water*, 8(3), 299-313, 2014.
- [18] Yüksek, Ö., Kankal, M., Üçüncü, O., Assessment of big floods in the Eastern Black Sea Basin of Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(1), 797-814, 2013.
- [19] Mekonnen, D.F., Disse, M., Analyzing the future climate change of Upper Blue Nile River basin using statistical downscaling techniques. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22: 2391–2408, 2018.
- [20] Wilby, R. L., Harris, I., A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: Low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research*, 42(2), 1-10, 2006.
- [21] Wilby, R. L., Hay, L. E., Gutowski Jr, W. J., Arritt, R. W., Takle, E. S., Pan, Z., Leavesley G. H., Martyn P. C., Hydrological responses to dynamically and statistically downscaled climate model output. *Geophysical Research Letters*, 27(8), 1199-1202, 2000.
- [22] Hay, L. E., Wilby, R. L., Leavesley, G. H., A comparison of delta change and downscaled GCM scenarios for three mountainous basins in the United States. *Journal of the American Water Resources Association*, 36(2), 387-397, 2000.
- [23] Wilby, R. L., Dawson, C. W., Barrow, E. M., SDSM-a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts. *Environmental Modelling & Software*, 17(2), 145-157, 2002.
- [24] Mora, D. E., Campozano, L., Cisneros, F., Wyseure, G., Willems, P., Climate changes of hydrometeorological and hydrological extremes in the Paute basin, Ecuadorean Andes. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(2), 631-648, 2014.
- [25] Okkan, U., Kirdemir, U. Downscaling of monthly precipitation using CMIP5 climate models operated under RCPs. *Meteorological Applications*, 23(3), 514-528, 2016.
- [26] Fistikoglu, O., Okkan, U., Statistical downscaling of monthly precipitation using NCEP/NCAR reanalysis data for Tahtali River Basin in Turkey. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(2), 157-164, 2011.

- [27] Timbal, B., Dufour, A., McAvaney, B., An estimate of future climate change for western France using a statistical downscaling technique. *Climate Dynamics*, 20(7-8), 807-823, 2003.
- [28] Feng, K. O. N. G., Characteristics and Comparison of Different Downscaling Methods in Global Climate Model. *Meteorological & Environmental Research*, 11(1), 40-44, 2020.
- [29] Bermudez, M., Cea, L., Van Uytven, E., Willems, P., Farfán, J. F., Puertas, J., A robust method to update local river inundation maps using global climate model output and weather typing based statistical downscaling. *Water Resources Management*, 34(14), 4345-4362, 2020.
- [30] Klein, W. H., Objective specification of monthly mean surface temperature from mean 700 mb heights in winter. *Monthly Weather Review*, 111(4), 674-691, 1983.
- [31] Landman, W. A., Mason, S. J., Tyson, P. D., Tennant, W. J., Statistical downscaling of GCM simulations to streamflow. *Journal of Hydrology*, 252(1-4), 221-236, 2001.
- [32] Wang, Q., Huang, J., Liu, R., Men, C., Guo, L., Miao, Y., Jiao, L., Wang, Y., Shoaib, M., Xia, X., Sequence-based statistical downscaling and its application to hydrologic simulations based on machine learning and big data. *Journal of Hydrology*, 586, 124875, 2020.
- [33] Sun, L., Lan, Y., Statistical downscaling of daily temperature and precipitation over China using deep learning neural models: Localization and comparison with other methods. *International Journal of Climatology*, 41, 1128-1147, 2020.
- [34] Sulca, J., Vuille, M., Timm, O. E., Dong, B., Zubieta, R., Empirical-Statistical Downscaling of Austral Summer Precipitation over South America, with a Focus on the Central Peruvian Andes and the Equatorial Amazon Basin. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 60(1), 65-85, 2021.
- [35] Adnan, R. M., Liang, Z., Heddam, S., Zounemat-Kermani, M., Kisi, O., Li, B., Least square support vector machine and multivariate adaptive regression splines for streamflow prediction in mountainous basin using hydro-meteorological data as inputs. *Journal of Hydrology*, 586, 124371, 2020.
- [36] Wang, L., Wu, C., Gu, X., Liu, H., Mei, G., Zhang, W., Probabilistic stability analysis of earth dam slope under transient seepage using multivariate adaptive regression splines. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(6), 2763-2775, 2020.
- [37] Akin, M., Eyduran, S. P., Eyduran, E., Reed, B. M., Analysis of macro nutrient related growth responses using multivariate adaptive regression splines. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 140(3), 661-670, 2020.
- [38] Nacar, S., Mete, B., Bayram, A., Estimation of daily dissolved oxygen concentration for river water quality using conventional regression analysis, multivariate adaptive regression splines, and TreeNet techniques. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(12), 1-21, 2020.

- [39] Nacar, S., Bayram, A., Baki, O. T., Kankal, M., Aras, E., Spatial forecasting of dissolved oxygen concentration in the Eastern Black Sea Basin, Turkey. *Water*, 12(4), 1041, 2020.
- [40] Okkan U., İnan G., Gediz Havzası'nda gözlenen ve re-analiz veri setlerinden elde edilen yağış ve sıcaklık verilerine ait eğilimlerin 1980-2010 referans iklim dönemi için karşılaştırılması. *DSİ Teknik Bülteni*, 119, 10-26, 2015.
- [41] Wu, J., Zhang, P., Zha, J., Zhao, D., Lu, W., Evaluating the long-term changes in temperature over the low-latitude plateau in China using a statistical downscaling method. *Climate Dynamics*, 52(7), 4269-4292, 2019.
- [42] Mutz, S. G., Scherrer, S., Muceniece, I., Ehlers, T. A., Twenty-first century regional temperature response in Chile based on empirical-statistical downscaling. *Climate Dynamics*, 1-14, 2021.
- [43] Çıtakoğlu, H., Demir, V., Haktanır, T., L Momentler Yöntemiyle Karadeniz'e Dökülen Akarsulara Ait Yıllık Anlık Maksimum Akım Değerlerinin Bölgesel Frekans Analizi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Cilt 6, Sayı 2, 571-580, 2017.
- [44] Orman ve Su İşleri Bakanlığı (OSİB), Havza Koruma Eylem Planlarının Hazırlanması Projesi Doğu Karadeniz Havzası, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) Marmara Araştırma Merkezi, Çevre ve Temiz Üretim Enstitüsü, 2013.
- [45] Erkek, C. ve Ağıraltıoğlu, N., Su Kaynakları Mühendisliği, Altıncı Baskı, Beta Basım, İstanbul, 2010.
- [46] Çınaklı, M., Doğu Karadeniz Bölümü'nde Meydana Gelen Taşkınlar, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Ankara, 2008.
- [47] Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM), Meteorolojik Afetler, Araştırma Dairesi Başkanlığı, Meteorolojik Afetler Şube Müdürlüğü, Meteoroloji Genel Müdürlüğü Matbaası, Ankara, 2018.
- [48] Anandhi, A., Srinivas, V. V., Nanjundiah, R. S., Nagesh Kumar, D., Downscaling precipitation to river basin in India for IPCC SRES scenarios using support vector machine. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 28(3), 401-420, 2008.
- [49] Okkan, U., Assessing the effects of climate change on monthly precipitation: proposing of a downscaling strategy through a case study in Turkey. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 19(4), 1150-1156, 2015.
- [50] Okkan, U., Karakan, E., İklim Değişikliğinin İkizcetepeler Barajı Akımlarına Etkilerinin Modellenmesi: 2015-2030 Projeksiyonu. *Teknik Dergi*, 27(2), 7379-7401, 2016.
- [51] Berrisford, P., Kallberg, P., Kobayashi, S., Dee, D., Uppala, S., Simmons, A. J., Polii P., Sato, H., Atmospheric conservation properties in ERA-Interim. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(659), 1381-1399, 2011.

- [52] Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Holm E.V., Isaksen L., Kallberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J. N., Vitart F., The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly Journal Of The Royal Meteorological Society*, 137(656), 553-597, 2011.
- [53] Berrisford P., Dee D.P.K.F., Fielding K., Fuentes M., Kallberg P., Kobayashi S., Uppala S., The ERA-interim archive, ERA report series, (1), 1-16, 2009.
- [54] Orman ve Su İşleri Bakanlığı (OSİB), Konya Havzası Kuraklık Yönetim Planı. Su yönetimi Genel Müdürlüğü, Taşkın ve Kuraklık Yönetim Dairesi Başkanlığı, Ankara, 2015.
- [55] Demircan, M., Gürkan, H., Eskiöğlü, O., Arabacı, H., Coşkun, M., Climate change projections for Turkey: three models and two scenarios, *Türkiye Su Bilimi ve Yönetimi Dergisi*, 1(1), 22-43, 2017.
- [56] Orman ve Su İşleri Bakanlığı (OSİB), İklim değişikliğinin su kaynaklarına etkisi projesi Proje Nihai Raporu, 2016.
- [57] Okkan, U., Kirdemir, U., Investigation of the behavior of an agricultural-operated dam reservoir under RCP scenarios of AR5-IPCC. *Water Resources Management*, 32(8), 2847-2866, 2018.
- [58] Friedman J.H., Multivariate adaptive regression splines, *The Annals of Statistics*, 19(1), 1-67, 1991.
- [59] Friedman, J. H., Roosen, C. B. An introduction to multivariate adaptive regression splines. *Statistical Methods in Medical Research*, 4(3), 197-217, 1995.
- [60] Kisi O., Parmar K.S., Application of least square support vector machine and multivariate adaptive regression spline models in long term prediction of river water pollution, *Journal of Hydrology*, 534, 104-112, 2016.
- [61] Özfalçı Y., Çok değişkenli uyarlanabilir regresyon kesitleri: Mars, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2008.
- [62] Nacar S., Kankal M., Hınıs M.A., Çok değişkenli uyarlanabilir regresyon eğrileri (ÇDURE) ile Günlük Akarsu Akımlarının Tahmini-Haldizen Deresi Örneği, *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(1), 38-47, 2018.
- [63] Ünal B., Çok değişkenli uyarlamalı regresyon uzanımları, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2009.
- [64] Kirdemir, U., Okkan, U., Farklı yanlılık düzeltme yöntemlerinin istatistiksel ölçeğe indirgenmiş yağış projeksiyonlarına uygulanması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 868-881, 2019.

- [65] Schmidli, J., Frei, C., Vidale, P. L., Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling methods. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 26(5), 679-689, 2006.
- [66] Lenderink, G., Buishand, A., Van Deursen, W., Estimates of future discharges of the river Rhine using two scenario methodologies: direct versus delta approach. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(3), 1145-1159, 2007.
- [67] Ines, A. V., Hansen, J. W., Bias correction of daily GCM rainfall for crop simulation studies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 138(1-4), 44-53, 2006.
- [68] Jakob Themeßl, M., Gobiet, A., Leuprecht, A., Empirical-statistical downscaling and error correction of daily precipitation from regional climate models. *International Journal of Climatology*, 31(10), 1530-1544, 2011.
- [69] Cannon, A. J., Sobie, S. R., Murdock, T. Q., Bias correction of GCM precipitation by quantile mapping: How well do methods preserve changes in quantiles and extremes?. *Journal of Climate*, 28(17), 6938-6959, 2015.
- [70] Wilby, R. L., Charles, S. P., Zorita, E., Timbal, B., Whetton, P., Mearns, L. O., Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods. Supporting material of the Intergovernmental Panel on Climate Change, available from the DDC of IPCC TGCIA, 27, 2004.
- [71] Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L., Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900, 2007.
- [72] Tatli, H., Nüzhet Dalfes, H., Sibel Menteş, Ş., A statistical downscaling method for monthly total precipitation over Turkey. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 24(2), 161-180, 2004.
- [73] Tatli, H., Dalfes, H. N., Menteş, Ş. S., Surface air temperature variability over turkey and its connection to large-scale upper air circulation via multivariate techniques. *International Journal of Climatology*, 25(3), 331-350, 2005.
- [74] Gürkan, H., Arabacı, H., Demircan, M., Eskioğlu, O., Şensoy, S., Yazıcı, B., GFDL-ESM2M modeli temelinde RCP4. 5 ve RCP8. 5 senaryolarına göre Türkiye İçin sıcaklık ve yağış projeksiyonları. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 14(2), 77-88, 2016.
- [75] Turp, M. T., Öztürk, T., Türkeş, M., Kurnaz, M. L., RegCM4. 3.5 bölgesel iklim modelini kullanarak Türkiye ve çevresi bölgelerin yakın gelecekteki hava sıcaklığı ve yağış klimatolojileri için öngörülen değişikliklerin incelenmesi. *Ege Coğrafya Dergisi*, 23(1), 1-24, 2014.
- [76] Meteoroloji Genel Müdürlüğü, Yen senaryolarla Türkiye iklim projeksiyonları ve iklim değişikliği, Araştırma Dairesi Başkanlığı, Klimatoloji Şube Müdürlüğü, Ankara, 2015.
- [77] Mahdavi, M., Sharifi, F., Bihamta, M. R., Methodology for selecting the best predictor for climate change impact assessment in Karkheh basin, Iran. *Journal of Environmental Science & Engineering*, 51(4), 249-256, 2009.

- [78] Chan, S. C., Kendon, E. J., Roberts, N., Blenkinsop, S., Fowler, H. J., Large-scale predictors for extreme hourly precipitation events in convection-permitting climate simulations. *Journal of Climate*, 31(6), 2115-2131, 2018.
- [79] Mann, H. B., Nonparametric tests against trend. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 245-259, 1945.
- [80] Kendall M. G., Rank correlation methods. Oxford University Press, New York, 1975.
- [81] Akçay, F., Kankal, M., Şan, M., Innovative approaches to the trend assessment of streamflows in the eastern Black Sea basin, Turkey. *Hydrological Sciences Journal*, 67(2), 222-247, 2022.
- [82] Şan, M., Akçay, F., Linh, N. T. T., Kankal, M., Pham, Q. B., Innovative and polygonal trend analyses applications for rainfall data in Vietnam. *Theoretical and Applied Climatology*, 144(3), 809-822, 2021.
- [83] Xoplaki, E., González-Rouco, J. F., Luterbacher, J., Wanner, H., Wet season Mediterranean precipitation variability: influence of large-scale dynamics and trends. *Climate Dynamics*, 23(1), 63-78, 2004.
- [84] Maheras, P., Tolika, K., Anagnostopoulou, C., Vafiadis, M., Patrikas, I., Flocas, H. On the relationships between circulation types and changes in rainfall variability in Greece. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 24(13), 1695-1712, 2004.
- [85] Anılan, T., Yüksek, Ö., Kankal, M., Doğu Karadeniz Havzası'nın L-Momentlere Dayalı Taşkın Frekans Analizi. *Teknik Dergi*, 27(2), 7403-7427, 2016.
- [86] Demircan, M., Demir, Ö., Atay, H., Eskioğlu, O., Yazıcı, B., Gürkan, H., Tuvan, A., Akçakaya, A., Türkiye'de Yeni Senaryolara Göre İklim Değişikliği Projeksiyonları. TÜCAUM-VIII. Coğrafya Sempozyumu, 23-24, 2014.
- [87] Karahan, H., Bahar, E., Zeybekoğlu U., Standart Süreli Maksimum Yağış Şiddetleri için Trend Analizi: Doğu Karadeniz Bölgesi için Bir Uygulama, 7. Kentsel Altyapı Sempozyumu, Bildiriler kitabı, 227-238, Kasım 2015, Trabzon, 2015.
- [88] Zeybekoğlu, U., Karahan, H., Standart süreli yağış şiddetlerinin eğilim analizi yöntemleriyle incelenmesi . *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(6) , 974-1004, 2018.
- [89] Dikici, M., Aksel, M., Evaluation of two vegetation indices (NDVI and VCI) Over Asi Basin in Turkey. *Teknik Dergi*, 32(4), 2020.
- [90] Şen, K., Aksu, H., İstanbul için standart süreli gözlenen en büyük yağışların eğilimleri. *Teknik Dergi*, 32(1), 1-2, 2021.
- [91] Alramlawi, K., Fıstıkoğlu, O., Estimation of Intensity-Duration-Frequency (IDF) Curves from Large Scale Atmospheric Dataset by Statistical Downscaling. *Teknik Dergi*, 33(1), 2022.
- [92] Gao, C., Booij, M. J., Xu, Y. P., Impacts of climate change on characteristics of daily-scale rainfall events based on nine selected GCMs under four CMIP5 RCP scenarios in Qu River basin, east China. *International journal of climatology*, 40(2), 887-907, 2020.

Kentiçi Toplu Taşıma Sistemlerinde Performansa Dayalı Ödeme Modelinin Geliştirilmesi

Sezgin TEKİN¹
Halim CEYLAN²
Sevil KÖFTECİ³

ÖZ

Türkiye'de toplu taşıma sistemleri temel olarak üç tipte işletilmektedir: sadece kamu işletmeciliği, sadece özel işletmecilik ve karma tip (hem kamu hem de özel işletmeci). Özel işletmelerin bulunduğu toplu taşıma sistemlerinde, ayrıcalıklı yolcuların (65 yaş üstü, engelli, öğrenci vb.) ücretsiz veya indirimli ulaşımı, işletme maliyetlerinin sürekli artmasına neden olmaktadır. Bu sebeple, merkezi ve yerel yönetimler tarafından özel işletmelere sübvansiyon yapılması gündeme gelmiştir. Yapılan farklı uygulamalarda, özel işletmecilerin maliyetlerinin düşürülmesi, verimliliklerinin artırılması ve hizmet kalitesinin geliştirilmesine yönelik bir standart bulunmamaktadır. Bu çalışmada, toplu taşıma sisteminde özel toplu taşıma şirketlerinin faaliyet göstermesi için çeşitli yöntemlerle yapılacak sözleşmeler kapsamında değerlendirilmesi gereken performans kriterleri ve ödeme esasları ele alınmıştır. Örnek alınan toplu taşıma sisteminde performansa dayalı bir ödeme modelinin oluşturulması amaçlanmıştır. Bunun için literatürde uygulanan sözleşme ve ödeme modelleri değerlendirilmiş, performansa dayalı bir ödeme modeli için matematiksel bir model oluşturulmuştur. ANFIS (Adaptive Neural-Fuzzy Inference Systems) yöntemi kullanılarak örneklenen özel toplu taşıma işletmesinin önceki dönem verileri kullanılarak maliyet değerlendirmesi yapılmıştır. Belirlenen performans kriterlerinin ağırlıkları AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci) yöntemi ile belirlenerek ödeme modeli katsayıları oluşturulmuştur. Yapılan simülasyonlar ile önerilen performansa dayalı ödeme modelinin yolcu bazlı model ile karşılaştırması yapılmıştır. Analiz çalışması ile, önerilen modelin özel taşımacıların gelir-gider oranında %37 daha iyi sonuç verdiği ve taşımacıların maliyetlerinin tamamen karşılandığı sonucu elde edilmiştir. Çalışmada önerilen yöntem kullanılarak toplu taşıma

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 23 Haziran 2021 günü ulaşmıştır. 29 Ağustos 2022 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Ocak 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.955920>

1 Antalya Büyükşehir Belediyesi, Ulaşım Planlama ve Raylı Sistem Dairesi Başkanlığı, Antalya
sezgin.tekin@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0001-7762-5680>

2 Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli
halimc@pau.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-4616-5439>

3 Akdeniz Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya
skofteci@akdeniz.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-5096-2545>

sisteminin sürekliliğinin sağlanabileceği, ilave performans ödemesi ile de hizmet kalitesinin artırılarak toplu taşıma cazip hale getirilebilecektir.

Anahtar Kelimeler: Performansa dayalı sözleşme, ANFIS, özel toplu taşıma ödeme modeli, anahtar performans göstergeleri, AHP.

ABSTRACT

Developing a Performance-Based Payment Model in Urban Public Transport Systems

In Turkey, public transportation systems are operated mainly on three types: Only public operations, only private operations, and mixed types (both public and private operators). As a result of privatization used in the last two types, free or discounted transportation of privileged passengers (Over 65 years old, disabled, students, etc.), cause continuously increasing operating costs. Although subsidies to transportation companies by central and local governments have come to the agenda, different practices are carried out. There is no standard for evaluating performance criteria and improving travel service quality in order to reduce costs of private operators, increase their efficiency and improve service quality. In this study, the performance criteria and payment principles that have to be evaluated within the scope of the contracts to be executed by various methods for the operation of private-public transportation companies in the public transportation system have been handled. Based on this, It has been aimed to establish a performance-based payment model in the sample transportation system. For this, the contract and payment models applied in the literature were evaluated, a mathematical model was established for a performance-based payment model. Cost assessment was made by using the previous period data of the private-public transportation company, which was sampled by using the ANFIS (Adaptive Neural-Fuzzy Inference Systems) method. The payment model coefficients were created by determining the weights of the determined performance criteria with AHP (Analytic Hierarchy Process) method. A simulation study was conducted to compare the proposed performance-based payment model and the applied model. As a result; it is seen that the income-expense ratio of private operators gives better results in the proposed model.

Keywords: Performance based contract, ANFIS, public transportation payment model, key performance indicators, AHP.

1. GİRİŞ

İçinde özel toplu taşıma işletmelerinin bulunduğu kentiçi toplu taşıma sistemlerinde, idareler maliyetin düşürülmesi, sefer sayılarının (taşıt/km) artırılarak hizmet kalitesinin iyileştirilmesini isterken, hizmeti sunan özel toplu taşıma kuruluşları maliyetlerini düşürerek gelirlerini artırmayı, toplu taşıma hizmetinin kullanıcıları olan yolcu ise konforun, hizmet kalitesinin artmasını ve bilet ücretinin düşük olmasını bekler. Özel taşımacıların bulunduğu toplu taşıma sisteminde tarafların beklentilerini dengelemek için günümüz koşullarında sübvansiyonlar kaçınılmaz hale gelmiştir. Özellikle Türkiye’de kentiçi toplu taşıma hizmeti veren özel toplu taşıma araçları, yasa gereği engelli ve 65 yaş üstü bireylerin ücretsiz taşınma zorunluluğu dolayısıyla devlet desteğine rağmen, nüfus yapısına bağlı olarak belirli oranlarda gelir kayıpları yaşamaktadırlar. Artan yakıt, vergi, sigorta, sürücü vb, masraflar sebebiyle, özel taşıma işletmeleri sürekli olarak yerel yönetimlere bilet ücretlerinin artırılması yönünde

baskı uygulamaktadır. Bu sebeple, devlet desteğinin yanında yerel yönetimler de verdikleri hizmetler için tüketici ve üreticinin maliyetlerini düşürmek, hizmet kalitesini ve cazibesini artırmak amacıyla doğrudan veya dolaylı olarak özel toplu taşıma kuruluşlarına çeşitli sübvansiyonlar yapmaktadır.

Toplu taşıma maliyetleri ve sübvansiyonlara ilişkin literatürde farklı yöntemlerle pek çok çalışma yapılmıştır. Örneğin; Pucher vd.(1983), sübvansiyonların toplu taşıma maliyetlerine etkilerini çoklu regresyon analizi yöntemi ile incelemiş, toplu taşıma sistemlerinin verimliliğinin geliştirilmesine yönelik öneriler getirmiştir [1]. Tisato (2000), ekonomik kazanç için maksimizasyon modelini oluştururken, tüketici kazancı ile üretici kazancının artırılmasından yola çıkmıştır. Yükleme faktörü ile otobüs sayısının değişken veya sabit olduğu 4 durum için ayrı ayrı maliyet değerlendirmesi yapmıştır [2]. Small ve Verhoef (2007), toplu taşıma maliyet hesabı için çoklu doğrusal regresyon modeli oluşturmuştur. Güzergah uzunluğu, araç-saat ve araç-km vb. parametreleri kullanarak toplu taşıma işleticilerinin maliyetlerini incelemiştir [3]. Parry ve Small (2009), yolcu km başına optimum ücret sübvansiyonunun hesaplandığı analitik bir model oluşturmuştur. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre mevcut sübvansiyonların verimliliği desteklediğini ifade etmiştir [4]. Mattson ve Ripplinger (2012), küçük kentleşmiş bölgelerde toplu taşıma operasyonlarının iç ve dış maliyetlerini ölçmek, marjinal maliyet fiyatlandırmasını sürdürmek için gereken sübvansiyonu tahmin etmiştir. Uzun vadeli maliyet fonksiyonunda, küçük kentsel topluluklara hizmet veren toplu taşıma kuruluşlarının ekonomik yapısını belirlemek için görünüşte ilgisiz regresyon (SUR) yöntemi kullanılmıştır [5]. Mouwen ve Ommeren (2016), hem işletme maliyetlerinin hem de sübvansiyonun hesaplandığı logaritmik bir fonksiyon denklemi oluşturmuştur. Çalışmada, uzun vadeli toplu taşıma sözleşmeleri için sözleşme yenilemeleri ve rekabetçi ihalelin yolculuk, işletme maliyetleri ve sübvansiyonları ne ölçüde etkilediği incelenmiştir [6]. Ševrović vd.(2015), sübvansiyon dağıtım modeli önerisinde, yerel otoriteler tarafından sağlanacak sübvansiyonlardaki taşımacının bireysel paylarının tanımlanmasını amaçlamıştır. Çalışmada, bu payların fiilen yapılan işleri dikkate alarak, ilgili hatların fiili giderlerini yansıtmaya çalışılmıştır. Sübvansiyon endeksi, toplu taşıma hat sıklığı ve önem katsayısı, toplu taşıma hattındaki sübvansiyon payı hesabı için analitik formüller geliştirilmiştir [7].

Toplu taşıma sözleşmeleri ve ödeme modelleri üzerine literatürdeki az sayıdaki çalışmadan Gautier ve Yvrande-Billon (2013), stokastik maliyet sınır analizi ile dinamik bir teşvik düzenleme modeli oluşturmuşlardır. Her bir ağ operatörü ve her bir dönem için translogaritmik maliyet fonksiyonu oluşturulmuştur. Sözleşmenin türüne (maliyet artı, brüt maliyet veya net maliyet sözleşmesi) bağlı olarak, sözleşme süresi boyunca hem maliyeti düşürme düzeyini hem de yeniden maliyetlerin dağıtılması gösterilmiştir. Çalışma sonucunda, brüt maliyet sözleşmesinin maliyet minimizasyonu için en güçlü teşvikleri sağlayan sözleşme formu olduğu, öte yandan efektif bir rekabet ile birleştirilmiş bir maliyet artı modelinin, maliyet tarafında iyi sonuçlar verdiği tespit edilmiştir [8]. Hensher vd. (2012), basitleştirilmiş performansla bağlı bir ödeme (SPLP) modeli önermişlerdir. Modelde, maliyet verimliliği ve ağ etkinliğinin bir birleşimi olarak yolcu başına maliyet hesabı kullanılmıştır. İşletmeciler ile yapılacak sözleşmeler kapsamında; işletmeciler tarafından yapılacak tekliflerin ya yolcu başına dolar sübvansiyonu ya da kilometre başına dolar sübvansiyonu şeklinde olması gerektiği, bu iki değer in idare açısından parasal değer ölçüsü olacağı belirtilmiştir [9]. Canitez vd. (2019), yolcuların, işletmecilerin ve ulaşım otoritesinin beklentilerini modelleyerek İstanbul Halk Otobüsü işletmecileri için optimum ödeme modeli

önermiştir. Ticari ödeme, brüt maliyet ve performansa dayalı brüt maliyet ödeme modelleri, İstanbul bağlamındaki hizmet kalitesi sorunları nedeniyle net maliyet modeli yerine dikkate alınması gereken alternatifler olarak değerlendirilmiştir. Çalışmada doğrusal olmayan bir matematiksel programlama modeli kullanılmış, 3 farklı matematiksel model için amaç fonksiyonu ve kısıtlar belirlenmiş ve ayrı ayrı hesaplamalar yapılmıştır. Model sonuçlarına göre, İstanbul için performansa dayalı brüt maliyet ödeme modeli önerilmiştir [10].

Rekabetçi ihale veya Anlaşmalı Sözleşme türlerinden herhangi biri ile tedarik edilen ve özel işletmecilere yapılan ödemenin temeli ödeme modelidir. Bu ödeme modeli işletmecinin sözleşmenin ömrü boyunca nasıl davranacağını belirleyecektir. Literatürde yer alan temel ödeme modelleri; Brüt Maliyet Sözleşmeleri, Net Maliyet Sözleşmeleri, Brüt Maliyet+Destek Teşvik Sözleşmeleri, Ticari Ücret Sözleşmeleri, Brüt Maliyet+Destek Hizmet Teşvik Sözleşmeleri, Brüt Maliyet+Ekonomik Tabanlı Destek Teşvik Sözleşmeleri, Yönetim sözleşmesi (Maliyet-artı sözleşmesi) ve Basitleştirilmiş performansa bağlı bir ödeme (SPLP) modelidir. Türkiye’de en çok kullanılan temel ödeme modellerinden Net Maliyet Modeli; minimum destek olarak da bilinir. Hem üretim hem de gelir riski işletmeci tarafından karşılanır. Beklenen toplam işletme maliyetleri ve gelirler arasındaki fark, yerel idarenin işletmeciye ödediği fiyatı belirler. Maliyetler ve gelirler arasındaki beklenen fark ile gerçekleşen farkın karşılık gelmediği maliyetlerin sorumluluğu işletmeci tarafından üstlenilir [11]. Brüt maliyet sözleşmelerinde ise üretim riski işletmeci tarafından üstlenilirken, gelir riski idare sorumluluğundadır. İşletmecilere, sabit miktarda hizmetin üretimi için mutabık kalınan bir bedel ödenir. Gelirler yerel idareye tahakkuk eder. Gerçekleşen üretim maliyetleri ile beklenen üretim maliyetleri arasındaki fark, işletmecinin sorumluluğundadır. Ticari ücret sözleşmeleri; yolcu başına ortalama maliyet ve genellikle minimum hizmet seviyesine bağlı düzenleyici onaylı sözleşmelerdir [12]. Yönetim sözleşmesi, net maliyet sözleşmesinin tersidir. Yönetim sözleşmesinde hem üretim hem de gelir riskleri işletmeci yerine yerel idare tarafından karşılanmaktadır. Yerel yönetim ulaşım gelirlerini toplamakta ve işletmecilerin üretim maliyetini önceden belirlenmiş bir oranda artırarak tamamen geri ödemektedir. Kâr, gerçekleşen gelir ve maliyetlerden bağımsız olduğu için, bu sözleşme işletmeciler için risksizdir [8]. Günümüzde en çok kullanılan sözleşme modeli kalite ve performans kriterlerine göre ödül/ceza sisteminin uygulandığı kalite teşvikli brüt maliyet sözleşmeleri ve performansa dayalı sözleşmelerdir. Brüt sözleşmelerin net sözleşmelere göre bazı avantajları vardır. Brüt maliyet sözleşmeleri, entegre ücretlerin uygulanmasını kolaylaştırmaktadır. Çünkü işletmeciler ve ulaşım modları arasında gelir tahsis etme ihtiyacı ortadan kalkar. Net maliyet sözleşmelerinde, genel olarak işletmeciler desteğin büyümesi için daha büyük bir avantaja sahiptir. Çünkü işletmeciler bilet ücreti gelirini ellerinde tutarak, yolcu sayısının artması durumunda gelirlerini de artırmış olurlar. İşletmeci açısından en risksiz olan yönetim sözleşmesi maliyetlerin sürekli artış gösterdiği ekonomilerde önemli hale gelmektedir. Çünkü gelir kaybı yaşayan işletmeciler idareye desteğin artması yönünde baskı uygulayacaktır. Bu sebeple çalışmada hizmet kalitesinin artırılması için yönetim sözleşmesine ilave olarak ödül/ceza sistemi ile desteklenen bir model önerilmiştir.

Literatürde toplu taşıma sistemlerinde performans ölçümleri, hizmet standartları ve ölçüm teknikleri ile anahtar performans göstergeleri (APG) üzerine pek çok çalışma bulunmaktadır. Fielding vd. (1978) çalışmalarında, 3’ü verimlilik (araç başına araç-saat geliri vb.), 4’ü etkinlik (araç başı toplam yolcu vb.) ve 2’si tüm ölçümler (yolcu geliri başına işletme gideri vb.) olmak üzere 3 ana kategori altında toplam 9 adet performans ölçümü belirleyerek bunları California’da 46 toplu taşıma kuruluşuna uygulamıştır [13]. Attanucci vd. (1979), toplu

taşıma hizmet performansı göstergelerini güzergah bazında değerlendirmek için kullanılan kriterleri tespit etmek üzere, hizmet tasarımı, işletme performansı ve verimlilik altında 21 adet performans göstergesi tanımlanmıştır. Çalışmada en sık kullanılan gösterge tanımı zamanlama uyumu (0-5 dk gecikme), gelir/maliyet karşılama oranı ve km başına yolcudur [14]. Harris County Metropolitan İdaresi ve UMTA (1984), performans göstergelerini kategorize etmiş ve toplu taşıma kurumları tarafından geliştirilen kriterlerin özetini sunmuştur. Çalışmada sunulan 21 adet göstergeden öne çıkanları; yolcu güvenliği, sefer kaybı ve müşteri şikayetleri, yolcu başına maliyet göstergeleridir [15]. Nakanishi (1997), NYCT (New York şehri taşımacılığı)'nin OTP (On Time Performance-zamanlama performansı) ve servis düzenliliğini içeren otobüs performans göstergelerini açıklamıştır. Ayrıca çalışmada, zaman tarifesine dayalı olmayan göstergeler önerilmektedir [16]. Randall vd.(2006), 6 adet performans ölçütünden ve öznelik gruplarından oluşan APG Sistemine, otobüs kıyaslama için “Emniyet ve Güvenlik” ile bağımsız bir APG olarak “Çevre” ölçütünü dahil etmişlerdir. Ayrıca çalışmada araç büyüklüklerindeki farklılıkların performans ölçümlerini etkileyebildiği, araç başına yolcu sayısı ve yakıt tüketimi dikkate alındığında ölçümler farklı çıkabildiğini belirterek Kapasite Normalizasyonu kavramı getirilmiştir [17]. Son olarak Türkiye’de yapılan bir çalışmada, Kocaman vd. (2011), 16 adet performans göstergesini 5 ana başlık altında toplamışlardır. Çalışmada, kapasite kullanımı, hizmet sıklığı, seyahat süresi verimliliği, hız limitini aşan otobüs sayısı vb. değerlendirme kriterleri önerilmiştir [18]. Literatürde tespit edilen anahtar performans göstergeleri değerlendirilmiş, çoğunlukla ele alınmış olan kriterler belirlenmiştir. Bu kriterlerden, çalışmada örnek alınan toplu taşıma sisteminde erişilebilir, ve takip edilebilir nitelikte olan 6 adet performans kriteri seçilmiştir.

Literatürdeki tespit edilen çalışmaların çoğunda, sübvansiyonları ve toplu taşıma işletmelerinin maliyetlerini etkileyen etmenler analiz edilmiş, bazıları ise ödeme modellerinin etkinliği test edilmiş, modeller birbirleri ile karşılaştırılmıştır. İncelenen çalışmalarda, özel taşımacılara sübvansiyonun veya ödemelerin nasıl yapılacağına ilişkin araç bazlı ödemeye yönelik bir model örneği tespit edilmemiştir. Yapılan çalışmada, hem işletmecilerin değişken maliyetlerinin bir sezgisel algoritma yardımıyla hesaplanması hem de performans ödemelerinde dikkate alınacak performans kriterlerinin literatürdeki Anahtar Performans Göstergeleri (APG) dikkate alınarak zenginleştirilmesi, ödemeye yönelik bir matematiksel model oluşturulması amaçlanmıştır. Bu amaçla, ANFIS yöntemi kullanılarak özel toplu taşıma işletmesinin değişken maliyetleri değerlendirilmiş ve km başı maliyet hesabı yapılmıştır. Çalışmada belirlenen performans kriterlerinin ağırlıkları AHP (Analitik Hiyerarşi Süreci) yöntemi kullanılarak belirlenmiş, ödeme modelinin kalibrasyonu yapılmıştır. Yapılan simülasyonlar ile önerilen performansa dayalı ödeme modelinin sonuçları yolcu bazlı modelin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. ÇALIŞMADA KULLANILAN YÖNTEM

Önerilen model özel toplu taşıma araçlarının maliyetlerine ilave olarak performansları dikkate alınarak belirli oranda yapılacak ek ödeme esasına dayanmaktadır. Çalışmada izlenen yönteme ilişkin hazırlanan akış şeması Şekil 1’de verilmiştir.

Kullanıcı Arayüzü aracılığıyla kullanıma sunulmuştur [20]. Yöntem, ulaşım desteği [21], rota planlaması [22] ve otobüs hizmet kalitesi tahmini [23] gibi ulaşım konularında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Literatürde toplu taşıma maliyet ve sübvansiyon hesaplamalarında genellikle matematiksel ve istatistiksel modellerin kullanıldığı, sezgisel algoritma kullanımının sınırlı olduğu tespit edilmiştir. ANFİS yöntemi, modern yöntemler arasında tahmin konusunda başarılı sonuçlar vermesi nedeniyle tercih edilen bir yöntem haline gelmiştir. Özellikle, girilen veriler ile kendi oluşturduğu kurallar çerçevesinde öğrenme yapabildiği gibi eğer-ise dilsel ifadeleri yardımıyla da uzman kişiler tarafından yeni kurallar da eklenebildiği için esnek ve dışarıdan müdahaleye açık bir yapıya sahiptir. Çalışmada, km başı değişken maliyet hesabının bir minimizasyon veya maksimizasyon problemi olmaması, kullanılan bazı verilerin sözel ifadelerden oluşması, veri gruplarının büyüklüklerinin birbirlerinden farklı olması, doğrusal olmayan bir problem yapısının bulunması sebepleriyle sezgisel algoritma ve bulanık mantık kullanılması yöntemi tercih edilmiştir. Bu özelliklerine uygun olarak çalışmada da ANFİS yöntemi, önceki dönemlere ait gerçek veriler yardımıyla en uygun maliyetin tahmininde kullanılmıştır. Aynı zamanda, güzergahın eğim durumu, trafik durumu gibi sözel veriler de ilave edilerek yeni kurallar eklenmiştir. ANFİS modeli ile regresyon analizi hata oranları literatürde yer alan 3 farklı istatistiksel hata testi (MSE, RMSE ve MAPE) hesaplanarak değerlendirilmiş, ANFİS modelinin daha düşük hata oranlarına sahip olduğu tespit edilmiştir. Çalışma kapsamında yapılan ön analizlerde YSA (Yapay Sinir Ağları) ve benzeri algoritmalar da denenmiş, neticede ANFİS metodunun daha anlamlı sonuçlar verdiği değerlendirilerek, çalışmada kullanılmasına karar verilmiştir.

AHP yöntemi, çok kriterli karar süreçlerindeki karışıklığı gidermek için önerilen bir karar verme tekniğidir. Literatürde özellikle toplu ulaşım; otobüs hizmet sunumu kalite analizi [24], toplu taşımada optimum bilet ücreti belirleme [25] ve toplu taşımada operasyonel verimlilik ve hizmet kalitesi analizi [26] vb. birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır.

Hizmet kalitesinin artırılması ve yolcu memnuniyetinin sağlanması amacıyla araçların performanslarına göre ödenecek ilave performans bedelinin tayin edilebilmesi için çalışma kapsamında uygun görülen ve ölçülebilir performans kriterleri belirlenmiştir. Kriterlerin önem derecelerinin belirlenebilmesi için, her bir kriterin diğerine göre öneminin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu sebeple çalışmada, kriterlerin ikili karşılaştırmalarının yapılması amacıyla Analitik Hiyerarşik Süreç (AHP) tekniğinin kullanılmasına karar verilmiştir. Modelde performans kriter katsayısı olarak kullanılan ağırlıkların belirlenmesi için 3 farklı uzman grubuna anketler yapılmış, elde edilen anket verileri AHP kullanılarak değerlendirilmiş ve tespit edilen kriter ağırlıkları ödeme modeline işlenmiştir.

2.2. Ödeme Model Yapısı

Önerilen ödeme modeli; maliyet ve performans temelinde iki aşamadan oluşmaktadır. Birincisi; toplu taşıma işletmelerinin sabit ve değişken maliyetlerinin hesaplanması, ikincisi ise Performans kriterlerinin değerlendirilmesi ve katsayılarının hesaplanmasıdır. İlk bölümde toplu taşıma araçlarının mevcut maliyet kalemlerinin belirlenmesi ve araçların güncel maliyet tablosunun oluşturulabilmesi için, örnek özel otobüs işletmelerinin maliyet tabloları değerlendirilmiş, tüm maliyet kalemlerinin dahil edildiği bir doğrusal model yapısı oluşturulmuştur.

$$H_i = (SM_i + KM_i * DM) * KN_i + P_i - C_i \quad (1)$$

Model denkleminde “H” hakediş bedeli olup, araç bazlı ödemeyi temsil etmektedir. “SM”, araçların belirli süreler çalışmasa dahi ödemek zorunda oldukları (şoför, vergi, muayene, muhasebe, hat bedeli, oda aidatı, amortisman vb) sabit giderleri, “DM”, araçların çalışmalarına bağlı (yakıt, bakım, yıkama vb) giderleri ifade etmektedir. “KM”, her bir aracın katettiği aylık km’yi gösterirken, “P” ise, araçların verdiği hizmetin kalitesine (taşıdıkları km başına yolcu sayısı, dakiklik, yolcu memnuniyeti, güvenlik, çevre duyarlılığı vb.) bağlı olarak ödenmesi beklenen performans bedelidir. “KN”, sistemde farklı cinslerde araç bulunması durumunda hesaplanacak kapasite normalizasyon değerini, “C” ise araçların dönem içinde aldıkları cezaları sembolize etmektedir.

Kentiçi özel lastik tekerlekli toplu taşıma araçlarının tüm sabit giderleri değerlendirilerek oluşturulan sabit maliyet “SM” formülü aşağıda verilmiştir.

$$SM_i = \sum_{i=1}^n \zeta_i + A_i + VK_i + VB_i + ST_i + SK_i + M_i + AD_i + AO_i + MH_i \quad (2)$$

Denklemden; “ ζ ” araçlarda çalışan şoförlerin aylık maaş ve sigorta bedelleri toplamını, “A” araç bedelinin kullanım ömrü boyunca aylık maliyeti olan amortisman bedelini, “VK” Katma Değer vergisini (KDV), “VB” Motorlu Taşıtlar vergisini (bandrol), “ST” trafik sigortasını, “SK” ise araç KASKO bedelini ifade etmektedir. “M” yıllık araç muayene bedelini gösterirken, “AO” ve “AD” Oda ve Belediye hat bedeli aidatlarını göstermektedir. “MH” ise muhasebe giderlerini belirtmektedir. Sabit maliyetler, araçların cinslerine ve yaşlarına göre değişkenlik gösterebilmekle birlikte, homojen filolarda ortak bir değer de hesaplanabilir.

Değişken maliyetler ise, araçların çalışma durumuna bağlıdır. En önemli maliyet kalemi olan yakıt maliyeti katedilen mesafeye bağlı olduğu için km başı bir değişken maliyet hesabı yapılması uygun bulunmuştur. Değişken maliyetler içerisinde yer alan yakıt, bakım, lastik değişimi, vb. maliyetler, araçların ay boyunca çalıştıkları hatların durak sayısı, eğim durumu, yolcu sayısı, trafik durumu, sefer dışı boş km. vb. özelliklerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu sebeple araçların çalıştıkları güzergah özelliklerine göre farklı birim maliyetler ortaya çıkmaktadır. Örneğin; eğimsiz, seyrek durak aralığına sahip ve merkeze uğramayan transit bir güzergah ile kent merkezine giren, sık durak aralıklarına sahip, yüksek yolcu potansiyeli bulunan bir güzergahın işletme maliyetleri birbirinden farklıdır. Bu durumda, farklı güzergahlarda çalışan işletmecilere eşit değişken maliyet hesabı yapılması doğru olmamaktadır. Özel taşıma işletmelerinin birden çok ve farklı özelliklere sahip güzergahlarda, karma çalışması durumunda da karmaşık bir yapı ortaya çıkmakta, maliyet değerlendirmesi için matematiksel bir hesaplama modeli ile yaklaşım mümkün olamamaktadır. Bunun için öncelikle değişken maliyetleri doğrudan veya dolaylı olarak etkileyen, modele dahil edilecek değişkenler belirlenmiş, aşağıdaki denklem elde edilmiştir.

$$DM = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \frac{YB_i + BS_i + BY_i + BL_i + BA_i + BK_i}{KM_i} * \omega_i(KM, HEP, YS) \quad (3)$$

Denklemden; “KM” araç başı aylık yapılan kilometreyi, “YB” araçların yaptığı kilometre karşılığında kullanılan yakıt bedelini, “BS” bakım ve sanayi giderini, “BY” araç yıkama bedelini, “BL” lastik bakım, yenileme giderini, “BA” akü bakım veya değiştirme giderini ifade etmektedir. “ ω ” sembolü ile gösterilen değişken maliyet katsayısı ise ANFİS yöntemi

ile hesaplanacak olan model tarafından oluşturulan düzeltme katsayısıdır. ANFİS modelinde, yukarıda bahsedilen değişken maliyetleri dolaylı olarak etkileyen model girdileri olarak “HEP” hat efor puanı, “KM” aylık km ve “YS” yolcu sayısı girdileri kullanılmıştır.

Performans ödemesi, araçların verdiği hizmetin kalitesine bağlı olarak ödenmesi beklenen bedeldir. Giriş bölümünde anahtar performans göstergeleri (APG) olarak bahsedilen, toplu taşıma sistemlerinde literatürde tespit edilen performans kriterleri değerlendirilmiş, araçların hizmet kalitesini doğrudan etkileyebilecek, ölçülebilir ve takip edilebilir 6 adet performans kriteri belirlenmiştir. Burada amaç; toplu taşıma sisteminin veya işletmelerin performans değerlendirmesinden ziyade araçların performanslarının ölçülmesi ve buna bağlı olarak ödüllendirilmesidir. Toplu taşıma araçlarının taşıdıkları km başına yolcu sayısı her türde (ücretsiz, indirimli vb.) yolcunun azami şekilde taşınmasını desteklerken, dakiklik araçların zaman tarifesine uyumunu ve sisteme güvenilirliği sağlamayı, yolcu yükü araçların belirli doluluk oranlarını aşmadan seyahat kalitesini artırmayı, yolcu memnuniyeti sürücü davranışlarını düzeltmeyi ve hizmet kalitesini artırmayı, güvenlik yolcuların sağlıklı ve huzurlu seyahat etmesini sağlamayı, çevre duyarlılığı ise toplu taşıma sistemindeki araçların çevre dostu araçlara dönüşmesini desteklemeyi amaçlamaktadır. Bu doğrultuda belirlenen performans kriterleri ile aşağıdaki performans ödemesi denklemi oluşturulmuştur.

$$P_i = \sum_{i=1}^n \beta_1 * VK_i + \beta_2 * DK_i + \beta_3 * YK_i + \beta_4 * \text{ÇK}_i + \beta_5 * GK_i + \beta_6 * MK_i \quad (4)$$

Denklemden; “VK” verimlilik (yolcu/km) kriterini, “DK” dakiklik kriterini, “YK” yolcu yükü (doluluk) kriterini, “ÇK” çevre kriterini, “GK” yolcu güvenliği kriterini, “MK” ise yolcu memnuniyeti kriterini ifade etmektedir. “β1...6” değerleri, değerlendirilen performans kriterlerinin önem derecelerini göstermekte olup, kriterlerin önem dereceleri toplu taşıma karar vericileri uzman grupları ile yapılan anketlerin AHP yöntemi ile değerlendirilmesiyle belirlenmiştir.

$$P_{max} = (SM + DM * MHS) * \%P_o \quad (5)$$

Bir aracın tüm performans kriterlerinden tam puan alması kaydıyla elde edebileceği azami tutar (P_{max}) olacaktır. P_{max} değeri, maliyet toplamalarının sözleşme kapsamında belirlenecek performans oranı (P_o) ile çarpılması ile tespit edilir. Oluşturulan Performans denkleminde “MHS” araçların aylık bazda görevlendirileceği asgari hizmet seviyesini (aylık km) ifade eder. Çalışmada bu değer örnek alınan toplu taşıma sisteminde önceki dönem çalışma verileri dikkate alınarak 7800 km/ay olarak alınmıştır. “ P_o ” değeri ise %10 olarak kabul edilmiştir.

Toplu taşıma sisteminde, araç cins/kapasite farklarının bulunması durumunda; sabit maliyetlerde araç amortismanı, vergi değerleri vb değerlerde farklılık olabileceği gibi, değişken maliyetlerde km yakıt bedeli, bakım maliyetlerinde de farklılıkların olması beklenmektedir. Performans kriterlerinde ise kapasiteye bağlı olarak yolcu/km ve doluluk kriterlerinin ayrı değerlendirilmesi gerekmiştir. Bu sebeple, değişken maliyetler toplamında ve performans kriterlerinin değerlendirilmesinde “Kapasite Normalizasyonu” yapılması uygun bulunmuştur. Yapılan literatür taramasında; kapasite normalizasyonundan bahsedilmekle birlikte, araç sınıflarının karşılaştırılacağı kriterler ve hesapta kullanılacak parametreler ile ilgili bir bilgi tespit edilememiştir. Literatürdeki bu eksiklik sebebiyle, farklı araç gruplarına adil bir gelir dağılımı sağlanabilmesi için önceki dönem verileri kullanılarak kapasite normalizasyonu hesabı için aşağıdaki formül oluşturulmuştur.

$$KN_i = \frac{\frac{1}{n} \sum_j^n C_j + (Y_j * B_i) + (KM_j * YT_i)}{\frac{1}{m} \sum_{ij}^m C_{ij} + (Y_{ij} * B_i) + (KM_{ij} * YT_i)} \quad (6)$$

Denklemden; “C” araç sınıfının yolcu kapasitelerini (outran+ayakta), “Y” araç sınıfındaki araçların (önceki dönemde) taşıdıkları yolcu sayılarını, “KM” katedilen km değerlerini, “YT” araç sınıfının ortalama km başı yakıt tüketim değerlerini göstermektedir. Eğer gelir havuzu içerisinde, araç cinsleri arasında taşınan yolcu ücretlerinde farklılıklar bulunuyorsa, farklı araç sınıflarının bilet ücretinin (B) de hesaba katılması gerekecektir. Son olarak; hakediş tutarını artırmaması için tüm araç sınıfları [0,1] aralığında normalize edilmesi gerekmektedir.

Çalışmada, yukarıda verilen denklemlerle, örnek alınan Antalya kent merkezi toplu taşıma sisteminde çalışan özel toplu taşıma işletmelerinden olan şirketin 56 adet aracının önceki dönem verilerinden örneklem alınarak en uygun aylık maliyetin çıkarılması ve buna göre almaları gereken toplam ödeme miktarının tayin edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada, aldıkları yakıt miktarı, sanayi, bakım giderleri, sigorta, vergi vb.düzenli veriler tutulan ve nispeten kurumsal bir yapıya sahip olan özel toplu taşıma şirketine ait 56 adet aracın verilerinin kullanılması tercih edilmiştir. Toplu taşıma sisteminde yer alan diğer özel toplu taşıma araçları otobüsçüler odasına bağlı olarak çalışan şahıs araçları olduğu ve bu araçlara ait veri elde etme imkanı bulunmadığı için çalışmada sadece şirket araçları dikkate alınmıştır. İlk olarak, 56 adet aracın aylık araç başı sabit maliyet hesabı yapılmış, sonrasında da araçların 2 aylık değişken maliyetleri ANFİS ile eğitilerek test edilmiş, modelden elde edilen yeni maliyet değerlerine göre km başı değişken maliyet değeri hesaplanmıştır. Devamında performans ödemesinin hesaplanabilmesi için performans kriterlerinin ağırlıkları AHP metodu ile belirlenmiştir. Son olarak; elde edilen değerler ile örnek şirket araçlarının önceki dönem verileri kullanılarak simülasyon yapılmış, önerilen model ile yolcu bazlı destekleme modelinin etkinliklerinin karşılaştırması yapılmıştır.

2.3. Çalışma Alanı ile İlgili Genel Bilgiler

Çalışma kapsamında çalışma alanı olarak hem özel hem de kamu işletmecilerinden oluşan toplu taşıma sistemine ve elektronik ücret toplama sistemine sahip Antalya ili seçilmiştir. Antalya ili, büyükşehir statüsünde olup, 2018 nüfus sayımına göre kent merkezi toplam 1,344,248 kişilik nüfusa sahiptir. Antalya Ulaşım Ana Planı (AUAP 2015) verilerine göre, Antalya ilindeki otomobil sahipliği oranı Türkiye ortalamasının üstündedir. Şekil 2’de gösterilen kent merkezi toplu taşıma sisteminde toplam yolculukların sadece %24,5’i toplu taşıma ile gerçekleşmektedir. Bu nedenle, toplu taşıma sisteminin cazip hale getirilmesi ve verimliliğinin artırılması için özellikle Antalya ili seçilmiştir.

Antalya Kent merkezi toplu taşıma sisteminde özel ve belediye araçlarından oluşan bir hat ve gelir havuzu ile çalışılmaktadır. Çizelge 1’de kent merkezi toplu taşıma sisteminde çalışan mevcut araç sayıları verilmiştir.

2018 yılından itibaren, minibüs cinsi araçlar ile ihale kapsamında çalışan 10 adet otobüs dışında diğer araçların tamamı hat-gelir havuzu içerisinde çalışmaktadır. 2018-2019 yılları arasında belediye meclis kararı kapsamında “km bazlı ve performansa dayalı bir ödeme modeli” ile ödemeler yapılmışken, 2019 Ekim ayından itibaren “Performansa dayalı yolcu başına destekleme modeli”ne geçilmiştir.



Şekil 2 - Antalya İli Kent Merkezi Toplu Taşıma Ağ Haritası

Çizelge 1 - Antalya Kent Merkezi 2019 Yılı Lastik Tekerlekli Toplu Taşıma Aracı Sayısı

Araç türü	Özel İşletme	Belediye
Minibüs	26	50
8,5 metre otobüs	0	41
12 metre otobüs	499	185
Toplam	525	276

Ülkemizde kentiçi toplu taşıma hizmeti veren özel toplu taşıma araçlarında, yasa gereği engelli ve 65 yaş üstü bireylerin ücretsiz taşınma zorunluluğu bulunmaktadır. Antalya ili emekli kesimin tercih ettiği bir yerleşim yeridir. Ayrıca buraya diğer illerden emekli olarak yerleşenlerin nüfus içinde oranı yıl geçtikçe artmaktadır. Bu sebeple, taşımacılara yapılan araç başı 1000 TL/ay (273.97\$) olan gelir desteği ödemesi yetersiz kalmaktadır. Antalya Kent Merkezi Toplu Taşıma Sisteminde toplam ücretsiz taşınan yolcu sayısının toplam yolcu sayısı içindeki payı yaklaşık %12 olup, gelir desteği ödemesi düşüldükten sonra ücretsiz taşınan yolculardan kaynaklı araç başı gelir kaybı aylık ortalama 3822 TL (1047,123 \$) bulunmaktadır. Ücretsiz taşınan yolcuların yanında öğrenci, emekli, öğretmen gibi indirimli taşınan yolcuların taşımacılara ortalama 5.221 TL (1.430,38\$2) araç başı maliyeti de eklendiğinde, taşımacıların ücretsiz ve indirimli yolcuları taşıma karşılığında üstlendikleri toplam gelir kaybı 9.043 TL (2.477,53 \$2) olarak hesaplanmaktadır. Görüleceği üzere, kentiçi özel toplu taşıma işletmeleri, işletme maliyetlerinin dışında gelir kayıpları da yaşamaları nedeniyle yeterli düzeyde bilet geliri elde edilemeyen toplu taşıma sistemlerinin sürekliliği için idareler tarafından gelir desteği yapılması veya özel taşımacıların maliyetlerini karşılayabilecek gelirin sağlanması zorunlu hale gelmektedir. Bu amaçla çalışmada, özel taşımacıların maliyetlerinin üstünde performanslarına bağlı olarak ek bir kazanç elde edecekleri bir ödeme modeli önerisi getirilmiştir.

2.4. ANFİS ile Değişken Maliyetlerin Değerlendirilmesi

Değişken maliyetler içerisinde yer alan yakıt, bakım, lastik değişimi, vb. maliyetler, araçların ay boyunca çalıştıkları hatların durak sayısı, eğim durumu, yolcu sayısı, trafik durumu, sefer dışı boş km. vb. özelliklerine bağlı olarak farklılık göstermektedir. Bu sebeple araçların çalıştıkları güzergah özelliklerine göre farklı birim maliyetler ortaya çıkmaktadır. Örneğin; eğimsiz, seyrek durak aralığına sahip ve merkeze uğramayan transit bir güzergah ile kent merkezine giren, sık durak aralıklarına sahip, yüksek yolcu potansiyeli bulunan bir güzergahın işletme maliyetleri birbirinden farklıdır. Bu sebeple öncelikle değişken maliyetleri doğrudan veya dolaylı olarak etkileyen, modele dahil edilecek değişkenler belirlenmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, toplam değişken maliyet değerini en çok etkileyen değişkenin yakıt bedeli olması, yakıt bedelinin de en önemli ölçüsünün katedilen km olması ve km başı maliyet hesabı yapılacak olması dolayısıyla öncelikle km girdisi ANFİS modeline eklenmiştir. Bunun dışında, dolaylı olarak yakıt ve bakım maliyetlerini etkileyen, araçların çalıştığı güzergahların özellikleri değerlendirilmiş ve 3 adet hat efor kriteri belirlenmiştir.

Durak Sayısı: Hat efor kriterlerinden Durak sayısı, araçların durma, kalkma sayısını artırması dolayısıyla yakıt maliyetini artırdığı için km başına durak sayısı olarak modele dahil edilmiştir.

Eğim durumu: Hattın güzergahı üzerinde arazi yapısından kaynaklı eğimli yolların varlığını ifade etmektedir. Hatlar Google Earth yükseklik profili verisi yardımıyla güzergah üzerindeki ortalama eğim değerlerine göre az, orta ve yüksek olarak 1-3 arasında puanlanmıştır. Puanlamada ortalama eğimin % 0-% 0,70 aralığında olduğu güzergahlar 1 puan, eğimin %0,80-% 1,3 aralığında olduğu güzergahlar 2 puan, eğimin % 1,4'den daha fazla olduğu güzergahlar ise 3 puan olarak sınıflandırılmıştır.

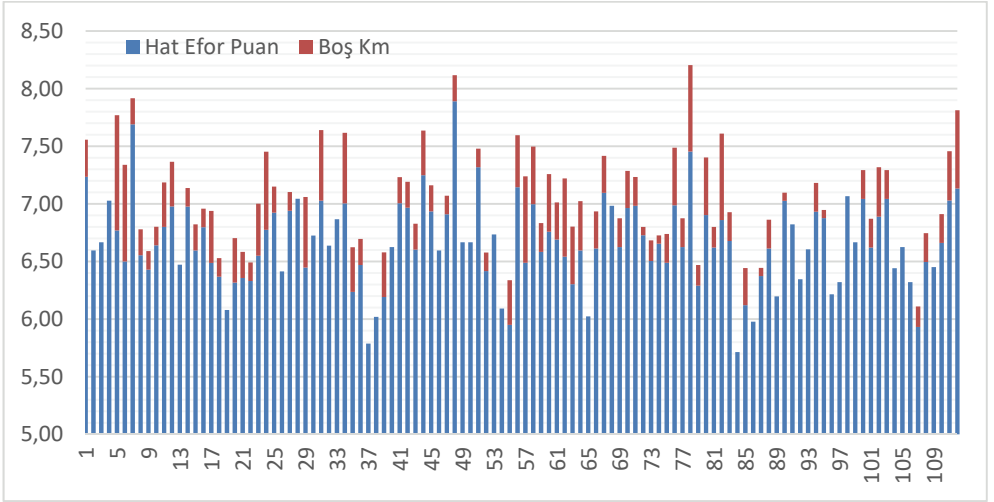
Trafik Durumu: Hattın güzergahının kent merkezine girmesi, trafik yoğunluğunun yüksek olduğu ana yollardan geçmesi veya trafik ışıklarının sayı ve süresi gibi farklı durumlara bağlı değişebilen ulaşım süresine göre hesaplanmıştır. Trafik durumu puanı, hattın zirve saatteki ulaşım süresinin güzergah uzunluğuna bölümünden elde edilen km başı sefer süresine göre az, orta ve yüksek trafik yoğunluğu olarak 1-3 arasında puanlanmıştır. Km başı sürenin 0-2,5 dakika arası 1 puan, 2,51-3 dakika arası 2 puan, 3,01-4 dakika arası 3 puan olarak sınıflandırma yapılmıştır.

Yapılan denemelerde, 56 adet araç verisinin ANFİS modeli için yeterli olmadığı tespit edilmiş, birbirine benzer özellikte iki aylık (Ocak, Şubat 2019) veri kullanılmış, toplam 112 veri seti ile çalışılmıştır. Araçların iki ay boyunca çalıştığı hatlara ait gün bazında hat efor katsayıları toplanmış ve hat efor puanı hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan 56 adet aracın çalıştıkları 9 adet güzergaha ait özellikler ve verilen hat efor katsayıları Çizelge 2'de verilmiştir.

Ayrıca çalışılan hatta ait tarifelerde boş km (başladığı yerde sonlanmayan çalışma tarifeleri dolayısıyla ilk sefere gitmek için katedilen mesafe) var ise 1 puan verilerek ay genelindeki gün bazında boş km puanı hesaplanmıştır. ANFİS'e girdi olarak kullanılan hat efor puanı ve boş km puanı daha sonra ANFİS'de girdi sayısının azaltılarak daha doğru sonuç alınmasını sağlamak adına birleştirilmiştir. Şekil-3'de 112 adet Hat Efor Puanı ve Boş Km Puanı verisinin grafiği verilmiştir.

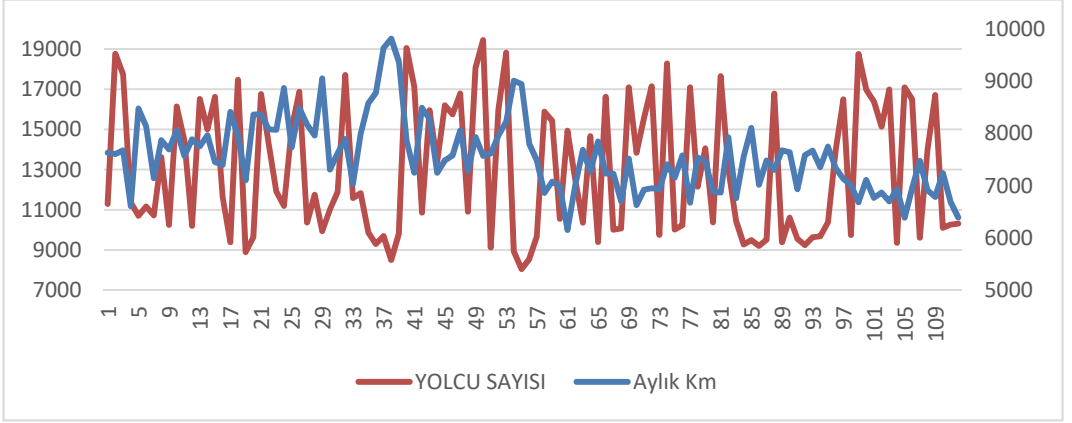
Çizelge 2 - Hat Efor Katsayıları Tablosu

Hattı	Hat Km	Durak Sayısı	Durak Sayısı/Km	Eğim Durumu	Trafik Durumu	HEK
CV39	21	61	2,90	2	2	6,90
FL82	53	168	3,17	3	2	8,17
KC06	51	136	2,67	1	3	6,67
KF52	48	120	2,50	3	1	6,50
LC07	62	154	2,48	1	3	6,48
MC58	44	129	2,93	3	1	6,93
TCS46	69	170	2,46	1	2	5,46
TCS46A	71	162	2,28	1	2	5,28
VC57	62	175	2,82	2	1	5,82



Şekil 3 - Hat Efor Puanı ve Boş Km Puanı Grafiği

Değişken maliyetleri etkileyen hat efor puanı dışında, doğrudan yakıt maliyeti ile ilişkili katedilen aylık km verisi ile yolcu sayısı verisi de modele girdi olarak eklenmiştir. Yolcu sayısı hem araçların taşıdıkları yükü ve dolayısıyla yakıt sarfiyatını etkilemesi, hem de duraklarda durma ve bekleme sürelerini etkilemesi dolayısıyla işletme maliyetleri ile kuvvetli ilişkili olarak değerlendirilmiştir. Veri seti eğitim ve test verisi olarak 2 kısma ayrılmıştır. Rastgele olarak veri serisinin %72'si olan 80 adet girdi eğitim verisi, kalan 32 adet girdi ise test verisi olarak ayrılmıştır. Girdi verileri; Aylık Km, Hat Efor Puanı ve Yolcu sayısı iken çıktı verisi Değişken Maliyet Toplamları/km'dir. Şekil-4'te 112 adet aracın Yolcu Sayısı ve Aylık Km verisinin grafiği verilmiştir. Verilerin cins ve birimlerinin farklı olması dolayısıyla tüm veriler 0-1 aralığındaki değerler ile normalize edilerek çalışılmıştır.



Şekil 4 - Yolcu Sayısı ve Aylık Km Grafiği

2.5. Performans Kriterleri Değerlendirmesi

Öncelikle elde edilebilen veriler ve literatürdeki örnekler dikkate alınarak, toplu taşıma sisteminde özel taşımacıların performanslarının ölçülebileceği performans kriterleri belirlenmiş ve belirlenen kriterler ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Çalışmada, örnek işletmeci grubunun 56 adet aracına ait Ocak 2019 verileri kullanılmıştır. Performans verilerin aylık olarak değişkenlik gösterebileceği ve ödemeye esas veriler olması gerektiği için, ödeme yapılacak aya ait olması gerekmektedir. Bunlar;

Verimlilik (Yolcu/km) Kriteri (VK): Toplu Taşıma araçlarının verimliliği yani km başına maliyeti karşılayacak oranlarda yolcu taşınması değerlendirilmiştir. Çalışmada, örnek alınan araçların aylık taşıdıkları yolcu sayıları ve toplam aylık km değerleri alınarak yolcu/km değeri hesaplanmıştır. Hesaplanan yolcu/km değerleri 0-1 aralığında normalize edilerek verimlilik katsayısı (VK) oluşturulmuştur.

Dakiklik Kriteri (DK): Literatürde toplu taşıma sisteminin güvenilirliği veya hizmet düzenliliği olarak da geçen bir kavramdır. Nakanishi (1997)'ye göre hizmet düzenliliği olarak geçen kriter ± 5 dk olarak tanımlanmış olup, araçların %50'sinden fazlasının bu sürele uyması beklenmektedir [16]. Zirve saatlerdeki trafik sıklığı, durak sayısının fazla

Çizelge 3 - Dakiklik Kriteri Skalası

Aylık Gecikilen Sefer Sayısı	Dakiklik Değeri (DK)
0-10	1
11-30	0.8
31-50	0.6
51-70	0.4
71-90	0.2
90-	0

olması, araç kalkış noktalarında (depolamalarda) araç bekleme sürelerinin yetersiz oluşu dolayısıyla bazı güzergah ve saatlerde gecikmeler artmaktadır. Literatürdeki hizmet düzenliliği ve güvenilirliğine ilişkin verilen ± 5 dk gecikme süresine uyularak, örnek alınan işletmeciler grubuna ait özel toplu taşıma araçlarının başlangıç-bitiş saatlerine ve duraklara erişimlerine bakılmış, planlanan süre ile gerçekleşen süreler arasındaki gecikme süreleri elde edilmiştir. Araçların aylık gecikilen sefer sayıları hesaplanarak örnek alınan 56 adet aracın aylık gecikme sayıları ile eşit aralıklı dakiklik skalası oluşturulmuştur. Performans ödemesinde dikkate alınan dakiklik değerleri skalası Çizelge 3’de verilmiştir.

Yolcu Yüğü (Doluluk) Kriteri (YK): Yolcu memnuniyeti ve araçlarda konforlu seyahat koşullarının sağlanmasında önemli öğelerden biri de araçlardaki doluluğun kontrolüdür. Bunun için, hem belirlenen kapasite üzerinde yolcu taşınmasının engellenerek yolcu konforunun sağlanması, hem de duraklarda bekleme süresinin düşürülmesi amaçlanmıştır. Çalışmada araç içerisindeki maksimum yolcu yükünün tespiti için binen-inen yolcuların da sayılabildiği Şekil 5’te gösterilen yolcu sayım cihazından faydalanılmıştır. Örnek alınan toplu taşıma sistemi için, yapılan gözlemler doğrultusunda konforlu yolculuk için algılanan doluluk, ayakta yolcu sayısının %70’i ile oturan yolcu sayısı toplamına (28+52) karşılık gelen 80 kişi olarak kabul edilmiştir. Puanlama için kullanılacak skala değeri olarak ise; doluluğun konfor sınırının altında kalması durumunda 1 puan, sınırı aşılması durumunda ise 0 puan olarak kabul edilmiştir.



(a)

(b)

Şekil 5 - (a) Yolcu Sayım Cihazı İşlemci, (b) Yolcu Sayım Cihazı Kızılötesi sensör

Çevre Kriteri (ÇK): Toplu taşıma araçlarının emisyon ve çevreye duyarlılığının değerlendirildiği bir kriterdir. Bunun için, AB Emisyon Standartları dikkate alınarak araçların motor tipi ve yaşına göre Çizelge 4’deki değerlendirme skalası oluşturulmuştur.

Çizelge 4 - Çevre Kriteri Skalası

Araç Yaşına Göre Motor Tipi	ÇK Puanı
EURO4 motor veya altı (2008 model altı)	0
EURO5 motor (2009-2013 model arası)	0.5
EURO6 motor (2014 model ve üstü)	1

Yol/yolcu güvenliği Kriteri (GK): Yol/yolcu güvenliği, toplu taşıma araçlarının trafik ve yolcu güvenliğini tehlikeye sokacak şekilde, izin verilen hız limitlerinin üstüne çıkılması ve aylık bazda karışıklı kaza sayılarını kapsamaktadır. Çalışmada, hız limitleri ile ilgili veri elde edilemediği için kaza ve sanayi kayıtlarından elde edilen kaza verileri kullanılmıştır. Aylık araç bazlı kaza sayılarına göre Çizelge 5’de verilen puan skalası oluşturulmuştur.

Çizelge 5 - Güvenlik Kriteri Skalası

Kaza Sayısı/ay	GK Puan
0 kaza/ay	1
1 kaza/ay	0,75
2 kaza/ay	0,5
3 kaza/ay	0,25
4- kaza/ay	0

Yolcu Memnuniyeti Kriteri (MK): Yolcu memnuniyetinin tespiti için farklı uygulamalar bulunmasına rağmen genellikle gizli müşteri (araca yolcu gibi binen idare görevlisi veya anketör) tespitleri, anketler ve çağrı merkezi kayıtlarından faydalanılabilmektedir. Çalışmada, çağrı merkezi kayıtları üzerinden çalışma yapılan şirket araçlarına ait cezaya dönüşen şikayet sayıları dikkate alınarak değerlendirme yapılmıştır. Aylık alınan ceza sayısına göre Çizelge 6’daki yolcu memnuniyet kriteri skalası oluşturulmuştur.

Çizelge 6 - Yolcu Memnuniyet Kriteri Skalası

Aylık Cezaya Dönüşen Şikayet Sayısı	Memnuniyet Kriteri (MK) Puanı
0	1
1-3	0,75
4-6	0,5
7-9	0,25
9-	0

Ceza Kesintisi (C): Toplu taşıma sistemi içerisinde çalışan işleticilere (özel veya kamu araçları) ait araçlara, çalışılan ay içerisinde yönetmelikler veya yaptırım cetveli kapsamında kesilen idari yaptırım cezaları ödenecek destek bedellerinden düşülür. Çalışmada da, çağrı merkezine gelen şikayetler veya denetimler neticesinde tespit edilen cezalar aylık hakediş bedellerinden kesilmiştir.

2.6. Performans Kriterlerinin Önem Derecelerinin AHP ile belirlenmesi

Performans Kriterleri”nin ödeme sistemi kapsamında dağıtımının yapılmasında kullanılmak üzere ağırlıklarının, yani dağıtım katsayılarının belirlenebilmesi için AHP (Analitik Hiyerarşik Süreç) yöntemine uygun, kriterlerin ikili karşılaştırmalarına dayanan bir anket düzenlenmiştir. Çevrimiçi olarak düzenlenen anket formu EK-1’de verilmiştir. Yerel yönetimlerde, özellikle ulaşım birimlerinde görev yapan karar vericiler ve uzman personel,

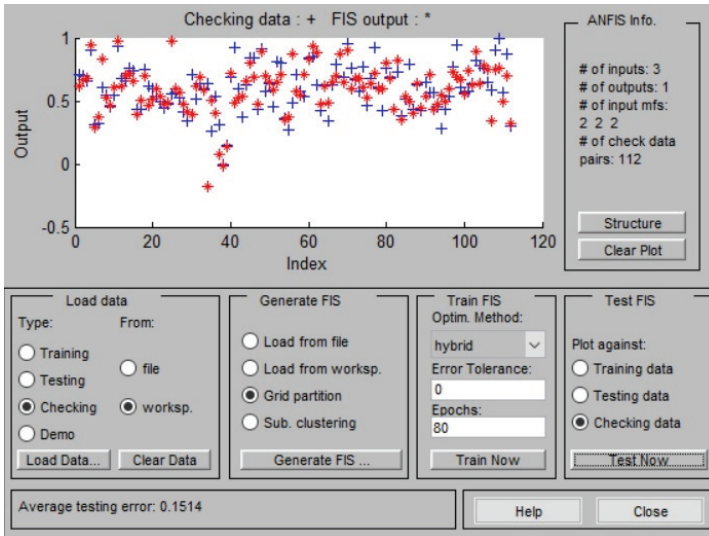
ulaşım ve ilgili konularda uzmanlaşmış akademisyenler ile işletmeci grubu (özel ve kamu adına belediye iştirakleri) ile toplam 40 adet anket yapılmıştır. Anket grupları idare (belediye), işletmeci ve akademik olarak 3'e bölünmüş, her bir anket grubu önce kendi grubu içinde, daha sonra toplu olarak değerlendirilmiştir. Performans kriterlerinin önem derecelerine ilişkin katılımcı yargıları alınmış ve veriler excel altında çalışan Goepel (2018) tarafından hazırlanan AHP hesaplama makrosu ile değerlendirilmiştir [27]. Uzman gruplarının tek bir yargı matrisinde birleştirilmesi ve kriterlerin ağırlıklarına ilişkin ortak bir değerlendirme yapılması gerektiği için aşağıda verilen Mikhailov (2004)'un birleştirilmiş karar matrisi formülü kullanılmıştır [28]. Denklem 7'de görülen karar matrisi formülünde, 1–9 aralığında verilen her bir ikili karşılaştırma değerinin doğal logaritmasının (ln) toplamlarının ağırlık toplamlarına bölümü ile oluşturulan birleştirilmiş logaritmik matrisin üssü alınmış, birleştirilmiş grup yargı matrisi oluşturulmuştur. Her bir grubun birleştirilmiş yargı matrisleri de ayrı anketler gibi ele alınarak 3 grup için tekrar bir değerlendirme yapılmıştır.

$$c_{ij} = \exp \frac{\sum_{n=1}^N w_n \ln a_{ij(n)}}{\sum_{n=1}^N w_n} \quad (7)$$

3. ANALİZ VE BULGULAR

3.1. ANFİS Modelinin Kurulması ve Sonuçlarının Değerlendirilmesi

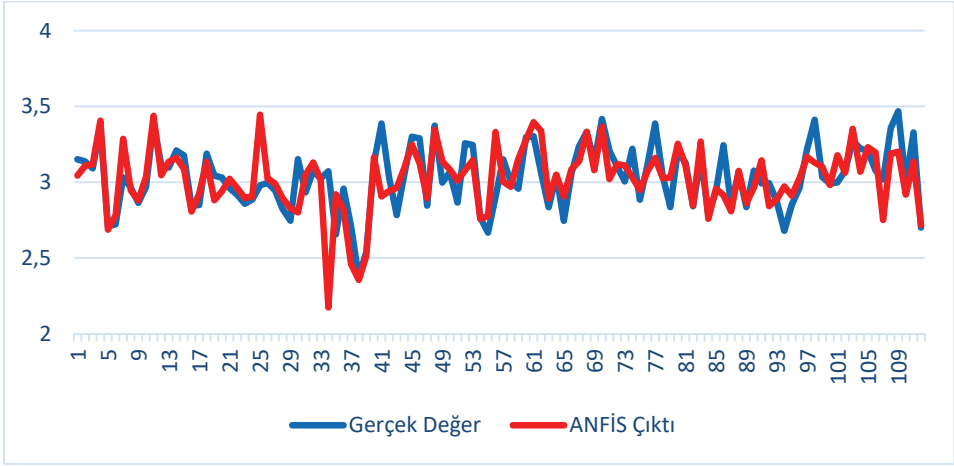
Değişken maliyetlerin değerlendirmesi amacıyla kurulan ANFİS modeli için, MATLAB ANFİS Editörü kullanılmış, her girdi için iki üyelik fonksiyonunun seçilerek, her bir üyelik fonksiyonu türü için 80 iterasyon eğitim yaptırılmıştır. Eğitim sonucunda çıktı fonksiyonunu en az hata ile açıklayan üyelik fonksiyonu yamuk üyelik fonksiyonu olup, hata oranı 0,0828 olarak bulunmuştur.



Şekil 6 - ANFİS Çıktı Verisi-Test Verisi Karşılaştırması

Eğitim işleminden sonra, ayrılan test verileri ile yapılan test işlemi sonucunda ortalama test hatasının (MSE) 0,1514 olduğu bulunmuştur. Şekil 6’da model çıktısı ile test verileri karşılaştırılması gösterilmektedir. Şekilde yıldız (*) sembolü ile gösterilenler ANFİS model çıktısı verisi iken mavi artı sembolü gerçek test verilerini göstermektedir.

Model sonucunda, Şekil 7’de verilen 112 adet eğitim ve test verisinin çıktı değerlerinden oluşan toplu taşıma ödeme sisteminin değişken maliyetlerinin model karşılıkları elde edilmiştir.



Şekil 7 - Gerçek Değer-ANFİS Modeli Sonuç Çıktıları Karşılaştırması

ANFİS model sonucunun elde edilmesinden sonra modelden değişken maliyet birim bedelinin elde edilebilmesi için arzu edilen model girdileri belirlenmiştir. Çizelge 7’de örnek toplu taşıma sisteminde özel işletmelerin çalışacağı minimum aylık hat km, çalışacakları hat gruplarının efor puanı ve aylık arzu edilen yolcu sayısı değerleri ve karşılığı olan ANFİS normalize değerleri verilmiştir. Gerçek değerler [0-1] aralığında lineer transformasyon yöntemiyle normalize edilmiştir.

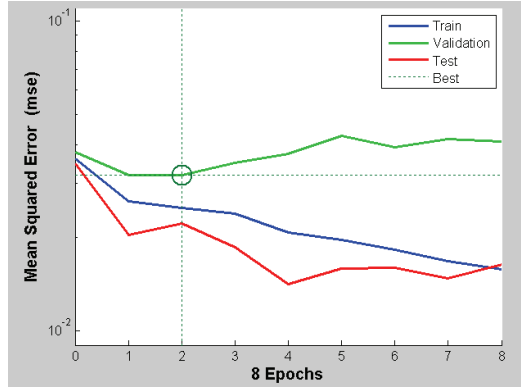
Çizelge 7 - ANFİS Model Girdileri Gerçek ve Normalize Değerleri

Girdi	Gerçek Değer	Normalize Değer	
X1	Aylık Km	7,800 km	0.45
X2	Hat Efor Puanı	6,72	0.48
X3	Yolcu Sayısı	13,050	0.439

Elde edilen sonuç değeri “ans=0.5069”, oluşturulan modele göre km başına değişken maliyet birim bedelinin normalize edilen karşılığını vermektedir. Gerçek değere dönüştürüldüğünde, model sonucu değişken maliyet değeri 2,927 TL/km olarak hesaplanmıştır.

Çalışmada, kurulan ANFİS Modelinin etkinliğinin test edilebilmesi için YSA (Yapay Sinir Ağları) yöntemi ve çoklu regresyon analizi de yapılarak elde edilen sonuçlar önce ANOVA testi ile sınanmış, sonra literatürde kullanılan 3 farklı istatistiksel yöntem ile karşılaştırılmıştır.

Çalışmada kullanılan girdi ve çıktı verileri MATLAB Yapay Sinir Ağları Editörü (nntool) ile 1000 iterasyon eğitilmiş, eğitim sonunda Çizelge 9’da verildiği gibi ortalama test hatasının (MSE) 0,030721 olduğu bulunmuştur.



Şekil 8 - YSA Modeli Test Hatası Grafiği

Çalışmada, doğrusal bir model kullanılması durumunda kurulan ANFİS modelinden daha iyi bir sonuç verip vermeyeceğinin karşılaştırılabilmesi için Denklem 8’de model denklemi verilen regresyon modeli kurulmuştur.

$$Y_{reg} = 0,0964945 * X_1 + 0,6899267 * X_2 + 0,4724878 * X_3 \quad (8)$$

Çizelge 8’de, değişken maliyet sayısal değişkeninin 3 farklı model grubu altında ANOVA testi ile karşılaştırılması için SPSS programında yapılan normallik testi sonuçları gösterilmiştir. Çalışmada herbir grup için veri sayısı 30’dan büyük olduğu için “Kolmogorov-Smirnov” testinin anlamlılık değerine bakılmıştır. Burada Regresyon ve YSA model sonuçları eşik değer olan %5 anlamlılık değerinden küçük ($p < 0,05$) olduğu için normal dağılıma sahip değildir. Bu sebeple ANOVA testi uygulanamamıştır.

Çizelge 8 - SPSS Kolmogorov-Smirnov ve Shapiro-Wilk Normallik Analizi Sonuçları

Model	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk			
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.	
DeğişkenMaliyet	Gercek Değer	.044	112	,200*	.989	112	.501
	ANFIS	.077	112	.095	.950	112	.000
	Regresyon	.106	112	.003	.947	112	.000
	YSA	.109	112	.002	.920	112	.000

Çizelge 9’da ise ANFİS modeli ile çoklu regresyon sonuçlarının karşılaştırma tablosu verilmiştir. Sonuçta ANFİS modelinin YSA ve regresyon analizine göre daha küçük hata oranlarına sahip olduğu görülmektedir.

Çizelge 9 - ANFİS-YSA-Regresyon Modelleri Hata Oranları Karşılaştırması

Hata Türü	Kullanılan Yöntemler		
	ANFİS	YSA	Regresyon
MSE	0,02757	0,030721	0,05289
RMSE	0,16603	0,175275	0,22998
MAPE	3,57%	4,39%	5,95%

3.2. Anket Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Anket çalışması sonucunda elde edilen tüm gruplara ait değerlendirme verileri Çizelge 10’da verilmiştir. Tüm uzman gruplarının birleştirilmiş ortak değerlendirmesine göre güvenlik ve dakiklik kriterleri en önemli kriterler olarak bulunmuştur.

Çizelge 10 - Tüm Gruplar Uzman Anketleri Ortak Değerlendirme Verileri

NO:	λ	Kriterlerin Ağırlık Oranları						
		TO	DK	VK	YK	ÇK	GK	MK
1.Belediye	6.039	0.6%	22.1%	8.9%	11.6%	13.8%	28.3%	15.2%
2.İşletmeci	6.034	0.5%	18.2%	9.3%	10.8%	10.2%	24.7%	26.8%
3.Akademik	6.077	1.2%	17.4%	11.8%	10.8%	19.0%	30.6%	10.3%
		Birleştirilmiş						
Σ	6.019	0.3%	19.5%	10.2%	11.2%	14.1%	28.5%	16.4%

Hesaplanan kriter ağırlık oranları önerilen model denkleminde performans kriterlerinin katsayıları olarak kullanılmıştır. Çalışma yapılan döneme ait km’ler, elde edilen performans verileri ve cezalara göre bir hakediş hesabı simülasyonu yapılmıştır. Daha sonra aynı dönem verileri ile YDM modeli simülasyonu da yapılarak, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

3.3. Model Simülasyonu

Çalışmada önerilen modele ilişkin daha önce sabit maliyetler ve km başı değişken maliyetler hesaplanmış, performans kriterlerinin ağırlıkları tespit edilmiştir. Elde edilen veriler ile önerilen modelin çalıştırılması durumunda araç başı dağıtılacak ödeme tutarlarının belirlenebilmesi için bir model simülasyon çalışması yapılmıştır.

$$H_i = (12.073 \text{ TL} + (KM_i * 2,927 \text{ TL})) + (0,1951 * DK + 0,1016 * VK + 0,1124 * YK + 0,1414 * \text{ÇK} + 0,2851 * GK + 0,1645 * MK) - C_i \quad (9)$$

Çalışmada kullanılan 56 adet örnek işletmeci şirket aracına önerilen model formülüne göre bir hakediş hesabı yapılmıştır. Araçlarının tamamı aynı cins ve kapasitede olması ve ücret farklılığı da bulunmaması sebebiyle kapasite normalizasyonu yapılmamıştır. Performans ödemesinin üst limiti, maliyetler toplamının (sabit ve değişken maliyet toplamı) %10'u ve aylık minimum hizmet seviyesi (MHS) 7800 km olduğu kabul edilerek;

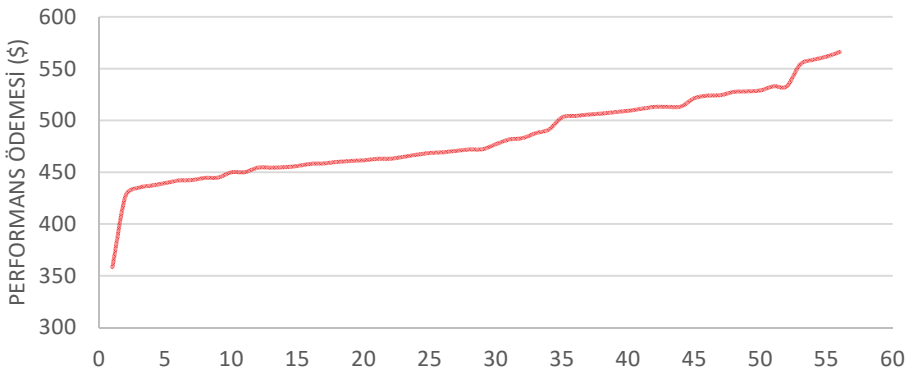
$$\text{Toplam maliyet} = 12.073 + 7800 * 2,927 = 34.903,6 \text{ TL (6.155,84 \$)} \quad (10)$$

$$\text{Maksimum Performans Ödemesi (Pmax)} = 34.903,6 * 0,1 = 3.490,36 \text{ TL (615,58 \$15)} \quad (11)$$

Çizelge 11'de görüleceği üzere; toplam ödeme tutarları 33.707,79 TL (5.944,94 \$15) ile 43.291,89 TL (7.635,25 \$15) arasında değişirken, performans ödeme tutarları ise 2031,96 TL (358,37 \$) ile 3209,89 TL (566,12 \$16) arasındadır. Çizelgeye göre, araçların hiçbirisinin maksimum performans ödemesi miktarına ulaşamadığı görülmektedir. Şekil 9'da ise araçların performans ödemelerinin grafiği verilmiştir. Burada, araçlara yapılacak ek ödemelerin herbir aracın performansına bağlı olarak farklılık gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 11 - Önerilen Model Simülasyon sonuçları

	TL/ay		\$/ay	
	Min.	Maks.	Min.	Maks.
KM	6608.5 min.		9814.5 maks.	
Sabit Maliyet (SM)	12073	12073	2129.3	2129.3
Değişken Maliyet (DM)	19343.08	28727.04	3411.5	5066.5
Performans Ödemesi (P)	2031.963	3209.886	358.4	566.1
Toplam Ödeme (H)	33707.79	43291.89	5944.9	7635.3



Şekil 9 - Önerilen Model Araçbaşı Aylık Performans Ödemesi

† TCMB 2019 yılı ortalama dolar kuru 5,67 TL/dolar olarak hesaplanmıştır.

‡ TCMB 2019 yılı ortalama dolar kuru 5,67 TL/dolar olarak hesaplanmıştır.

Antalya ilinde mevcut durumda uygulanmakta olan Performansa Dayalı Yolcu Başına Destekleme Modeli (YDM) için alınan 13.09.2019 tarih ve 562 sayılı Antalya Büyükşehir Belediyesi meclis kararında; özel toplu taşıma araçlarının taşıdıkları yolcu başına destek tutarları indirimli yolcu, öğrenci, aktarma yolcusu ve serbest yolcu (ücretsiz) başına 0,30 TL olarak belirlenmiş ve yolcu başına destek tutarlarının aylık olarak taşımacıların çalışma payları oranında taşımacılara dağıtılacağı belirtilmiştir. Alınan karara uygun olarak çalışmada kullanılan veriler ile ikinci bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Bunun için öncelikle YDM Model yapısı oluşturulmuş tur. Denklem 12’de her bir aracın aylık hakediş bedeli (Hi) formülü , Denklem 13’de ise araç başı yolcu desteği (Di) formülü görülmektedir.

$$H_i = HG_i + D_i \quad (12)$$

$$D_i = \zeta O_i * \frac{Y_i * DB}{\sum \zeta O} \quad (13)$$

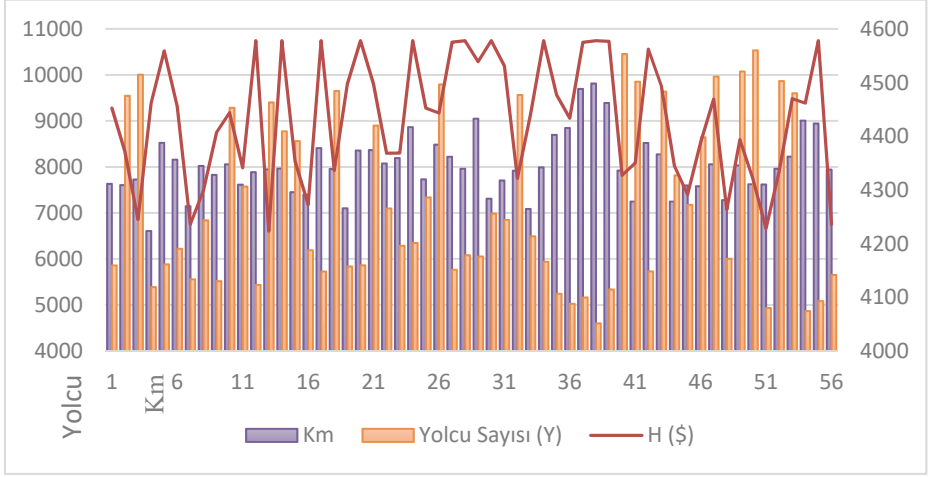
Denklemlerde; “H” toplam ödeme bedelini, “HG” günlük bilet gelirlerinin (hakediş) aylık toplamını, “D” yolcu destek bedelini, “ÇO” çalışma oranını, “Y” yolculuk sayısını ve “DB” yolcu başına belirlenen destek bedelini göstermektedir.

Çalışmada, örnek işletmeci şirkete ait 56 adet aracın çalışma yapılan aydaki yolculuk sayılarının yolcu türlerine göre dağılımı incelenmiş, destek alacak indirimli, öğrenci, aktarma ve serbest yolculuklar ayrılmıştır. Destek ödenecek toplam yolculuk sayısı 403.904 yolculuk karşılığında, işletmeci grubun 121.171,2 TL (21.370,58 \$§) desteğe hak kazanacağı hesaplanmıştır. Çalışılan her hattın yolculuk sayıları farklı olabildiği için yolcu başına destek filo bazında, çalışma oranına göre dağıtılmıştır. YDM Modeline göre destek verildiği taktirde çalışma yapılan ayda örnek işletmeci şirket bünyesindeki 56 adet aracın alacağı minimum ve maksimum destek bedelleri ve toplam ödeme tutarları Çizelge 12’de verilmiştir. Şekil 10’da ise; araçların aylık km, taşıdıkları yolcu sayısı ve model simülasyonu neticesinde tespit edilen ödeme tutarları gösterilmiştir. Grafikten görüleceği üzere, araçların farklı km ve yolcu sayıları bulunmasına rağmen elde edecekleri bedeller birbirine yakın değerlerdedir.

Çizelge 12 - YDM Modeli Simülasyon Sonuçları

	TL		\$	
	Min.	Maks.	Min.	Maks.
KM	6608.5		9814.5	
Desteklenen Yolcu (Y)	4600		10536	
Bilet Geliri (HG)	21801.73	23784.39	3845.1	4194.8
Yolcu Başı Toplam Destek (D)	2117.165	2172.258	373.4	383.1
Toplam Ödeme (H)	23945.97	25956.65	4223.3	4577.9

§ TCMB 2019 yılı ortalama dolar kuru 5.67 TL/dolar olarak hesaplanmıştır.



Şekil 10 - YDM Modeli Km-Yolcu Sayısı-Toplam Ödeme (araç/ay)

3.4. Önerilen Modelin Mevcut Model ile Kıyaslanması

Simülasyon neticesinde önerilen Performans Bazlı Modelde, 56 adet aracın hasılat gelirleri 1,286,527.18 TL (226900,74 \$**) iken, yapılacak ödeme miktarı 2,139,553.3 TL (377.346,27 \$19) olarak hesaplanmıştır. Bu durumda gelirin ödemeyi karşılama oranı %60, destekleme oranı %40 olmaktadır. Karşılaştırma yapılan YDM modelinde ise; yapılacak ödeme miktarı 1,407,698 TL (248.271,32 \$19) olarak hesaplanmış, gelirin gideri karşılama oranı ise % 91 olarak tespit edilmiştir. Bu durumda destekleme oranı da % 9 olarak hesaplanmıştır. Performans Bazlı modelin bir maliyet artı model türü olması sebebiyle maliyetleri tamamıyla kapsamakta ve performansa bağlı olarak da ilave ödemeler içermektedir. Bu sebeple, önerilen modelde araç başı gelir/gider oranı %100'ün üzerindedir. Bunun yanında, yolcu desteği modelinde aylık araç başı ödemelerin maliyetlerin çok altında kaldığı, araç başı gelir gider oranının %72'de kaldığı görülmektedir. Çizelge 13'de her iki model için maliyet ve ödeme değerleri verilmiştir.

Çizelge 13'de, önerilen modelde toplam hasılatın ödemeyi karşılama oranının nispeten düşük olduğu görülmektedir. Bu durumda idarenin %40 oranında özel taşıma işletmelerine bir sübvansiyon yapması gerekecektir. Böyle bir uygulama, idare açısından maliyetli olsa da, işletmecinin maliyetlerinin karşılanabileceği ve buna bağlı olarak toplu taşıma sisteminin sürekliliğinin sağlanabileceği bir uygulamadır. İdare, optimum planlama yaklaşımı ile işletmecilerin yapacağı minimum hizmet seviyesini (katedilen km) düşürerek maliyetlerde iyileştirme sağlayabilir.

Önerilen Performans Bazlı model ile toplu taşıma hizmetinin hedefi olan hizmet kalitesinin ve performansının artırılması amaçlanmıştır. Modelde değişken maliyetler içerisinde önerilen km başı ödeme ile aylık katedilen yolun maliyeti ödenmektedir. Böylelikle hem yolcu sayısı az olan güzergahlarda da çalışılması desteklenebilecek, hem de farklı

** TCMB 2019 yılı ortalama dolar kuru 5,67 TL/dolar olarak hesaplanmıştır.

uzunluklardaki güzergahlarda çalışılması durumunda adaletli gelir dağıtımı yapılabilecektir. Önerilen modelde kullanılan Asgari Hizmet seviyesi kavramı, sözleşme kapsamında taşıma filosundaki araçların çalışması gereken aylık katedecekleri mesafeyi ve buna bağlı ortalama maliyetlerini belirlenmesini sağlamaktadır. Performans kriterlerinde değerlendirilen yolcu/km kavramı ise araçların verimliliklerinin değerlendirilmesine ve taşınan yolcu sayısına bağlı olarak ödüllendirilmesine imkan sağlayacaktır. Önerilen modelde önemli bir yer tutan Performans değerlendirmesinin amacı belirlenen standartlara uygun ve düzgün çalışan taşımacıların teşvik edilmesi ve buna bağlı olarak hizmet kalitesinin artırılması sağlamaktır. Böylelikle hizmet kalitesinin artışına bağlı olarak toplu taşımanın cazibesinin ve kullanımının artırılması hedeflenmektedir. Önerilen modelde ele alınan tüm ödeme esasları ve standartların taşımacılar ile yapılacak olan sözleşme ve taahhütlerle garanti altına alınması gerekmektedir. Sözleşmelerle taahhüt altına alınan ödeme modelinde sözleşme süresince değişen şartlar karşısında tarafların çıkarlarına göre değişiklik yapmasının önüne geçilerek sistemin sürekliliği sağlanabilecektir. İncelenen modellerin içerdiği özelliklerin karşılaştırması Çizelge 14’de gösterilmiştir.

Çizelge 13 - Değerlendirilen Modellere Ait Maliyet-Ödeme Hesapları

	Önerilen Model		Yolcu Desteği Modeli	
	TL/ay	\$/ay	TL/ay	\$/ay
Ort.Ödeme/araç	38,206.3	6,738.3	25,137.5	4,433.4
Sabit+ Değişken Maliyet/araç	34,903.6	6,155.8	34,903.6	6,155.8
Gelir/Gider Oranı (%) /araç	109%		72%	
Toplam Destek	853,026.2	150,445.5	121,171.2	21,370.6
Toplam Hasılat	1,286,527.2	226,900.7	1,286,527.2	226,900.7
Toplam Ödeme	2,139,553.4	377,346.3	1,407,698.4	248,271.3
Hasılatın Ödemeyi Karşılama Oranı	60%		91%	

Çizelge 14 - Çalışma Kapsamında Değerlendirilen Modellerin Karşılaştırması

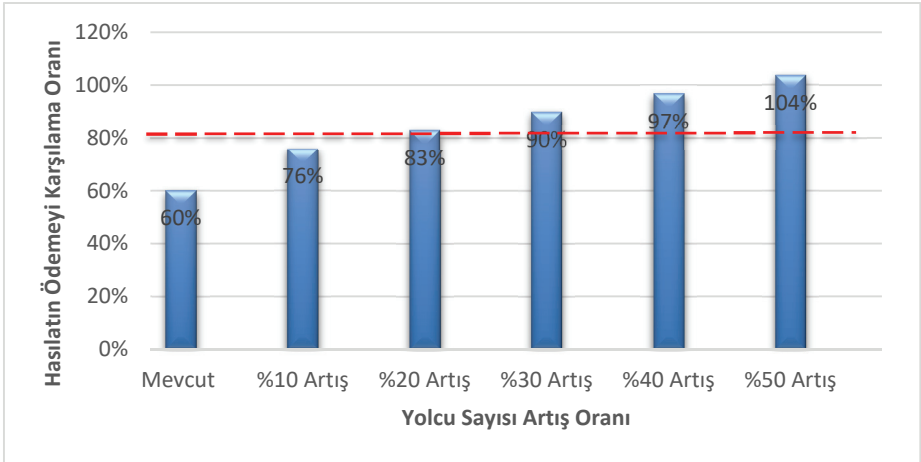
	Önerilen Model	YDM Modeli
Km başı ödeme	√	–
Asgari Hizmet Seviyesi	√	–
Garanti km	–	–
Yolcu/km	√	–
Yolcu bazlı destek	–	√
Performans Değerlendirmesi	√	–
Sözleşme-taahhüt	√	–

YDM modelinin idare bütçesi açısından avantajlı olmasına rağmen çalışma yapılan aydaki araç ve sefer sayıları dikkate alındığında, Çizelge 13’de görüleceği üzere araç başı ödenecek

bedeller aylık sabit ve değişken maliyetlerin çok altında kalmaktadır. Bu durum, modelin işletmeciler açısından sürdürülebilir olmayacağı anlamına gelmektedir. Çizelge 14’de, çalışma kapsamında değerlendirilen YDM modelinde sadece yolcu bazlı desteğin bulunduğu görülmektedir. Yalnızca yolcu taşınmasının teşvik edilmesi, yolcu kapma yarışları, sefer saatlerine uyulmaması, yolcunun az olduğu saatlerde çalışmama eğilimine yol açmaktadır. Bu durumun ise hizmet kalitesinin yitirilmesine sebep olacağı değerlendirilmektedir.

Çizelge 15 - Yolcu Sayısına Bağlı Destek ve Hasılatın Ödemeyi Karşılama Oranı Değişimi

Yolcu Sayısı Artış Oranı	Toplam Destek	Toplam Hasılat	Toplam Ödeme	Hasılatın Ödemeyi Karşılama Oranı	Doluluğu Aşan Araç Sayısı	
Mevcut	TL/ay	853.026,2	1.286.527,2	2.139.553,4	60%	0
	\$/ay	150.445,5	226.900,7	377.346,3		
%10 Artış	TL/ay	513.758,4	1.625.794,9	2.139.553,4	76%	0
	\$/ay	90.609,9	286.736,3	377.346,3		
%20 Artış	TL/ay	365.958,9	1.773.594,5	2.139.553,4	83%	3
	\$/ay	64.543,0	312.803,3	377.346,3		
%30 Artış	TL/ay	218.159,3	1.921.394,0	2.139.553,4	90%	14
	\$/ay	38.476,1	312.803,3	377.346,3		
%40 Artış	TL/ay	70.359,8	2.069.193,6	2.139.553,4	97%	19
	\$/ay	12.409,1	338.870,2	377.346,3		
%50 Artış	TL/ay	- 77.439,7	2.216.993,1	2.139.553,4	104%	20
	\$/ay	- 13.657,8	364.937,1	377.346,3		



Şekil 11 - Önerilen Model Yolcu Sayısı Artışı-Hasılatın Ödemeyi Karşılama Oranı

Çizelge 15 ve Şekil 11’de, önerilen modelin yolcu sayısı artışına bağlı olarak hasılatın ödemeyi karşılama oranlarındaki değişimi gösterilmiştir. Buna göre önerilen model ile yolcu sayısının %30 oranında artması durumunda yolcu desteği modelindeki hasılatın ödemeyi karşılama oranı elde edilmekte, yaklaşık % 45 civarında bir artış sağlanması durumunda ise idarenin desteğine gerek kalmayacağı görülmektedir. Önerilen modelin yolcu sayısına duyarlı olduğu ve gelir artışına bağlı olarak destekleme oranının da düştüğü gözlenmektedir. Bununla birlikte Çizelge 15’te, yolcu sayısının %20 ve üzeri artışında araçların bir kısmı performans kriterlerinden Yolcu Yüğü (Doluluk) kriteri değerini (80 kişi) aştığı (ort. 23500 yolcu/ay), bu sebeple, hizmet kalitesini düşürmeyecek düzeyde yolcu artışının sağlanabileceği ve desteğin devam etmesi gerekeceği anlaşılmaktadır.

4. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Çalışmada, örnek alınan Antalya ili lastik tekerlekli toplu taşıma sisteminde, özel toplu taşıma araçlarının maliyetleri hesaplanmış, maliyetlerine ilave olarak araçların performanslarına bağlı ek ödeme yapılmasına dair bir matematiksel model geliştirilmiştir. Modelde, km başı birim maliyetin (değişken işletme maliyetlerinin) hesaplanmasında sezgisel algoritmalarından faydalanılmıştır. Ayrıca modele göre, taşımacılara maliyetlerinin üzerinde ödenecek performans bedelinin belirlenmesi için, üç ayrı uzman grubu ile yapılan anketler AHP tekniğinden faydalanılarak değerlendirilmiş ve elde edilen değerler ödeme modelinde performans ödeme katsayısı olarak kullanılmıştır. Önerilen model sonuçları, Türkiye’de çoğunlukla kullanılan yolcu bazlı destek modeli sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Özel toplu taşıma işletmeleri, işletme maliyetlerini karşılayamamaları durumunda bilet ücretinin artırılması yönünde sürekli olarak idarelere baskı uygulamaktadır. Bu baskının ortadan kaldırılması amacıyla önerilen model literatürdeki yönetim sözleşmesinin (maliyet-artı sözleşmesi) bir benzeri olarak işletme maliyetlerinin karşılanması ve üstüne ilave bedel ödenmesine dayandırılmıştır. Böylelikle işletmelerin maliyet kaygısı ortadan kalkacaktır. Önerilen model, Türkiye’de bazı şehirlerde kullanılan YDM modeli ile karşılaştırılmış, neticede önerilen modelin özel taşımacıların gelir-gider oranında %37 daha yüksek sonuç verdiği, taşımacıların maliyetlerinin tamamen karşılandığı ve böylelikle toplu taşıma sisteminin sürekliliğinin sağlanabileceği görülmüştür. Ayrıca, ilave performans ödemesi ile de hizmet kalitesinin artırılarak toplu taşımanın cazip hale getirilebileceği ortaya konmuştur. Önerilen model kapsamındaki maliyet hesaplaması ile önceki dönem verileri kullanılarak gelecek dönemlere ilişkin yaklaşık işletme maliyetlerinin hesaplanabileceği ve toplu taşıma işletmesinin yıllık bütçesinin de oluşturulabileceği düşünülmektedir. Özellikle 2020 yılında yaşanan pandemi sürecindeki gibi toplu taşıma sisteminin kapasite altı çalıştırıldığı, yolculuk sayılarının ve dolayısıyla bilet gelirlerinin önemli ölçüde düştüğü durumlarda toplu taşıma sistemi sürekliliğinin sağlanabilmesi için özel toplu taşıma işletmelerinin desteklenmesinin önemli olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, önerilen modelin yolcu sayısına artışına dolayısıyla gelir artışına bağlı olarak destekleme oranının da düştüğü gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmada, yolcu sayısının %45 artış göstermesi durumunda idarenin gelir desteği yapmasına gerek kalmayacağı bulunsada, hizmet kalitesini düşürmeyecek düzeyde yolcu artışının gerçekleştirilebileceği, belirli bir düzeyden sonar araç ilavesi gerekeceği bu durumda da desteğin devam etmesi gerekeceği tespit edilmiştir.

Elde edilen tüm sonuçlara göre; özellikle özel taşımacıların bulunduğu kentçi lastik tekerlekli toplu taşıma sistemlerinde, işletmelerin maliyet kaygısından kurtarılması, bilet ücret artışlarının önüne geçilmesi ve böylelikle toplu taşıma sisteminin sürekliliğinin sağlanabilmesi amacıyla bir ödeme modeli önerilmiştir. Önerilen ödeme modeli aynı zamanda taşımacı performanslarının ödüllendirilerek toplu taşıma hizmet kalitesinin artırılmasını ve buna bağlı olarak tercih edilebilirliğinin artırılmasını amaçlamaktadır. Çalışmada nüfusa göre toplu taşıma kullanım oranı düşük olan bir yerleşim seçilerek, kullanım oranının artırılması hedeflenmiştir. Yapılan çalışmanın, Türkiye’de yerel yönetimlerin toplu taşıma hizmetlerinde performansa dayalı ödeme modellerinin kullanımının yaygınlaşmasının önünü açacağı, yeni çalışmalara ışık tutacağı düşünülmektedir. Çalışmada önerilen performans kriterlerinin başka şehirlerde, farklı toplu taşıma sistemlerinde ortaya çıkabilecek farklılıklara bağlı olarak başka parametrelerin eklenebileceği düşünülmektedir. İleriki araştırmalarda özellikle pandemi gibi yolcu sayısını ve dolayısıyla bilet gelirlerini olumsuz yönde etkileyen olağanüstü koşulların etkisinin de incelenmesinin faydalı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca modelin uygulanmasında en önemli kısıt olan yerel yönetim bütçelerinin idarelerin asli görevi olan toplu taşıma hizmetini sübvansane etme anlamında güçlendirilmesi ve ek kaynaklar sağlanması konusu da araştırılmalıdır.

Teşekkür

Yazarlar, çalışma verileri için Antalya Büyükşehir Belediyesi, Ulaşım Planlama ve Raylı Sistem Dairesi Başkanlığına teşekkür ederler.

Kaynaklar

- [1] J. Pucher, A. Markstedt, ve I. Hirschman, “Impacts of subsidies on the costs of urban public transport (USA).”, *Journal of Transport Economics & Policy*, c. 17, sayı 2, ss. 155–176, 1983.
- [2] P. Tisato, “A comparison of optimisation formulations in public transport subsidy”, *International Journal of Transport Economics*, 2000.
- [3] K. A. Small ve E. T. Verhoef, *The economics of urban transportation*. 2007.
- [4] I. W. H. Parry ve K. A. Small, “Should urban transit subsidies be reduced?”, *American Economic Review*, 2009, doi: 10.1257/aer.99.3.700.
- [5] J. Mattson ve D. Ripplinger, “Marginal cost pricing and subsidy of small urban transit”, *Transportation Research Record*, 2012, doi: 10.3141/2274-08.
- [6] A. Mouwen ve J. Van Ommeren, “The effect of contract renewal and competitive tendering on public transport costs, subsidies and ridership”, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2016, doi: 10.1016/j.tra.2016.03.003.
- [7] M. Ševrović, D. Brčić, ve G. Kos, “Transportation Costs and Subsidy Distribution Model for Urban and Suburban Public Passenger Transport”, *PROMET - Traffic&Transportation*, 2015, doi: 10.7307/ptt.v27i1.1486.

- [8] A. Gautier ve A. Yvrande-Billon, “Contract Renewal as an Incentive Device. An Application to the French Urban Public Transport Sector”, *Review of Economics and Institutions*, 2013, doi: 10.5202/rei.v4i1.88.
- [9] D. A. Hensher, C. Mulley, ve N. Smith, “Towards a simplified performance-linked value for money model as a reference point for bus contract payments”, *Research in Transportation Economics*, 2013, doi: 10.1016/j.retrec.2012.06.018.
- [10] F. Canitez, D. Çelebi, M. Deveci, ve Y. Kuvvetli, “Selecting an optimal contractual payment model for Istanbul’s public bus operators using non-linear mathematical programming”, *Research in Transportation Economics*, 2019, doi: 10.1016/j.retrec.2019.100750.
- [11] W. Roy ve A. Yvrande-Billon, “Ownership, contractual practices and technical efficiency: The case of urban public transport in france”, *Journal of Transport Economics and Policy*, c. 41, sayı 2, ss. 257–282, 2007.
- [12] D. A. Hensher ve E. Houghton, “Institute Of Transport Studies The Australian Key Centre in Transport Management”, 2004.
- [13] G. J. Fielding, R. E. Glauthier, ve C. A. Lave, “Performance indicators for transit management”, *Transportation*, 1978, doi: 10.1007/BF00168037.
- [14] J. Attanucci, L. Jaeger, ve J. Becker, “Bus Service Evaluation Procedures : A Review”, Washington, D.C., 1979.
- [15] Metropolitan Transit Authority of Harris County (Metro), “Bus Service Evaluation Methods A Review”, Washington, D.C., 1984.
- [16] Y. J. Nakanishi, “Bus performance indicators: On-time performance and service regularity”, *Transportation Research Record*, 1997.
- [17] E. Randall, B. Condry, ve M. Trompet, “International bus system benchmarking: Performance measurement development, challenges, and lessons learned”, 2006.
- [18] B. Kocaman; S. Kumbar; T. Tezer; Ö. Yılmaz, “Performance Measurement and Determination of Performance Indicators in Public Transport: Kocaeli Application”, içinde *TRANSIST 2011 IV. Transportation Symposium And Exhibition Presentations*, 2011, ss. 230–244, [Çevrimiçi]. Available at: <https://www.iett.istanbul/webimage/file/sempozyumlar/Transist2011Bildiri.pdf>.
- [19] J. R. Jang, “ANFIS Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System”, *IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics*, sayı June 1993, 1993, doi: 10.1109/21.256541.
- [20] A. Yücel, “Integrated neural fuzzy logic approach in supplier selection problem”, Yıldız Technical University, 2010.
- [21] D. Pamučar, V. . Lukovac, Ve S. Pejčić-Tarle, “Application Of Adaptive Neuro Fuzzy Inference System In The Process Of Transportation Support”, *Asia Pacific Journal of Operational Research*, c. 30, sayı 02, 2013, doi: <https://doi.org/10.1142/S0217595912500534>.

- [22] D. Pamučar, S. Ljubojević, D. Kostadinović, ve B. Đorović, “Cost and risk aggregation in multi-objective route planning for hazardous materials transportation—A neuro-fuzzy and artificial bee colony approach”, *Expert Systems with Applications*, c. 65, ss. 1–15, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.08.024>.
- [23] R. Islam, S. R. Musabbir, I. U. Ahmed, M. Hadiuzzaman, M. Hasnat, ve S. Hossain, “Bus service quality prediction and attribute ranking using probabilistic neural network and adaptive neuro fuzzy inference system”, *Canadian Journal of Civil Engineering*, c. 43, sayı 9, ss. 822–829, 2016, doi: 10.1139/cjce-2016-0119.
- [24] S. Duleba, T. Mishina, ve Y. Shimazaki, “A dynamic analysis on public bus transport’s supply quality by using AHP”, *Transport*, c. 27, sayı 3, ss. 268–275, 2012, doi: 10.3846/16484142.2012.719838.
- [25] M. Deveci, F. Canitez, ve N. Ç. Demirel, “Setting The Optimal Transit Fare in Public Transportation By Using Analytical Hierarchy Process (AHP): The Case of IETT , Istanbul”, sayı 1059, 2016.
- [26] S. Güner, “Operational Efficiency and Service Quality Analysis in Public Transportation Systems”, *Journal of Transportation and Logistics*, c. 2, sayı 2, ss. 34–48, 2017, doi: 10.22532/jtl.358727.
- [27] K. Goepel, “Implementation of an Online software tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS)”, *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 2018, doi: 10.13033/ijahp.v10i3.590.
- [28] L. Mikhailov, “Group prioritization in the AHP by fuzzy preference programming method”, *Computers and Operations Research*, 2004, doi: 10.1016/S0305-0548(03)00012-1.

Kentiçi Toplu Taşıma Sistemlerinde Performansa Dayalı Ödeme Modelinin Geliştirilmesi

EK-1 AHP Uzman Anket Formu

Değerli Katılımcı,

Ankette, belirlenen Toplu Taşıma Performans Kriterlerinin uzman (karar vericiler, akademisyenler, STK temsilcileri) bakış açısıyla AHP metodu ile önem derecelerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Anket formunun doldurulmasında aşağıdaki hususlara dikkat edilmesi istenmektedir.

- Kriterler ikili karşılaştırma esasına göre derecelendirilir.
- Her karşılaştırma kendi içinde bağımsız olarak değerlendirilir.
- İkili karşılaştırmalar aşağıdaki skala değerlerine göre yapılacaktır.

Ankete katılan kişi, kendi değerlendirmesine göre ikili karşılaştırmada hangi kriteri daha önemli buluyorsa, önem derecesini belirtmek için o kriter tarafındaki skala değerini işaretleyecektir. Örneğin; Ankete katılan kişiye göre "dakiklik" kriteri "konfor" kriterinden Kuvvetli derecede önemli ise "dakiklik" tarafındaki "5" işaretlenecektir.

Toplu Taşıma Performans Kriterlerinin adı ve açıklamaları aşağıda verilmiştir.

PERFORMANS.....PERFORMANS KRİTERLERİ AÇIKLAMASI
KRİTERİ

Dakiklik..... Toplu Taşıma araçlarının duraklara zamanında gelmesi.
Verimlilik (Yolcu/km)..... Toplu Taşıma araçlarının verimli çalışması (km başına maliyeti karşılayacak oranlarda yolcu taşınması)
Yolcu yükü (doluluk)..... Konforlu yolculuk (Araçların kabul edilebilir doluluk oranı altında çalışması).
Çevre..... Çevreye duyarlı, düşük emisyonlu araçlarla taşıma.
Güvenlik..... Yol/yolcu güvenliği (hız limitlerinin aşılma durumu, karşılan kaza sayıları)
Memnuniyet.....Yolcu Memnuniyeti (Cezaya Dönüşen Şikayet Sayıları)

1. Verilen skala değerleri ve açıklamalara göre kriterleri ikili olarak karşılaştırınız. *

Skala

Değeri.....Tanımı

- 1.....Eşit Derecede Önemlidir.
3.....Biri Diğeriine Göre Çok Az Önemlidir.
5.....Kuvvetli Derecede Önemlidir.
7.....Çok Kuvvetli Derecede Önemlidir.
9.....Aşırı Derecede Önemlidir.
2,4,6,8.....Ortalama Değerler

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Dakiklik	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Verimlilik (Yolcu/km)
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Dakiklik	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Yolcu Yüğü (doluluk)
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Dakiklik	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Çevre
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Dakiklik	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Güvenlik
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Dakiklik	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Memnuniyet
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Verimlilik (Yolcu/km)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Yolcu yüğü (doluluk)
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Verimlilik (Yolcu/km)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Çevre

	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Verimlilik (Yolcu/km)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Güvenlik
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Verimlilik (Yolcu/km)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Memnuniyet
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Yolcu yükü (doluluk)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Çevre
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Yolcu yükü (doluluk)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Güvenlik
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Yolcu yükü (doluluk)	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Memnuniyet
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Çevre	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Güvenlik
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Çevre	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Memnuniyet
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Güvenlik	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	Memnuniyet

EK-2 İndis Listesi

- AUAP : Antalya Ulaşım Ana Planı
ANFİS : Uyarlanabilir Bulanık Sinir Ağları Sistemi (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System)
AHP : Analitik Hiyerarşik Proses
APG : Anahtar Performans Göstergeleri
PDS : Performansa Dayalı Sözleşmeler
SPLP : Basitleştirilmiş Performansa Bağlı Ödeme Modeli
MHS : Minimum Hizmet Seviyesi
YSA : Yapay Sinir Ağları
YDM : Performansa Dayalı Yolcu Başına Destekleme Modeli
VK : Verimlilik (Yolcu/km) Kriteri
DK : Dakiklik Kriteri
ÇK : Çevre Kriteri
YK : Yolcu Yüğü (Doluluk) Kriteri
GK : Yol/yolcu güvenliği Kriteri
MK : Yolcu Memnuniyeti Kriteri
TO : Tutarlılık Oranı
H : Toplam ödeme bedeli
D : Yolcu Destek Bedeli
HG : Günlük Bilet Geliri
SM : Sabit Maliyet
DM : Değişken Maliyet
MSE : Ortalama Karesel Hata (Mean Square Error)
RMSE : Ortalama Hata Kareleri Toplamı Kökü (Root Mean Square Error)
MAPE : Ortalama Mutlak Yüzde Hata (Mean Absolute Percentage Error)

İnşaat Sürecinin İş Çizelgelemesi, Yönetimi ve Optimizasyonu

Önder Halis BETTEMİR¹
Ömer Faruk BULAK²

ÖZ

Bu çalışmada bina inşaatı ile ilgili iş paketlerinin metrajı, adam.saat ve malzeme gereksinimi hesaplamaları, aktivite süresi ve ekip sayılarının belirlenmesi ile iş çizelgelemesinin oluşturulması işlem adımları yapının geometrisi, imalatlar ve temin edilebilen kaynaklar ile ilişkilendirilip formülleştirilmiştir. Hesaplanan metraj değerleri Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın hazırladığı birim fiyat analizlerinde kullanılan poz listelerindeki malzeme, işçilik ve makine kullanımları ile ilişkilendirilerek tüm iş kalemleri için gereken malzeme, işçilik ve iş makinesi miktarları belirlenmiştir. Ayrıca iş kalemleri arasındaki fiziksel ve mantıksal ilişkiler göz önüne alınarak doğrusal iş programı ile inşaatın tamamlanma süresi tahmin edilmiştir. İnşaatта çalışan taşeronların farklı çalışma takvimi olabileceği göz önüne alınarak farklı günlerde tatil yaparak çalışılması durumunda işin kaç takvim günü süreceği hesaplanmıştır. Buna ek olarak hava koşulları ve Ramazan ayı gibi etkenlerin de iş verimine etkisi dikkate alınmıştır. Şantiyede aynı anda çalışabilecek işçi sayısı, taahhüt edilen proje teslim süresi ve gecikme cezasına göre en uygun iş programının hazırlanması Tavlama Benzetimli Genetik Algoritma (TBGA) ile gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada kaynak kısıtlı iş programı ve zaman maliyet ödünleşim problemleri oluşturulurken proje paydaşlarının farklı çalışma günlerinin olabileceği ve iş verimlerinin mevsim koşullarına göre değişebileceği dikkate alındığı için inşaat projelerinin iş programlarının, daha fazla etkeni içerir biçimde oluşturulabilmesi sağlanmıştır. Bu yaklaşım etkin yapım yönetimi tekniklerinin hızlı biçimde uygulanmasını sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: İş programı, optimizasyon, proje yönetimi, yapı bilgi modellemesi, tavlama benzetimli genetik algoritma.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 11 Ağustos 2021 günü ulaşmıştır. 29 Ağustos 2022 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Ocak 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.981601>

1 İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya
onder.bettemir@inonu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-5692-7708>

2 İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya
bulakomerfaruk@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0003-0915-2708>

ABSTRACT

Scheduling, Management and Optimization of Construction Process

In this study, computation of quantity take-off, man.hour and material requirements; determination of activity durations and crew sizes; and preparation of construction schedule related with the construction of a building are formulated by associating them with the geometry of the building, the construction items, and the available resources. Obtained quantity take-off values is joined with the item codes of the unit price analysis of Ministry of Environment, Urbanization and Climate Change of Republic of Türkiye and after this operation quantities of material, workmanship, and machinery requirements are computed by the corresponding unit price analysis data. Line-of-Balance schedule is prepared by considering the physical and logical constraints between the activities and construction duration is estimated. Construction project can be executed by different subcontractors which may have diverse workdays and the developed application computes the project duration in terms of calendar days by considering the different work calendars of the construction crews. Moreover work efficiency is estimated by considering the effects of seasonal conditions, and month Ramadan. Optimization of construction schedule is executed by Genetic Algorithm with Simulated Annealing (GASA) according to the restrictions on the construction duration and the maximum available labor as well as the delay penalty. In this study resource constrained project scheduling and time cost trade-off problems are formulated by taking the possibilities of the project stakeholders may have different workdays and the job efficiencies may deviate according to the seasonal conditions into account which makes preparation of construction schedules considering more factors possible. This approach provides fast implementation of efficient construction management techniques.

Keywords: construction schedule, optimization, project management, building information model, genetic algorithm with simulated annealing.

1. GİRİŞ

Kısa sürede ve düşük maliyetli biçimde teklif hazırlamak için uygulanan inşaat maliyetini ve süresini tahmin eden pratik yöntemler %25'e varan hatalı sonuçlar sunabilmektedir [1]. Buna ek olarak aynı tesisin uygun zemin sınıfı ile uygun olmayan zemin sınıfı üzerine inşa edilmesi durumlarının inşaat maliyetleri arasında iki kat fark olabilmektedir [2]. Yaklaşık yöntemlerin içerdiği hata payı ve inşaat işlerinin belirsizliğinin oluşturduğu değişkenlik inşaat sektörünün rekabet ortamı sonucu oluşan kâr oranının çok üzerinde olduğu için yaklaşık yöntemlerle ihaleye girilmesi çok düşük teklifle işin alınıp zarar edilmesine neden olabilmektedir. Aşırı düşük teklif sunulması müşavir ve işveren tarafından en riskli durum olarak tanımlanmaktadır [3]. Sözleşme türü inşaat sürecinde oluşabilecek beklenmeyen durumlardan kaynaklanan maliyet artışlarının taraflara hangi oranda sorumluluk yükleneyeceğini belirlemektedir [4]. Bu nedenle taraflardan bağımsız gelişen olayların yükleniciye getireceği sorumlulukların sözleşme maddelerinde net biçimde ifade edilmesi gerekmektedir. Fakat sözleşmelerin çok uzun olması, kapsam karmaşıklığı ve tartışmalı ifadeler içermesi, gramer ve yazım hataları bulundurması sözleşmelerin doğru yorumlanabilmesini güçleştirmektedir [5]. Sözleşme ve eklerine uygunluk inşaat projelerinin kalite performansını etkileyen beş faktörün arasında yer almaktadır [6]. Anlaşmazlıkların

nedenleri ele alınarak ve potansiyel çözümlerin erken uyarılarına erişildiğinde uygun bir anlaşmazlık çözüm yöntemi uygulanabilmektedir [7].

Gelişen teknolojiyle birlikte endüstriyel inşaat yöntemlerinin geliştirilmesi ve inşaat malzemesi üreticilerinin yenilikçi malzemeler üretip sektörün kullanımına sunmaları farklı inşaat yöntemlerinin uygulanmasına yol açmıştır [8]. Artan çevre duyarlılığı sonucunda çevreye daha az zarar veren inşaat malzemeleri ve tekniklerinin kullanımı yaygınlaşmıştır [9]. Belirtilen etkiler neticesinde inşaat sektörünün uyguladığı yöntemlerde önemli değişiklikler olmuştur.

Belirtilen rekabet koşulları, zemin ile ilgili belirsizlikler, net olmayan sözleşmelerin getirdiği riskler ve uygulanan yeni inşaat yöntemleri ile yeni yapı malzemeleri üzerinde yeterli deneyimin olmaması yüklenicilerin risklerini arttırmaktadır. Bu nedenle ihale öncesi maliyet ve süre tahminini yüksek doğrulukta yapabilmek için tüm inşaat kalemlerinin metrajının yüksek doğrulukta hesaplanması, iş kalemleri için gereken malzeme, işçilik ve iş makinesi ihtiyaçları ile birim maliyetlerinin belirlenmesi ve birim sürede gerçekleştirilecek işin yüksek doğrulukta tahmin edilmesi gereklidir. Tahsis edilebilen kaynaklar göz önüne alınarak iş kalemlerinin kaç iş günü içerisinde tamamlanabileceği veya iş kaleminin süresi önemli ise istenilen sürede tamamlanması için ne kadar kaynak tahsis edilmesi gerektiği hesaplanır. İş programı oluşturularak inşaatın kaç iş gününde tamamlanacağı belirlenir. Yapım sürecine taşeronlar da dâhil olacağı için iş kalemlerinin icra edilmesinde farklı çalışma günleri uygulanabilir. Taşeron seçiminde taşeronların performanslarının proje başarısına etkisi önemlidir [10]. Bu çalışmada uygulanan takvimli iş programı yöntemi ile taşeronların proje süresine etkisi ölçülebilir. Bayram tatilleri ve resmi tatiller göz önüne alınarak inşaatın kaç takvim gününde tamamlanacağı ayrıca hesaplanır. Günlük personel ve iş makinesi ihtiyacı belirlenerek temin zorluğu yaşanması durumunda daha az kaynak tahsisine ihtiyaç duyulacak şekilde iş programı revize edilir. İnşaat süresince ortaya çıkacak malzeme ve işçilik kullanımları, elde edilecek hak ediş miktarları ve dolaylı giderler dikkate alınarak nakit akışı oluşturulup teklif dosyasında sunulacak bedel ve süre belirlenir.

Teklif hazırlama sürecindeki emek yoğunluğunu azaltmak için gerçek veya gerçeğe yakın metraj hesaplayan ve iş programı hazırlayan birçok yazılım geliştirilmiştir. Fakat iş programı oluşturulurken inşaat veriminin tüm dönemlerde sabit kaldığı, mevsimsel koşullardan etkilenmediği varsayılır. Bu durum iş programının önemli ölçüde sapmasına neden olur. Ayrıca mevcut ticari yazılımlar güçlü optimizasyon algoritmalarına sahip olmadıkları için kaynak tahsisini ve iş kalemlerinin sürelerini belirlemeyi en uygun biçimde gerçekleştirememektedir. İnşaat sektöründe bilgi teknolojileri kullanımının oldukça ilerlediği bir ortamda teknolojik ilerlemelerden planlama sürecinde tam anlamı ile yararlanılmaması önemli bir eksikliklerdir. Bu durum en az insan emeği ile metraj hesaplayan, aktivite süresi veya kaynak talebi miktarlarını belirleyen, mevsimsel etkileri dikkate alarak takvimli iş programını kaynak kısıtlı zaman-maliyet ödünleşim problemini çözerek oluşturan bir sistemin gerçekleştirilmesi için önemli bir motivasyon oluşturmıştır.

Bu çalışmada proje yönetimi sürecinde yer alan metraj hazırlama, aktivite süreleri ile kaynak gereksinimlerini belirleme, iş programını oluşturma, birim fiyatlara göre inşaatın maliyetini ve süresini belirlemeyi birçok etkeni göz önüne alarak gerçekleştiren entegre bir yöntemin geliştirilmesi amaçlanmıştır. İş programının oluşturulması temin edilebilen kaynak miktarları ve inşa edilen yapının işletmeye alınması ile elde edilecek gelir, şantiyenin genel giderleri, mevsimsel koşullar ve inşaatın yer seviyesinden yüksekliği dikkate alınarak kaynak kısıtlı iş

programı problemi ile zaman maliyet ödünleşim problemlerinin çözümü ile gerçekleştirilmektedir. Literatürdeki çalışmalar ve uygulamaya yönelik geliştirilen ticari yazılımlar belirtilen bütünlükten uzak kalmakta ve genellikle proje yönetim sürecinin bir aşamasına ağırlık vermektedir. Bu çalışmada bütünsel bir yaklaşımla iş programı oluşturan bir süreç önerilmektedir. Önerilerin sistem teknoloji yatırımı yapabilme konusunda oldukça zayıf durumda olan küçük ve orta ölçekli yükleniciler için önemli fayda sağlama potansiyeline sahiptir, çünkü küçük ve orta ölçekli inşaat firmaları üzerinde gerçekleştirilen araştırmada dört önemli anahtar performans göstergesi arasında yöneticilerin yetkinliği de yer almaktadır [11]. Bu durumun nedenleri arasında yapım yönetimi sürecinin manuel yürütülmesinde etkisi bulunmaktadır.

Makalenin ikinci bölümünde bu çalışmanın motivasyonunu oluşturan otomatik metraj hesaplama, hava ve çevre koşullarının iş verimine etkisini araştırma, zaman-maliyet ödünleşimi ve kaynak kısıtlı iş programı problemi üzerine literatür taraması sunulmuştur. Üçüncü bölümde metraj, kaynak gereksinimlerinin belirlenmesi aktivite sürelerinin ve ekip sayılarının belirlenmesi, iş günü ve takvim gününe göre iş programının oluşturulması, günlük malzeme kullanımı ve personel ihtiyacı hesaplamaları ile iş programını optimize eden TBGA'nın açıklandığı kuramsal yöntem bölümü yer almaktadır. Bu bölümün ardından geliştirilen yöntemin uygulaması yapılmış ve sunduğu faydaları ve geliştirilmesi gereken kısımlarının açıklandığı tartışma ve sonuç kısmı ile makale sonlandırılmıştır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1. Metraj Hesaplamasının Otomasyonu

Bilgi teknolojisi uygulamalarının niteliklerinin artması ile inşaat sektörü teknik çizim amaçlı kullanılan Bilgisayar Destekli Çizim (BDC) yazılımlarından malzeme ve imalatlar ile ilgili öznetelik bilgilerinin kaydedilip işlenebildiği Yapı Bilgi Modellemesi (YBM) yazılımlarına geçiş yapmaktadır. YBM binanın inşa ve kullanım süreçlerini de içeren bir otomasyon uygulamasıdır. Metraj hesaplamasının otomasyonu ihmalleri ve yuvarlama hatalarını en aza indirdiği için doğruluğunu da arttırmaktadır [12]. Metraj otomasyonundaki faydalarına rağmen YBM yaygın olarak görsellik, mimari tasarım ve modelleme ile mekânsal çakışma analizlerinde kullanılmaktadır. Metraj otomasyonunda metraj kalemlerinin standartlaşmaması ve farklı kurumların aynı metraj kalemini değişik yöntemlerle hesaplamaları otomasyonun önünde önemli bir engeldir [13]. Otomasyon çalışmalarına insan müdahalesi olmadan yer karosu metrajını gerçekleştiren sistem [14], prefabrik beton kesitlerin metrajını ve maliyet analizini gerçekleştiren yöntem [15], açık kaynak kodlu YBM tabanlı modelle sisteme gömülü veritabanı yardımı ile metraj hesaplayıp gerekli adam.saat ve makine.saat değerlerini hesaplayan yaklaşım [16], kazı, beton ve kalıp metrajlarının otomatik hesaplanmasını sağlayan yaklaşım [17] örnek gösterilebilir. Buna ek olarak Khosakitchalert vd. duvar, döşeme ve diğer yapısal ve mimari elemanların birleşim yerlerinin minhalarını dikkate alarak metraj hesaplayan YBM tabanlı bir yöntem geliştirmiştir [18]. Teknik çizimlerden metraj hazırlayan yazılımların güncel durumları mimari ve yapısal elemanların birbirlerine temas ettikleri kesim bölgelerindeki kesişim miktarlarını tam olarak belirleyemedikleri için hazırladıkları metraj değeri $\pm\%5$ mertebesinde gerçek değerden sapabilmektedir [19]. Bu nedenle mevcut yazılımların ve hesaplama yöntemlerinin

iyileştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu gerçekleştiğinde teknik çizimlerden iş programının hazırlanmasına kadar olan süreç tamamen otomasyonla yürütülebilecektir.

2.2. Hava Koşullarının İş Verimine Etkisi

İnşaat işleri ağırlıklı olarak açık alanda yapıldığı için işin süresi ve maliyeti hava şartlarından etkilenmektedir. Özellikle inşaat süresinin uzaması nedeniyle oluşabilecek gecikme cezaları yükleniciler için önemli bir risk oluşturmaktadır. Sepasgozar vd. inceledikleri inşaatların gecikme nedenlerini araştıran 94 makalenin 10'unda gecikmenin hava durumu kaynaklı olduğunu belirtmiştir [20]. Larsson ve Rudberg sahada imal edilen beton duvar inşaatının hava koşullarından etkilenmesini benzetim tabanlı inceleyerek rüzgârın iş verimine etkisini tahmin etmiştir [21]. Maqsoom vd. küçük firmaların gecikme nedenleri arasında hava koşullarının etkili olduğunu belirtmiştir [22]. Hurlimann vd. sektör paydaşları ile gerçekleştirdikleri anket çalışması sonucunda Avusturalya inşaat sektörünü en çok etkileyecek etkenlerin başında inşaat sırasında görülebilecek sıra dışı hava olaylarının geldiğini belirlemiştir [23]. Russo inşaat işlerinde hava durumundan kritik ölçüde etkilenen işleri kazı, fore kazık, kalıp, betonarme çeliğinin yerleştirilmesi, beton dökümü, betonun kürü, su yalıtımı, geri dolgu, dış duvar örümü, dış cephe doğramaları, çatı işleri ve dış cephe boyası olarak özetlemiştir [24]. Smith ve Hancher yağmurun inşaat süresinin uzamasında mücbir sebep olup olamayacağına bulanık mantık ile karar veren bir model oluşturmuştur [25]. Markov süreci ile geçmiş yılların yağış verilerini kullanarak hava durumu modeli oluşturmuş ve inşaat süresine etkisini benzetimle tahmin etmiştir. Kazı, boya, beton dökümü, çevre düzenlemesi ve yapısal çelik montajını yağmurdan etkilenen işler olarak sınıflandırmış ve modellemiştir.

Li mevsimsel şartlara göre bir ay içerisinde kaç gün iş kaybı olacağını kurduğu matematiksel model ile belirlemiş ve buna göre takvimli iş programı oluşturmuştur [26]. Apipattanavis vd. yol inşaatlarında görülen olumsuz hava koşullarından kaynaklanan gecikmelerin tahminini ve niceliğini belirleyen bir çerçeve sistem geliştirmiştir [27]. Shan ve Goodrum çelik yapı inşaatlarında inşaat süresine sıcaklık ve nem oranının etkisini YBM ile modelleyerek tespit etmişlerdir [28]. ABD'nin çeşitli eyaletlerinde inşa edilen ve edilecek olan tip mağaza inşaatları sıcaklık ve nem oranlarına göre Koehn ve Brown [29] tarafından sunulan iş verimi tablosundan yararlanılarak modellenmiştir. Jung vd. inşaat işinin gerçekleştirildiği konumun yer seviyesinden yüksekliğinin artmasının inşaat süresini hava koşullarından daha fazla etkilenir hale getirdiğini belirtmiştir [30]. Literatür taraması yapılan çalışmaların ağırlıklı olarak mevsimsel ve çevre koşullarının iş verimine etkisini inceleyip gecikme cezası ödenmesine veya sözleşme maddelerinde mücbir sebep sayılabileme durumunun oluşma koşulunu incelemeye yönelik olduğunu göstermektedir. Ayrıca yapılan çalışmalar sıcaklık, nem, rüzgâr, yağış durumu, inşaatın yer seviyesinden yüksekliği etkenlerinden sadece birini ele alıp belirtilen etkenlerin birlikte etki etmesinin sonuçlarını incelememişlerdir. Bu çalışmada hava ve çevre koşullarının etkisinin beraber değerlendirildiği bir yaklaşım önerilmektedir. Olumsuz hava koşulları tüm iş kalemlerini eşit oranda etkilemediği için yavaşlama tüm iş kalemleri için aynı olmamaktadır. Özellikle dış cephe panelleri gibi yüzey alanı büyük yüklerin kule vinç ile taşınması sırasında rüzgârın şiddetli olduğu durumlarda işin durdurulmasına sık rastlanmaktadır. Hava tahminlerinin en büyük hata kaynağı geçmiş yılların iklim verilerine dayalı tahmin yapılmasıdır. Küresel iklim değişimiyle mevcut hava

koşulları geçmiş yıllardaki hava olaylarından ayrılmaktadır. Fakat geçmiş verilere dayalı tahmin modelinden daha yüksek doğrulukta tahmin sunan başka bir model bulunmamaktadır.

2.3. İş Programının Optimizasyonu

Ön analizlerle oluşturulan iş programı her zaman inşaat koşullarına en uygun iş programı olmayabilir. İnşa edilecek yapıdan elde edilecek gelirler, sözleşmede taahhüt edilen bitirme süresi, gecikme cezası ile şantiyenin genel giderleri dikkate alınarak iş programı optimize edilmelidir. İş kalemlerinin süresi ile inşasının doğrudan maliyetleri arasında ters orantılı bir ilişki bulunmaktadır [31, 32]. Doğrudan maliyet ile genel giderler toplamının en düşük değerinin bulunması gereklidir. Belirtilen problem zaman-maliyet ödünleşim problemi (ZMÖP) olarak tanımlanır ve bu problemin çözümü ile inşaat süresi ekonomik koşullar göz önüne alınarak en uygun duruma getirilir. Wang vd. ZMÖP'ü baskın olmayan sıralamalı genetik algoritma ile inşaat kalitesini de göz önüne alarak çözmüştür [33]. Liu vd. kesikli simbiyotik organizma aramasını uygulamıştır [34]. ZMÖP'e kaliteye ek olarak çevre duyarlılığını Banhashemi ve Khalilzadeh ekleyerek veri zarflama analizi ile çözmüştür [35]. Abdel-Basset vd. belirsiz inşaat sürecini nütrosifik sayılarla modelleyerek stokastik ZMÖP'ü çözmüştür [36]. Toğan ve Eirgash ZMÖP'ü probleme özel popülasyon üreten bir algoritma ile çözmüştür [37]. Eirgash vd. öğretim ve öğrenme tabanlı optimizasyon algoritması ile ZMÖP'ü çözmüştür [38]. ZMÖP şebeke analizi yöntemi ile de çözülmüştür [39].

İnşaat sürecinde teknik ve ekonomik etkenlerden dolayı kaynaklar üzerinde kısıtlamalar bulunmaktadır. İnşaat boyunca bazı aktivitelerin beraber yürütülmesi durumunda ihtiyaç duyulan kaynak miktarı temin edilebilen miktarın üzerine çıkmakta ve gerekli kaynaklar temin edilemediği için kaynak çakışması yaşayan bazı aktivitelerin geciktirilmesi zorunlu hale gelmektedir. Temin edilebilen kaynak miktarı göz önüne alınarak en kısa sürede inşaatın tamamlanmasına olanak sağlayan Kaynak Kısıtlı İş Programı Problemi (KKİPP)'nin optimum çözümü inşaat süresi ve maliyetlerinin düşürülebilmesi için oldukça önemlidir. Zhu vd. ayrık zıt çoklu versiyon optimizasyon algoritması ile çok kaynaklı KKİPP'yi çözmüştür [40]. Lin vd. genetik programlamalı hiper sezgisel yöntemle çok kaynaklı KKİPP'yi çözmüştür [41]. Pellerin vd. KKİPP çözümü için uygulanan hibrit üst sezgisel yöntemlerle, Birjandi ve Mousavi stokastik KKİPP'yi sezgisel yöntemle, çok kaynaklı KKİPP'yi Laszczyk ve Myszkowski çok amaç fonksiyonlu evrimsel gelişim algoritması ile çözmüştür [42-44]. Chakraborty vd. çok modlu KKİPP'yi modifiye edilmiş değişken komşulu arama sezgisel yöntemi ile Tirkolae vd. çok amaç fonksiyonlu çok modlu KKİPP'yi Pareto tabanlı algoritmalarla, Creemers stokastik KKİPP'yi aktiviteleri istenildiği zaman yarıda kesip bir süre geçtikten sonra devam ettirecek şekilde çözmüştür [45-47]. Arab vd. KKİPP'yi çok amaçlı evrimsel algoritma ile çözmüştür [48]. Erzurum ve Bettemir inşaat işlerinin kaynak dengeleme problemini paralel hesaplama ile çözmüştür [49].

Literatürde ZMÖP ile KKİPP'nin birlikte çözüldüğü çalışmalar da bulunmaktadır. Lotfi vd. zaman-maliyet ödünleşimine kalite, enerji ve çevre etkilerini de dahil ederek modellemiştir. Ayrıca temin edilebilen kaynak miktarları üzerindeki kısıtları da dikkate alarak doğrusal olmayan programlama ile bir altgeçit inşaatının iş programını optimize etmiştir [50]. Sharma ve Triverdi zaman-maliyet ödünleşimine kalite ve iş güvenliğini ekleyerek modellemiştir. Temin edilebilen kaynak miktarları üzerindeki kısıtları da dikkate alarak baskın olmayan

sıralama genetik algoritma ile iş programını optimize etmiştir [51]. Amiri vd. baskın olmayan sıralama genetik algoritma ile [52], Albayrak parçacık sürü optimizasyonu ile genetik algoritmayı birleştirerek hibrit bir algoritma ile [53] Banihashemi ve Khalilzadeh veri zarflama analizi ile ZMÖP ile KKİPP'yi birlikte çözmüştür [54]. Kannimuthu vd. ikili tamsayılı programlama algoritması ile ZMÖP ile KKİPP'yi birlikte çözmüştür [55]. Heravi ve Moridi tekrarlayan işlerden oluşan inşaat işleri için ZMÖP ile KKİPP'yi parçacık sürü optimizasyonu ile birlikte çözmüştür [56].

Literatürde yer alan çalışmalarda ZMÖP ve çok modlu KKİPP hipotetik problemler üzerinden çözülmüştür. Hem ZMÖP hem de KKİPP için tüm iş kalemlerini kapsayacak şekilde farklı yapım alternatiflerinin oluşturulması önemli miktarda iş yükü gerektirdiği için inşaat sektörü tarafından literatürdeki teorik çalışmalar uygulama alanında fazla karşılık bulamamaktadır. Bu çalışmada hem ZMÖP, hem de KKİPP için tüm aktivitelere insan müdahalesi olmadan farklı yapım alternatifleri oluşturup aktivite sürelerine göre kaynak miktarını hesaplayan bir yaklaşım geliştirilmiştir. Bu sayede metraj verileri kullanılarak ZMÖP ve KKİPP için gerekli veriler hesaplanarak temin edilebilen kaynak miktarları dikkate alınarak en uygun iş programı oluşturulabilecektir. Ayrıca, dünyayı etkileyen COVID-19 pandemi sürecinde kalabalık ortamlarda çalışmaktan mümkün olduğunca kaçınılarak inşaat sırasında ekip sayıları düşürülmüş ve inşaatlardaki insan yoğunluğu azaltılmıştır. Bu nedenle birçok şantiye için KKİPP'nin çözülmesi gerekmiştir. Pandemi sürecinin dışında da inşaatlarda iş güvenliğini sağlamak veya genel giderleri düşürmek için inşaatta çalışan işçi sayısına kısıtlamalar getirilebilmektedir. Personel ve iş makinesi sayısını azaltılırken inşaat süresini aşırı arttırmamak önemli bir sorundur. Literatürde zaman-maliyet ödünleşim problemi ile kaynak kısıtlı iş programının çözümü problemin kolay tanımlanabilmesi ve hesap yükünün azaltılması için mevsimsel ve mekânsal etkiler göz ardı edilerek iş veriminin sabit kaldığı kabul edilerek oluşturulmaktadır. Bu çalışmada bütünsel bir yaklaşım geliştirilerek mevsimsel ve mekânsal etkenlerin iş verimi üzerindeki etkileri optimizasyon sürecine dâhil edilerek ZMÖP ve KKİPP gerçek koşullara daha yakın biçimde oluşturulup optimize edilerek literatüre özgün katkı sağlanmıştır.

3. YÖNTEM

İnşaat sürecinin bütünsel biçimde yönetimi ve optimizasyonu; metraj hazırlama, iş kalemlerinin kaynak gereksinimlerinin belirlenmesi, iş programının oluşturulması, iklim ve ortam koşullarına göre günlük iş veriminin hesaplanması, ekiplerin çalışma günlerine göre takvimli iş programının oluşturulması, iş programının kaynak ve süre kısıtlarına göre optimize edilmesi adımlarından oluşmaktadır. Çalışmada uygulanan yöntemlerin detayları bu bölümde kısaca özetlenmiştir.

3.1. Metraj Hesaplanması

Metraj hesaplama işlemi bina inşaatına ait iş kalemlerinden kazı, iksa sistemi, geri dolgu, su yalıtımı, kalıp, donatı, kalıp iskelesi, beton, dış duvar, iç duvar, iş iskelesi, sıva, boya, fayans, yer döşemesi, kapı ve pencere doğrama işleri için gerçekleştirilmiştir. Yapısal ve mimari elemanlar arasındaki temasın belirlenebilmesi ve dolayısı ile metrajın doğru hesaplanabilmesi için tüm yapısal ve mimari elemanlara tanımlayıcı anahtar öznitelik

atanmıştır. Kolonların köşe koordinatları, kirişlerin hangi kolonlara bağlandığı, saplama kiriş ise kirişin köşe koordinatları, döşemelerin hangi kirişlerle çevrelendiği, duvarların başlangıç ve bitiş koordinatları tanımlanmıştır. Yapısal elemanlara ek olarak tüm mimari elemanların geometrisi de düğüm noktalarıyla tanımlanmıştır. Düğüm noktaları ve düğüm noktalarının koordinatları kullanılarak elemanlar arasında komşuluk ilişkileri kurulabilmektedir. Bu sayede elemanların kesişim noktaları tespit edilip minhalar hesaplanabilmekte ve elemanların boyutu veya konumu değiştiğinde tüm metraj değerleri güncellenebilmektedir. Metraj birimi uzunluk olan süpürgelik gibi iş kalemleri imalatın sınırlarını belirleyen düğüm noktaları arasındaki mesafe hesaplanarak elde edilmektedir. Yer döşemesi, duvar gibi metraj birimi alan olan iş kalemlerinin metrajı düğüm noktaları ile oluşturulan poligonun alanı hesaplanarak belirlenir. Beton, kalıp iskelesi gibi metraj birimi hacim olan iş kalemlerinin metrajı ise dikdörtgen prizmanın taban alanının belirlenip yükseklikle çarpılması ile hesaplanmıştır. Binalarda üst katlara çıkıldıkça taşıyıcı sisteme daha az donatı konulması, taşıyıcı sistemin boyutlarının küçültülmesi, kat alanlarının düşürülmesi ile karşılaşılabilmektedir. Bu nedenle metraj hesaplaması binanın tüm katları için tekrarlanmıştır.

Yapı elemanlarının metrajı belirli hesaplama kuralları tanımlanarak gerçekleştirilmiştir. Kolonların beton metrajı hesaplanırken kolonun eni, boyu ve kat yüksekliği değerleri çarpılır. Kirişlerin beton metrajı hesaplanırken kirişin yüksekliği ve kalınlığı ile kiriş açıklığı çarpılır. Kiriş açıklığı verisi doğrudan tanımlanmamıştır. Kirişin saplandığı kolonlardan yararlanılarak kirişin ham açıklığı tespit edilir. Kiriş x doğrultusunda uzanmakta ise başlangıç kolonunun x boyutu, aksi durumda ise başlangıç kolonunun y boyutu ham açıklıktan düşülerek net kiriş açıklığı hesaplanır. Kirişin net açıklığı hesaplanırken kirişin başlangıç ve bitişinde yer alan kolonların tespit edilmesi için tüm kolon ve kirişlerin tanımlayıcı anahtar öznitelikleri taranır ve eşleşen anahtar öznitelik verilerinden yola çıkarak kesişen kolon ve kirişler belirlenir. Yapısal ve mimari elemanlar arasında kolon-döşeme, kiriş-döşeme, duvar-kolon, duvar-kapı, duvar-pencere, lento-kapı, lento-pencere eşleşmeleri için anahtar öznitelikleri taranmaktadır. Belirtilen tarama sonucu kesişen elemanlar tespit edilmekte ve elemanın boyutu, konumu ve açıklığı verilerinden kesişim büyüklüğü hesaplanıp minha edilmektedir. Bu şekilde metraj hesaplamaları yüksek doğrulukta gerçekleştirilmekte ve planda olabilecek revizeler sonucunda sadece ilgili elemanın konumu ve boyutunu ifade eden değerler değiştirildiğinde en az insan emeği ile metraj değerleri güncelleştirilebilmektedir.

3.2. İş Kalemlerinin Kaynak Gereksinimlerinin Belirlenmesi

Metrajı hesaplanan iş kalemlerinin inşa edilebilmesi için gereken işçilik, malzeme, iş makinesi ve ekipman ihtiyaçlarının hesaplanması inşaat firmasının daha önceden gerçekleştirmiş olduğu işlerde ortaya çıkan birim işin yürütülmesi için ihtiyaç duyulan kaynak miktarı kullanılarak hesaplanabilir. Fakat her firma farklı usulde analiz yapabileceği için bu çalışmada tüm inşaat sektörü tarafından kabul görmüş olan Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın yayınladığı birim fiyat analizlerinden yararlanılarak kaynak ihtiyacı hesaplanmıştır. Bir iş kaleminin inşası farklı yöntem veya malzeme ile gerçekleştirilebileceği için aynı iş kalemi için birden fazla iş tanımı oluşturulmuştur. Örneğin kalıp işi plywood veya kereste ile yapılabileceği gibi yer döşemesi; halıflex, marley, granit, laminat parke, karo, seramik, terrazo gibi farklı malzeme ve teknikle inşa edilebilmektedir. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yayımlanan poz tariflerindeki

işçilik ihtiyaçları maliyet analizinde kullanıldığı için işin yürütülmesi sırasında işçilerin boşta kalacağı durumlarda da yevmiye ödeneceğini kabul etmektedir. Gerçek işçilik değerlerini elde etmek için pozlarda yer alan işçilik ihtiyaçları bu durum dikkate alınarak ikiye bölünmüş ve adam.saat hesaplamaları revize edilmiş birim işçilik ihtiyaçları dikkate alınarak hesaplanmıştır. Fakat iş makinesi operatörleri ve fore-kazık makinesinin delmesi sırasında pasayı uzaklaştırmakla görevli olan işçilerin çalışma süreleri olduğu gibi kullanılmıştır.

İş kaleminin metraj değeri ile birim imalatın gerçekleştirilmesi için ihtiyaç duyulan kaynak miktarları çarpılarak iş kaleminin inşası için gerekli kaynak ihtiyacı tahmin edilmektedir. Tüm iş kalemleri ilgili poz listesi ile eşleştirilerek iş kalemlerinin kaynak ihtiyaçları hesaplanmıştır. Bir iş kalemine atanan iş tarifinin uygulanma değişkeni 1 değerini alırken atanmayan iş tariflerinin uygulanma değişkenlerinin alacağı değerler 0 olur. Katlara göre metraj değerlerinin değişebilecek olması sonucu malzeme ve kaynak ihtiyaçlarının hesaplanması Eşitlik 1’de gösterilen şekilde ilişkilendirilerek gerçekleştirilir.

$$\begin{aligned}
 AS_{j,b,l} &= (Metraj_{j,b}) * \sum_{x=1}^{ps} POZ_{x,l} * \delta_{j,b,x} \\
 MS_{j,b,m} &= (Metraj_{j,b}) * \sum_{x=1}^{ps} POZ_{x,m} * \delta_{j,b,x} \\
 M_{j,b,k} &= (Metraj_{j,b}) * \sum_{x=1}^{ps} POZ_{x,k} * \delta_{j,b,x}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Eşitlik 1’de $AS_{j,b,l}$ b’ninci kattaki j ’ninci aktivitenin tamamlanması için tayin edilmesi gereken l ’ninci personel sınıfının adam.saat değerini, $MS_{j,b,m}$ j ’ninci aktivitenin tamamlanması için tayin edilmesi gereken m ’ninci makine-ekipman sınıfının makine.saate değerini, $M_{j,b,k}$ j ’ninci aktivitenin tamamlanması için kullanılması gereken k ’ninci malzeme sınıfının miktarını, $Metraj_{j,b}$ j aktivitesinin b ’ninci kattaki toplam metrajını belirtmektedir. POZ_j j ’ninci aktivitenin iş tarifini, $\delta_{j,b,x}$ b ’ninci katta gerçekleştirilecek j iş kalemi için atanabilecek x iş tariflerinin uygulanma değerini ifade etmektedir. $\delta_{j,b,x}$ sadece 0 veya 1 değerini alabilir ve $\sum_{x=1}^{ps} \delta_{j,b,x} = 1$ ’dir. ps sisteme tanımlı poz sayısını ifade etmektedir.

3.3. Aktivite Süreleri ve Ekip Sayıları

İş paketlerinin süreleri ve ekip büyüklüğünün belirlenmesi kaynak ve süre kısıtı olmak üzere 2 farklı biçimde yapılabilmektedir. Birinci durum aktivitenin yürütülmesi sırasında temin edilebilen kaynak miktarının kısıtlı olması durumunda görülür. Genellikle iş makinesi kullanılan iş kalemlerinde kaynak kısıtı oluşur. İşin süresi, seçimi yapılan iş makinesinin sayısı ve kapasitesine göre belirlenir. İkinci durumda ise aktivitenin istenilen tamamlanma süresine göre ekibin büyüklüğü hesaplanır. Buna karşın ekip sayısında sınırlama olduğu için personel kısıtına göre sürenin belirlendiği durumlar olabilmektedir.

3.3.1. Kaynak teminine göre planlama

Aktivite için temin edilebilen kaynak miktarına göre birim zamanda gerçekleştirilebilecek imalat miktarı belirlenir. Toplam imalat miktarının birim zamandaki imalat miktarına bölünmesi ile iş günü birimindeki imalat süresi Eşitlik 2’de belirtildiği şekilde hesaplanır.

$$\begin{aligned} \frac{TI_j * BIS_j}{GCS} < 1 \quad \text{ise } \{ \\ \left[\frac{GCS}{TI_j * BIS_j} \right] * TI_j * BIS_j < 11 \quad \text{ise } \{ IS_j = \left[\frac{GCS}{TI_j * BIS_j} \right] \} \\ \text{değilse} \quad IS_j = \left[\frac{GCS}{TI_j * BIS_j} \right] \} \\ \text{değilse} \quad IS_j = \frac{GCS}{TI_j * BIS_j} \end{aligned} \quad (2)$$

Eşitlik 2’de IS_j , j aktivitesinin bir günde gerçekleştirilen imalat sayısını, TI_j j aktivitesinin içerdiği bir imalatın tamamlanması için gereken iş miktarını, BIS_j birim işin süresini, GCS günlük çalışma süresini ifade etmektedir. Yürürlükteki İş Kanunu gereği günde 11 saatten fazla çalışmadığı için fazla mesai çalışma süresi en fazla 11 saat olabilecek şekilde Eşitlik 2 düzenlenmiştir. “ \lceil ” matematiksel sembolü yukarı yuvarla, “ \lfloor ” matematiksel sembolü aşağı yuvarla anlamına gelmektedir. İş makinesi sayısı ve modeline göre aktivite süresi belirlenmesine Y.16.060/07 poz numarası ile tarif edilen 80 cm çapında fore kazık imal edilmesi pozu üzerinden örnek verilebilir. Poz tarifinde 1 metre fore kazık imalatı için iş makinesinin 0,31 saat çalışması gerektiği belirtilmiştir. Bir adet fore kazık boyu ile birim imalatın süresi çarpılarak bir fore kazık kuyusunun açılması için makinenin çalışması gereken süre hesaplanır. Eşitlik 2 kullanılarak bir günde kaç fore kazık imalatı yapabileceği hesaplanabilir. Günlük çalışma süresi içinde inşaatı yarım kalan fore kazık işinin bitirilmesi günlük 11 saat çalışma sınırını aşmadan gerçekleştirilebiliyorsa fazla mesai ile fore kazık imalatı tamamlanmakta, o gün içerisinde bitirilemiyorsa yarım kalacak fore kazık işine başlanmamaktadır. Bir aktivitenin inşası başka bir aktivitenin yapılmasını içeriyorsa, alt aktivitenin günlük adam.saat ihtiyacı ve kaynak sayısı sırası ile Eşitlik 3 ve 4’te belirtildiği gibi hesaplanır.

$$G_AS_l = IS_j * Metraj_{j,a} * POZ_{a,l} \quad (3)$$

$$P_{l,j} = \left\lceil \frac{G_AS_l}{GCS} \right\rceil \quad (4)$$

Eşitliklerde G_AS_l , l ’nci personel grubunun a alt aktivitesi için bir günde çalışması gereken adam.saat miktarını, $Metraj_{j,a}$ birim miktardaki j ’nci aktivitenin inşa edilebilmesi için yapılması gereken a alt aktivitesinin miktarını, $POZ_{a,l}$ ise birim a aktivitesinin tamamlanabilmesi için gereken l personel sınıfının çalışma miktarını, $P_{l,j}$ l personel sınıfından j aktivitesi için tayin edilen çalışan sayısını ifade etmektedir. Günlük fore kazık imalat sayısının belirlenmesi ile bir gün içerisinde fore kazıkların her biri için gereken donatı miktarı metraj verilerinden hesaplanmaktadır. Donatı işçiliğinin belirlenmesi Y.23.014 poz numaralı Ø8-Ø12 mm nervürlü beton çelik çubuğu, çubukların kesilmesi, bükülmesi ve yerine

konulması ve Y.23.014 poz numaralı Ø14- Ø28 mm nervürlü beton çelik çubuğu, çubukların kesilmesi, bükülmesi ve yerine konulması poz tarifleri ile gerçekleştirilmiştir. Günlük imal edilecek donatı miktarı ile belirtilen poz tariflerindeki işçilik miktarları çarpılarak gereken işçilik miktarı adam.saat biriminde Eşitlik 3 ile hesaplanmaktadır. Bu iş için gereken donatı ekibi günlük çalışma saati göz önüne alınarak Eşitlik 4 ile hesaplanmaktadır.

3.3.2. Süre kısıtına göre planlama

Aktivitenin istenilen sürede tamamlanabilmesi için ihtiyaç duyulan kaynak kullanımını sağlayacak personel ve makine miktarları Eşitlik 5'te ifade edilmiştir.

$$P_{l,b,j} = \left[\frac{AS_{j,b,l}}{GCS * Süre_j} \right] \quad IM_{m,b,j} = \left[\frac{MS_{j,b,m}}{GCS * Süre_j} \right] \quad (5)$$

Eşitlik 5'te yer alan $Süre_j$ ifadesi j 'nci aktivitenin çalışma günü birimindeki süresini, $AS_{j,b,l}$ ve $MS_{j,b,m}$ b 'nci kattaki j 'nci aktivitenin l 'nci personel sınıfındaki adam.saat ve m 'nci iş makinesi grubundaki makine.saat birimindeki kaynak ihtiyacını belirtmektedir. Kaynak miktarı tam sayı olacağı için bulunan küsurat yukarı yuvarlanacaktır.

3.4. Takvimli İş Programının Oluşturulması

İş programları genel olarak iş günü dikkate alınarak hazırlandığı için bu kısımda önce iş gününe göre iş programının, ardından takvimli iş programının hazırlanış yöntemi açıklanmıştır. Çok katlı bir bina inşaatı her katta tekrar eden işlerden oluşacağı için doğrusal iş programı ile iş programının hazırlanması tercih edilmiştir. Bu sayede optimizasyon sürecine dâhil olan parametre sayısı kritik yol yöntemi ile kıyaslandığında önemli ölçüde azalacaktır. Tekrarı olmayan kazı, su yalıtımı, temel donatı, temel kalıp, temel betonu ve temel betonu priz alma iş kalemleri başlayınca biter ilişkisi ile doğrusal iş programı dışında çizelgelenmiştir. Bodrum katların kalıp ve donatı iş kalemleri temel betonunun priz alma süresi tamamlanınca başlamaktadır. Bir katın kaba inşaat süresi, kalıp ve donatı inşaat süresinin uzun olanına beton döküm süresi ve beton priz alma süresi eklenerek hesaplanmaktadır. Belirtilen aktiviteler iş grubu olarak gruplanıp doğrusal iş programı ile iş çizelgesi hazırlanmıştır. Bir kat kaba inşaatının ok diyagramı Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1 - Bir kat kaba inşaatının ok şebeke diyagramının gösterimi

Binanın kaba inşaatının iş günü birimindeki tamamlanma süresi bir kat kaba inşaat süresinin toplam kat sayısı ile çarpılması ile hesaplanır. Kaba inşaat işinden sonra başlayacak

aktivitenin başlangıç zamanı kaba inşaatın başlangıç zamanından daha erken, bitiş zamanı ise kaba inşaat işinin bitiş zamanından daha erken olamaz. Belirtilen kısıtlara ek olarak iş güvenliği ve mekânsal çakışma olmaması için birbirini takip eden aktiviteler arasında en az 1 kat aralık olması gereklidir. Belirtilen koşul Eşitlik 6'da ifade edildiği gibi tanımlanmaktadır.

$$BZ_j = \text{MAK} \{BZ_{j_ard} + T + \text{Süre}_{j_ard}; TZ_{j_ard} + T - \text{Süre}_j * (KS - 1)\} \quad (6)$$

Eşitlik 6'da BZ_j j aktivitesinin zemin kattaki başlangıç zamanını, TZ ilgili aktivitenin son kattaki tamamlanma zamanını, T tampon süreyi, j incelenen aktiviteyi, j_ard , j aktivitesinin ardıl aktivitesini tanımlamaktadır. İlk iş kalemi olarak kaba inşaat tanımlanmıştır, bu işin ardından sırası ile duvar, tesisat, sıva, parke fayans, kapı pencere doğramaları ve son olarak boya işleri gelmektedir. İş gününe göre yapılan planlamada iş kalemlerinin başlangıç ve bitiş zamanları doğrusal iş programına göre belirlenerek çalışma günleri, mevsimsel koşullar ve çalışmanın yer seviyesinden yüksekliği dikkate alınmadan iş programı oluşturulur. Eşitlik 6 imalat miktarlarının ve iş verimlerinin tüm katlarda sabit kaldığını varsaydığı için revize edilerek imalat miktarlarının ve iş verimlerinin sabit olma kabulü kaldırılmıştır.

Doğrusal iş programı oluşturulurken aktivitelerin birbirleri ile aynı hızda ilerlemeleri sağlanarak inşaat en uygun sürede tamamlanır. Bu şekilde oluşturulan iş programı ise denge diyagramı olarak adlandırılır. Bu çalışmada her katta yapılan iş miktarının aynı olmaması ve işin yürütülmesi boyunca iş veriminin sabit kalmaması nedeniyle denge diyagramı oluşturulamamaktadır. Aktivitelerin ilerleme hızları her katta aynı olmadığı için Eşitlik 6 kullanılarak aktivitelerin başlangıç zamanları hesaplanamamaktadır. Optimizasyon sürecinde aktivitelere atanan süreye, metraj değerlerine ve iş verimine bağlı olarak ardıl aktivite üst katlarda öncel aktiviteye yetişebilmektedir. Bu durum optimizasyon sürecinin yönetilmesini güçleştirdiği için hesap yükünü düşürmek için ardıl aktivitenin öncel aktiviteye yetişme durumunda ardıl aktivitenin inşasına ara verilmesi çözümüne gidilmiştir. Bu yaklaşım yakınsama ile ardıl aktivitenin öncel aktiviteye yetişemeyeceği başlangıç zamanının hesaplanmasına göre daha az hesap yükü gerektirmektedir. Buna ek olarak Şekil 2 ve 3'te sunulan sırası ile aktivitelere ara vermeden oluşturulan doğrusal iş programı ile aktivitelere ara verilerek oluşturulan iş programları arasında tamamlanma süreleri karşılaştırıldığında ara verilerek yapılan iş programının daha kısa sürede tamamlandığı görülecektir. Bu nedenle doğrusal iş programında aktivitelere ara verebilme seçeneği eklenmiştir.

Ardıl aktivitenin inşaat süresinin öncel aktiviteden daha kısa olması durumunda ardıl aktivitenin iş ortasındaki ara süresi Eşitlik 7'de belirtildiği gibi hesaplanmaktadır.

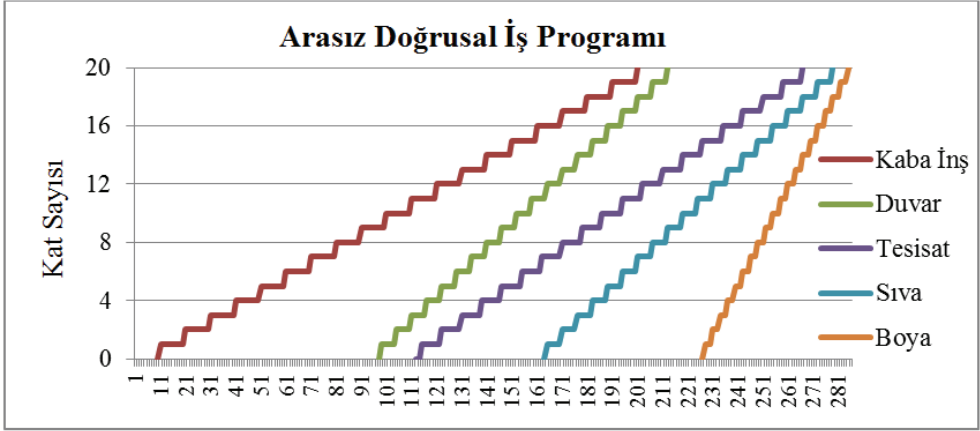
$$ARA_{j_ard} = (KS - A) * (SÜRE_j - SÜRE_{j_ard}) \quad (7)$$

Eşitlik 7'de KS kat sayısı A , binanın kat sayısı değerinin yarısının yuvarlanmış değerini ifade etmektedir.

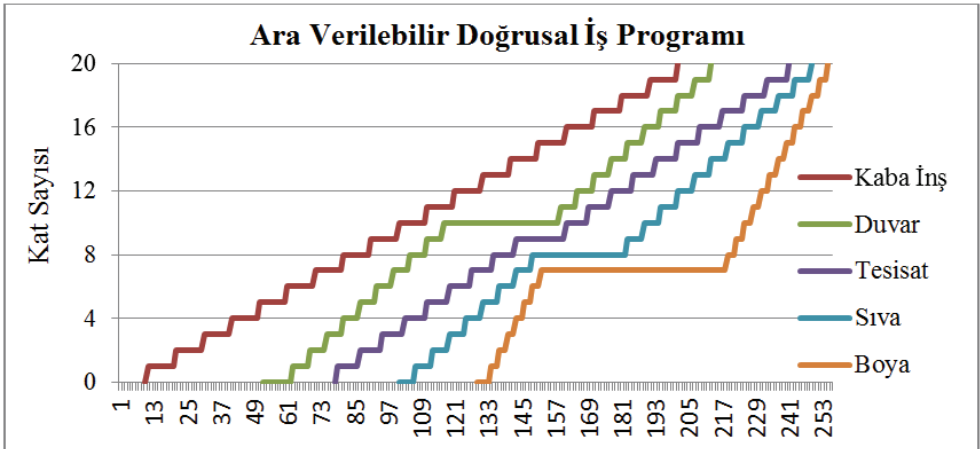
Ara verilerek başlangıç ve tamamlanma zamanı hesaplanmış bir aktivitenin ardılının süresi öncelden daha kısa ise ardıl aktivitenin ara süresi Eşitlik 8'de ifade edildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$ARA_{ard2} = KS * (SÜRE_{ard1} - SÜRE_{ard2}) \quad (8)$$

Eşitlik 8’de ard1 ara verilerek sürdürülen ard1 aktiviteyi, ard2 ise ard1 aktivitesinin ardını ifade etmektedir. Aktivitelere ara verilebildiği doğrusal iş programı Şekil 3’te sunulmuştur. Eşitlik 7 ve 8’de hesaplanan ARA değerleri kadar aktiviteler arası doğrusal iş programına göre daha erken başlatılabilmektedir.



Şekil 2 - Aktivitelere ara verilmeden oluşturulan doğrusal iş programı



Şekil 3 - Aktivitelere 1 kere ara verilebilir doğrusal iş programı

Tüm aktivitelerin her kat için başlangıç ve bitiş zamanlarının belirlenmesinin ardından aktivitelerin gerçekleştirildiği günleri tanımlayan değişkenin değerleri Eşitlik 9’da ifade edildiği gibi belirlenir.

$$\begin{aligned} isg \leq BAS_{j,b} \text{ ve } isg > TAM_{j,b} \text{ ise} & \quad CD_{j,b, isg} = 1 \\ \text{değilse} & \quad CD_{j,b, isg} = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Eşitlik 9'da isg iş günü biriminde inşaatın kaçınıcı günde olduğunu, $CD_{j,b, isg}$ ise j aktivitesinin b 'nci kattaki isg iş günü için çalışma durumunu ifade etmektedir. İş kaleminin belirli bir gün içerisinde yürütülmesi durumunda iş kalemi ve günü temsil eden hücreye "1" değeri, işin yürütülmemesi durumunda ise "0" değeri atanır.

Belirtilen iş programı çalışma günlerinin mevsimsel etkilerinin ve çalışma yüksekliğinin dikkate alınmadığı klasik yaklaşımla oluşturulan takvimli iş programıdır. Sözleşmelerde iş bitirme süresi çalışılan gün sayısı değil takvim günü sayısı olarak tanımlanır. Buna ek olarak, inşaat sürecinde taşeronlarla iş yapılması çok yaygın bir durumdur. Taşeronların tatil günleri farklılık gösterebilir veya aynı anda başka şantiyelerde de çalışabilecekleri için haftanın sınırlı günlerinde şantiyede görev alabilirler. Ayrıca şehir merkezinde beton dökümü veya ağır iş makineleri kullanılarak gerçekleştirilmesi gereken iş kalemlerinin yürütülebilmesi belirli günlerle sınırlandırılmış olabilir. Bu tür iş kalemlerinin iş programı hazırlanırken haftanın hangi günlerinde çalışılabileceği dikkate alınmalıdır. Aktivitenin belirtilen takvim gününde yürütülmesine yönelik sorgulama Eşitlik 10'da gösterildiği gibi yapılmaktadır.

$$\begin{aligned} \text{Haftanın günü}(i) \in ACG_j \text{ ve } CD_{j,b, isg} = 1 \text{ ise} & \quad TCD_{j,b,i} = 1 \\ \text{değilse} & \quad TCD_{j,b,i} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

Eşitlik 10'da i , inşaatın takvimli çalışma gününü ACG_j j aktivitesinin çalışma günlerini, $TCD_{j,b,i}$ j aktivitesinin b 'nci katta i 'nci takvim günü için takvimli çalışma durumunu ifade etmektedir. İnşaatın yürütülebilir dönemde olması inşaat işlerinin tam verimde gerçekleştirileceği anlamına gelmez. İnşaatın sürdürülebilir olduğu dönemlerde hava koşullarının elverişsiz olması, Ramazan ayı dolayısı ile çalışanların oruç tutması ve binanın zemin seviyesinden yüksekliği iş verimini etkilemektedir. Hava koşullarından iş veriminin ne ölçüde etkileceğini Koehn ve Brown soğuk ve sıcak hava koşulları için sırası ile Eşitlik 11 ve 12'de sunulan formüllerle ifade etmiştir [29].

$$P_{so} = 0,0144T - 0,00313H - 0,000107T^2 - 0,000029H^2 - 0,0000357T * H + 0,647 \quad (11)$$

$$P_{si} = 0,0517T + 0,0173H - 0,00032T^2 - 0,0000985H^2 - 0,0000911T * H - 1,459 \quad (12)$$

Eşitlik 11 hava sıcaklığının 50 fahrenheitten daha düşük olduğu, eşitlik 12 ise daha yüksek olduğu durumlarda geçerlidir. Eşitlik 11 ve 12'de T Fahrenheit biriminde hissedilen sıcaklığı, H ise bağıl nemi vermektedir. Ölçülen sıcaklık 10 santigrat derecenin altında ise hissedilen sıcaklık rüzgârın etkisiyle düşmektedir. Soğuk havalarda hissedilen sıcaklığı ölçmek için Koehn ve Brown tarafından sunulan tablo kullanılmıştır [29]. Sıcak havalarda doğrudan güneş altında yapılan çalışmalarda ABD ulusal iş güvenliği ve sağlığı enstitüsü hissedilen sıcaklığın gölgede ölçülen sıcaklıktan 13 Fahrenheit daha fazla olduğunu belirtmiştir [57]. Belirtilen koşullara göre hissedilen sıcaklık, T hesaplanıp Eşitlik 11 veya 12 uygulanır. Çalışma yüksekliğinin iş verimine etkisi Jung vd. tarafından hesaplanan iş veriminin çalışılan kata göre değişimini sunan denklem Eşitlik 13'te sunulmuştur [30].

$$\begin{aligned} b \leq 14 \quad & \text{ise} \quad E_Y = 1 \\ b > 14 \quad & \text{ise} \quad E_Y = 1 - (b - 14)^{0,8} * 0,03 \end{aligned} \quad (13)$$

Ramazan ayı boyunca yürütülen işlerin diğer dönemlere kıyasla daha yavaş ilerlemesi beklenir. Plancının öngörüsü doğrultusunda ne kadar verim kaybı olacağı E_K parametresi ile tanımlanabilir. Ramazan ayında verim kaybı olmayacağı düşünülürse E_K 1 olur. Sıcaklık E_S , yükseklik E_Y ve kültürel E_K verimleri i 'nci takvim günü, j 'nci aktivite ve b 'nci kat için çarpılarak Eşitlik 14'te sunulduğu gibi iş verimi hesaplanır.

$$E_{i,j,b} = E_{S,i,j,b} * E_{Y,i,j,b} * E_{K,i,j,b} \quad (14)$$

Hava koşulları, çalışma yüksekliği ve tatil günleri dikkate alındığında aktivitelerin başlangıç ve bitiş zamanları doğrusal iş programına göre sapacaktır. İş verimi zamana göre değişeceği için sabit bir katsayı ile süre uzatılması mümkün değildir. İş günü biriminde hesaplanan iş kalemlerinin takvimli gün biriminden hesaplanması aktivitenin başlangıcından bitişine kadar takvim günü sayılarak yapılır. İş veriminin dikkate alındığı takvimli iş programında aktivitelerin uygulanıyor olması veya olmaması kararı Eşitlik 15'te belirtildiği gibi alınır.

$$\left\{ (i \geq TAM_{j-\delta}) \vee \left(Süre_j > \sum_{X=TAM_{j-\delta}}^{i-1} E'_{X,j,b} \right) \vee (TCD_{j,b,i} = 1) \right\} \quad \text{ise} \quad E'_{i,j,b} = \min \left(E_{i,j,b}; 1 - \sum_{X=TAM_{j-\delta}}^{i-1} E'_{X,j,b} \right) \quad (15)$$

tersi ise $E'_{i,j,b} = 0$

Eşitlik 15'te $TAM_{j-\delta}$ j 'nci aktivitenin öncelinin tamamlandığı takvim gününü, i inşaatın kaçınıcı takvim gününde olduğunu ifade etmektedir. Aktivitenin i 'nci takvim gününe kadar gerçekleştirilen tamamlanma miktarı iş gününe göre bulunan süreden küçükse o gün aktivitenin yürütüleceği belirlenir ve i 'nci gündeki iş verimi olan $E'_{i,j,b}$ kadarlık kısmı gerçekleştirilir. Aktivitenin son günü $E'_{i,j,b}$ 'den daha az bir kısım kalmışsa sadece kalan kısım kadar iş yapılır.

Aynı aktivitenin verimi hem hava koşullarına hem de çalışma yüksekliğine bağlı olarak değişebileceği için bir iş kaleminin bir kattaki tamamlanma süresi katlara göre değişebilmektedir. Bu nedenle ilk aktiviteden başlayıp tüm aktiviteler için Eşitlik 15 uygulanarak her aktivite için hangi katta ne zaman başlayıp tamamlandığı hesaplanır. Aktivitelerin verim değeri sabit olmadığı için tamamlanma durumları her kat için sayısal integrasyonla belirlenmektedir. İş programının oluşturulması sürecinde verim değerlerinin aktivite ilerleme hızına etkisi ancak Eşitlik 15 uygulandıktan sonra belirlenebildiği için ardıl aktivitelerin öncel aktiviteye yetiştirme durumunun kontrolü ancak aktivitelerin yürütüldüğü günlerin tayin edilip iş programının oluşturulmasından sonra gerçekleştirilebilmektedir. Bu durum Eşitlik 15'in büyük ölçekli işlerde binlerce defa uygulanmasını gerektirmektedir.

3.5. Günlük Malzeme Kullanımı

Gün içinde kullanılan bir malzeme cinsinin miktarı paralel yürütülen ve aynı malzemeye ihtiyaç duyan iş kalemlerinin günlük malzeme taleplerinin toplanması ile elde edilmektedir. İlgili gündeki iş veriminin, iş günü birimindeki aktivite süresine bölümü o gün için aktivitenin

gerçekleştirilme oranını vermektedir. Bu değerin aktivitenin gerçekleştirilmesi için gereken malzeme miktarı ile çarpımı ilgili aktivitenin yapımı sırasında o gün için kullanılacak malzeme miktarlarını verecektir. Eşitlik 16'da i 'nci günde j aktivitesinin yapımı için kullanılacak k sınıfı malzeme miktarını hesaplayan formül gösterilmektedir.

$$MK_{j,b,k,i} = \frac{M_{j,b,k} * E'_{i,j,b}}{Süre_j} \quad (k = 1, \dots, m_j) \quad (16)$$

Eşitlik 16'da $MK_{j,b,k,i}$ k 'nci malzeme türünün, b 'nci kattaki, j 'nci aktivite için i 'nci günde kullanılması gereken miktarını, m_j j aktivitesi için tanımlanmış malzeme sınıfı sayısını, $E'_{i,j,b}$ b 'nci kattaki, j aktivitesinin i 'nci takvim günündeki iş verimini ifade etmektedir. Eşitlik 16 j aktivitesi için ilişkilendirilmiş tüm malzeme türleri için uygulanır. Aktivitelerin ihtiyaç duyduğu k türü malzemeler toplandığında belirtilen sınıftaki malzeme için günlük toplam malzeme miktarı elde edilir. Malzeme miktarının hesabında kalıp tahtası hariç ihtiyaç duyulan malzeme toplanarak belirlenir. İstisna olarak kalıp tahtası beton prizini aldıktan sonra sökülüp tekrar kullanılacağı için sökülmüş olan kalıp imalatları ile toplanmaz. İnşaatın i 'nci takvim gününde k sınıfı malzeme için günlük malzeme kullanımı Eşitlik 17'de belirtildiği gibi hesaplanır. Eşitlik 17'de n , aktivite sayısını ifade etmektedir.

$$GMK_{k,i} = \sum_{j=1}^n \sum_{b=1}^{KS} MK_{j,b,k,i} \quad (17)$$

3.6. Günlük Personel İhtiyacı

Şantiyede çalışan personel sayısı belirlenirken gün içinde yürütülmekte olan aktivitelerde görev alan personel sınıflarında çalışan personel sayılarının tamamı toplanır. İnşaatın i 'nci takvim gününde çalışacak l 'nci sınıfa ait personel sayısı Eşitlik 18 ile hesaplanır.

$$GP_{l,i} = \sum_{j=1}^n \sum_{b=1}^{KS} [E'_{i,j,b}] * P_{l,b,j} \quad (18)$$

Eşitlik 18'de $P_{l,b,j}$ i 'nci günde b 'nci katta çalışan l 'nci personel sınıfını ifade etmektedir. Formülde yer alan verim faktörü $E'_{i,j,b}$ sıfırdan büyük ise yukarı yuvarlanarak 1 değerine sahip olacaktır. Böylece ilgili aktivitenin personel sayısı 1 ile çarpılıp i 'nci günde çalışan personel sayısına eklenecektir. Şantiyenin i 'nci gününde çalışan toplam personel sayısının belirlenmesi i 'nci günde çalışan tüm personel sınıflarına ait ekip sayılarının toplanması ile Eşitlik 19'da belirtildiği gibi hesaplanır.

$$GTP_i = \sum_{l=1}^z GP_{l,i} \quad (19)$$

Eşitlik 19'da, z düz işçi, marangoz, boyacı ustası vb. uygulamaya tanımlanmış personel sınıfı sayısını ifade etmektedir.

3.7. Günlük Doğrudan Maliyet

Şantiyede gerçekleştirilen işlerin doğrudan maliyeti malzeme, işçilik, iş makinesi ve ekipman giderlerinin toplanması ile elde edilir. Rayiç verileri olarak Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı'nın yayınladığı birim fiyat listesi kullanılmıştır. Bir aktivitenin inşaatın i 'nci takvim günündeki günlük doğrudan maliyetinin (AGDM) hesaplanması Eşitlik 20'de ifade edilmiştir.

$$AGDM_{j,b,i} = \sum_{k=1}^y (MK_{j,b,k,i} * BF_{k,y} * E'_{i,j,b}) + \sum_{l=1}^z (P_{l,b,j} * BF_{l,y} * [E'_{i,j,b}]) + \sum_{m=1}^x (IM_{m,b,j} * BF_{l,y} * [E'_{i,j,b}]) \quad (20)$$

Eşitlik 20'de $AGDM_{j,b,i}$ j 'nci aktivitenin, b 'nci katta i 'nci takvim günündeki günlük doğrudan maliyetini, $BF_{k,y}$ k 'ncinci malzeme türünün ilgili yıldaki birim fiyatını, $P_{l,j}$ j aktivitesinin inşaatı için tayin edilen l 'ncinci personel sınıfına ait personel sayısını, $BF_{l,y}$, l 'ncinci personel sınıfına ilgili yılda ödenen birim ücreti, $IM_{m,b,j}$ j aktivitesinin inşaatı için tayin edilen m türü iş makinesinin sayısını, $BF_{m,y}$ m 'ncinci tür iş makinesinin ilgili yıldaki birim fiyatını belirtmektedir. İnşaatın i 'nci takvim gününde inşaat için kullanılan kaynak ve malzemenin belirlenip o yılki rayiç değeri veritabanından getirilir. Rayiçler ile kaynak miktarının çarpılması sonucu ilgili kaynak için gerçekleştirilen günlük maliyet hesaplanır. Tüm aktivite maliyetlerinin toplanması ile şantiyedeki günlük doğrudan maliyet Eşitlik 21'de belirtildiği gibi hesaplanır.

$$GDM_i = \sum_{b=1}^{KS} \sum_{j=1}^n AGDM_{j,b,i} \quad (21)$$

Eşitlik 21'de n toplam aktivite sayısını, GDM_i i 'nci günün toplam doğrudan maliyetini ifade etmektedir. Eşitlik 21 kullanılmadan GDM_i şantiyede harcanan toplam malzeme miktarı ile, kullanılan iş makinesi ve çalışan işçi sayılarından hesaplanabilmektedir. Fakat $AGDM_{j,b,i}$ 'nin hesaplanması ile olası maliyet aşımalarının hangi aktivite veya aktivitelerden kaynaklandığı belirlenebileceği için daha etkin maliyet kontrolü uygulanabilecektir. İnşaatın başlangıcından i 'nci takvim gününe kadar gerçekleşen toplam doğrudan maliyet (TDM) Eşitlik 22'de belirtildiği gibi hesaplanır.

$$TDM_i = \sum_{gün=1}^i GDM_{gün} \quad (22)$$

Doğrudan maliyete ek olarak şantiyede çalışanlara verilen yemek, temizlik, aydınlatma, ısıtma, yapılan işlerin kalite kontrolü ve diğer giderlerden oluşan genel giderler kalemi de bulunmaktadır. Genel giderlerin önceden yüksek doğrulukta kestirilmesi çok güçtür. İnşaat sektöründe genel giderler genellikle geçmişte gerçekleştirilen benzer büyüklükteki işlerde ortaya çıkan genel giderler göz önüne alınarak tahmin edilir. Genel gider değerindeki belirsizliğin yüksek olması nedeniyle inşaat süresi boyunca sabit bir değer alma eğilimi yüksektir. Genel giderler Eşitlik 23'te sunulduğu gibi toplam doğrudan maliyete eklenerek toplam maliyet elde edilir.

$$TM_i = \sum_{gün=1}^i (TDM_{gün}) + GG * i \quad (23)$$

Eşitlik 23'te TM_i inşaatın başından i 'nci takvim gününe kadar olan süredeki toplam maliyeti, GG sabit günlük genel gider tutarını ifade etmektedir. Kontrolörler tarafından kabulü gerçekleştirilen işlerin maddi karşılığının sözleşmede belirtilen şartlara göre yükleniciye ödenmesi hak ediş ödemesi olarak tanımlanır. Hak ediş ve ihzarat ödemeleri sözleşmede belirtilen dönemlerde yapılır. Nakit akışının günlük oluşturulabilmesi için Eşitlik 24'te hak ediş ödemeleri her gün için tanımlı bir ayrık fonksiyon olarak ifade edilmiştir.

$$THE_i = \sum_{gün=1}^i HE_{gün} \quad (24)$$

$$NA_i = THE_i - TM_i \quad (25)$$

$HE_{gün}$ ifadesi ilgili günde elde edilen hak ediş veya ihzarat ödeme miktarını, NA_i ise inşaatın i 'nci takvim günündeki nakit akış durumunu ifade etmektedir.

3.8. Tavlama Benzetimli Genetik Algoritma ile iş programı optimizasyonu

Temin güçlüğü, ekonomik kısıtlar veya pandemi sürecinde olduğu gibi sağlık tedbirlerinden dolayı inşaatçı çalışan personel sayısı üzerinde kısıtlamalar bulunabilir. Personel sayısının düşürülmesi inşaat süresinin uzamasına neden olacaktır. Ayrıca inşaatın genel giderleri ile inşa edilecek tesisten elde edilecek fayda dikkate alınarak en uygun proje süresinin belirlenmesi gereklidir. Bu nedenle gelişmiş bir optimizasyon algoritması uygulanmalıdır. Genetik Algoritma (GA) optimizasyon için oldukça yaygın biçimde kullanılmış bir algoritmadır. GA tarama alanını çaprazlama operatörü ile başarılı biçimde tarayabilmektedir. Fakat yerel aramada çok başarılı değildir. Başarılı biçimde yerel arama yapan tavlama benzetimi ile birleştirilerek tavlama benzetimli genetik algoritma geliştirilmiştir [58]. Daha iyi yerel arama yeteneğine sahip olduğu için bu çalışmada TBGA uygulanarak kaynak kısıtlı zaman-maliyet ödünleşim problemi oluşturulmuş ve TBGA ile iş programı optimize edilmiştir.

Genetik algoritma mayoz bölünme ve doğal seleksiyondan esinlenerek geliştirilmiş bir optimizasyon algoritmasıdır [59]. Başlangıçta uygulanabilir çözümlerden oluşan bir popülasyon rastgele sayılardan üretilir ve yeni bireyler oluşturularak daha iyi çözümler aranır. Popülasyonu oluşturan bireyler rastgelelik içerecek şekilde eşleştirilir ve çaprazlama yapılarak yeni oğul bireyler oluşturulur. Çaprazlama gerçekleştirilirken iyi sonuç veren bireylerin daha yüksek eşleşme ihtimalinin olması oğul bireylerin kalitesini artırır. Çaprazlamaya tabi tutulacak bireylerin belirlenmesi Eşitlik 26'da belirtilen formülle gerçekleştirilir.

$$Ç_i = (1,5 * Pop - Sıra_i) * (2 + rand(1)) \quad (26)$$

Eşitlik 26'da ζ_i 'ninci bireyin çaprazlama uyum değerini, $S_{i,r}$ 'ninci bireyin amaç fonksiyonu değerine göre küçükten büyüğe sıralanmış halde kaçınıcı sırada olduğunu, $rand(1)$ ise 0 ile 1 arasında üretilen rastgele sayıyı ifade etmektedir. Bireyler sahip oldukları uyum değerine göre artan sıralanırlar ve çaprazlama oranı * popülasyon boyutu kadar birey çaprazlama için seçilir ve çaprazlanırlar. Tek noktalı çaprazlama yapıldığı için çaprazlama konumunun belirlenmesi için 1 ile parametre sayısı arasında değer alacak şekilde rastgele sayı üretilir ve parametre kümeleri üretilen sayının belirttiği konumdan parçalanıp çaprazlanırlar.

Çaprazlama için eşleşen bireyler çaprazlama noktasında taşıdıkları genleri değiştirirler ve 2 yeni oğul oluşur. Çaprazlama operatörü sayesinde popülasyonda bulunmayan yeni bireyler oluşturulur ve daha iyi çözümler aranır. Çaprazlama operatörü bireylerin taşıdıkları bilgiyi değiştirmeden yeni bireyler oluşturduğu için popülasyonda bulunmayan bir geni üretemez. Bu nedenle mutasyon operatörü bireylerin taşıdıkları bilgiyi değiştirerek popülasyonda bulunmayan yeni genleri oluşturmak için kullanılır. Mutasyon bireyin taşıdığı genleri rastgele değiştirerek daha iyi birey oluşturmayı amaçlar. Mutasyon operatörünün rastgele değişim yaptığı durumda amaç fonksiyonu iyi olan bireyler üzerinde olumsuz etki etme olasılığı yüksektir. Bu nedenle bu çalışmada mutasyon operatörü tavlama benzetimi ile birleştirilerek hibrit bir yöntem uygulanmıştır [60]. Mutasyona tabi tutulacak bireylerin seçiminde her birey için rastgele sayılar üretilir ve bireyler kendisine isabet eden sayılara göre artan biçimde sıralanır. Sıralamada ilk "mutasyon oranı * popülasyon boyutu" arasına giren bireyler mutasyona tabi tutulur. Mutasyonun gerçekleşeceği konumu belirlemek için 1 ile parametre sayısı arasında değer alacak şekilde rastgele sayı üretilir. Mutasyona tabi tutulacak genin değeri rastgele azaltılır veya artırılır ve amaç fonksiyonu yeniden hesaplanır. Mutasyonun kabul edilme kararı Eşitlik 27'de belirtildiği gibi verilir.

$$Karar \begin{cases} kabul & rand(1) \leq e^{-\frac{(f_0 - f_m)t}{f_e BC}} & ise \\ red & rand(1) > e^{-\frac{(f_0 - f_m)t}{f_e BC}} & ise \end{cases} \quad (27)$$

Eşitlik 27'de f_m ve f_0 sırası ile mutasyona uğramış birey ile mutasyon öncesi bireyin amaç fonksiyon değerlerini, f_e popülasyondaki bireyler arasında en iyi ve en kötü amaç değerleri arasındaki farka eşittir. BC Boltzmann sabiti, t ise süreyi belirtir. Süre genetik algoritma çevrim sayısına eşitlenir.

TBGA tarafından en son uygulanan operatör ise doğal seleksiyondur. Bu çalışmada rulet tekerleği yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde her bireyin uygunluk değeri Eşitlik 26'da belirtilen denklem ile hesaplanır. Bireyler uygunluk değerlerine göre artan biçimde sıralanır ve sıralamanın üst sırasında popülasyon boyutu kadar birey hayatta kalır, diğer bireyler ise yok edilir. Doğal seleksiyon ile popülasyonun büyümesi engellenerek optimizasyon yönteminin hesap yükü makul düzeyde tutulur.

Problemi oluşturmak için şantiyede görev alabilecek en yüksek işçi sayısı ve projenin tamamlanması için izin verilen süre ile genel giderler tanımlanır. Uygulamada kısıtların ihlal edilmemesi esastır fakat optimizasyon sürecinde kısıtları ihlal etmeden rastgele sayılarla başlangıç çözümünün üretilmesi genelde çok mümkün değildir. Bu nedenle kısıtların ihlali durumunda bir ceza fonksiyonu tanımlanır. Verilen ceza ile kısıt ihlal eden çözümler

uygulanabilir çözümlere göre daha yüksek maliyetli olacağı için daha düşük hayatta kalma olasılığına sahip olacaklar ve optimizasyon sürecinin ilerleyen yinelemelerinde yerlerini daha iyi çözümlere bırakacaklardır. Ceza değerlerinin makul büyüklükte olması önemlidir. Proje teslim süresinin aşılması durumunda gün başına ödenecek ceza bedeli süre kısıtının ihlalinde uygulanacak ceza fonksiyonuna eşitlenebilir. Ceza fonksiyonlarının dâhil edildiği amaç fonksiyonu Eşitlik 28'de gösterilmiştir.

$$\min f(\mathbf{X}) = GC * \text{Süre}(\mathbf{X}) + PC * \text{Personel}(\mathbf{X}) + TM_{psür} \quad (28)$$

Eşitlik 28'de \mathbf{X} aktivite sürelerini ifade eden parametre vektörünü, GC gecikme için gün başına ödenecek ceza miktarını, PC izin verilen personel sayısının aşımı durumunda personel başına ödenecek ceza miktarını, $TM_{psür}$ ise Eşitlik 23 uygulanarak hesaplanan ceza fonksiyonları hariç toplam proje maliyetini belirtir. $\text{Süre}(\mathbf{X})$ ve $\text{Personel}(\mathbf{X})$ sırası ile Eşitlik 29 ve 30'da tanımlanmıştır.

$$\text{Süre}(\mathbf{X}) = \begin{cases} psür \leq TS & \text{ise} & 0 \\ psür > TS & \text{ise} & psür - TS \end{cases} \quad (29)$$

$$\text{Personel}(\mathbf{X}) = \sum_{i=1}^{psür} \lambda_i \begin{cases} P_i \leq P_{mak} & \text{ise} & \lambda_i = 0 \\ P_i > P_{mak} & \text{ise} & \lambda_i = P_i - P_{mak} \end{cases} \quad (30)$$

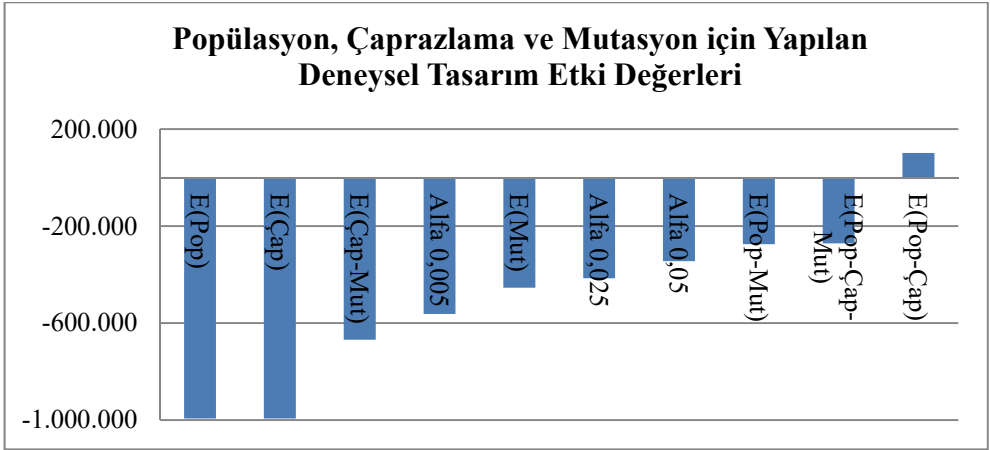
Eşitlik 29 ve 30'da $psür$ aktiviteler için atanan süreler sonucunda elde edilen projenin tamamlanma süresini, TS ise taahhüt edilen proje tamamlanma süresini, P_i i'ninci günde şantiyede gerçekleşen toplam personel görevlendirmesini, P_{mak} ise şantiyede aynı anda çalışmasına izin verilen maksimum personel sayısını ifade etmektedir. Personel kısıtının aşımında ceza fonksiyonunun sadece personel aşımını değil, kaç personelle aşıldığının da dikkate alınması gereklidir. Aksi halde kısıtları aşırı ihlal eden çok kalabalık personel istihdamına yol açan iş programlarına yakınsama eğilimi oluşmaktadır. Aktivite süreleri TBGA algoritması ile değiştirilerek amaç fonksiyonunun en düşük değeri aranmaktadır.

Makul düzeyde hesap yükü ile en uygun çözüme ulaşmak için popülasyon, çaprazlama ve mutasyon oranları dikkate alınarak deneysel tasarım gerçekleştirilmiştir. Deneme sayısı toplam 1000 adet olacak şekilde popülasyon boyutu [25; 50] birey, çaprazlama [0,52; 0,72] ve mutasyon [0,40; 0,80] arasında değişecek şekilde deneysel tasarım gerçekleştirilmiştir. Popülasyon, çaprazlama ve mutasyon için belirtilen alt ve üst sınır değerleri atanarak toplam 8 adet kombinasyon oluşturulmuştur. Rastgeleliği ortadan kaldırmak için her kombinasyon 4'er kere çalıştırılarak toplamda 32 defa optimizasyon süreci tekrar edilmiştir. İncelenen parametrelerin sonuca etkileri Eşitlik 31'de ifade edilen formülle hesaplanmıştır.

$$\begin{aligned} E(A) &= \bar{Y}_{A+} - \bar{Y}_{A-} \\ E(AB) &= 0,5 * [(\bar{Y}_{A+} - \bar{Y}_{A-})_{B+} - (\bar{Y}_{A+} - \bar{Y}_{A-})_{B-}] \\ E(ABC) &= 0,25 * [((\bar{Y}_{A+} - \bar{Y}_{A-})_{B+} - (\bar{Y}_{A+} - \bar{Y}_{A-})_{B-})_{C+} - ((\bar{Y}_{A+} - \bar{Y}_{A-})_{B+} - (\bar{Y}_{A+} - \bar{Y}_{A-})_{B-})_{C-}] \end{aligned} \quad (31)$$

Eşitlik 31’de $E(A)$, $E(AB)$ ve $E(ABC)$ sırası ile bir, iki ve üç bağımlı değişkenin sonuca etkisini ifade etmektedir. A^+ , A bağımlı değişkenine üst değer; A^- , A bağımlı değişkenine alt değer atandığı durumu belirtmektedir. \bar{Y} ifadesi ise ortalama değeri ifade etmektedir. Hesaplamalar sonucunda parametreler arasında Şekil 4’te sunulan ilişkiler belirlenmiştir.

Deneysel tasarım sonuçlarına göre girdi parametreleri ile toplam proje maliyeti arasında negatif korelasyon bulunmaktadır. Özellikle popülasyon ve çaprazlama parametreleri $\alpha = 0,05$; $0,025$ ve $0,005$ değerleri ile yapılan hipotez testlerine göre üst sınır değerinin atanması anlamlı bulunmuştur. Mutasyon oranının arttırılması ise sadece $0,005$ alfa değerine göre anlamlı sonuç verememiştir. Girdi parametreleri arasında sadece popülasyon ile çaprazlama değerlerinin eş zamanlı arttırılması toplam proje maliyetini arttırmaktadır, fakat artış miktarı anlamlı değer eşliğinin altında kalmaktadır. Diğer ikili ve üçlü parametre değeri arttırma eşleşmeleri ise toplam proje maliyetini düşürme eğilimindedir.



Şekil 4 - Popülasyon, çaprazlama ve mutasyon oranlarının toplam maliyet ile etki değerleri

Elde edilen değerler sonucunda popülasyon, çaprazlama ve mutasyon operatörleri için üst sınır değerlerinin atanması sonucunda daha düşük toplam proje maliyetinin elde edileceği belirlenmiştir. Hesaplama sayısını 1000’in çok üzerine çıkarmadan popülasyon boyutu 50 çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin oranı sırası ile %72 ve %80 olarak tayin edilmiştir. Toplam 15 çevrim yapıldığında optimizasyon süreci sonlanmaktadır. Bu şekilde 1190 deneme yaparak en iyi sonuç alınabilecek parametre değerleri tespit edilmiştir.

4. VAKA ANALİZİ

Önerilen proje yönetim sürecinin uygulanması kat kalıp planı Şekil 5’te sunulan 30 katlı bir inşaat projesi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Projenin yapısal ve mimari elemanlarının düğüm noktalarıyla tanımlanmasıyla komşuluk ilişkileri kurulmuş ve metraj hesaplamaları yüksek

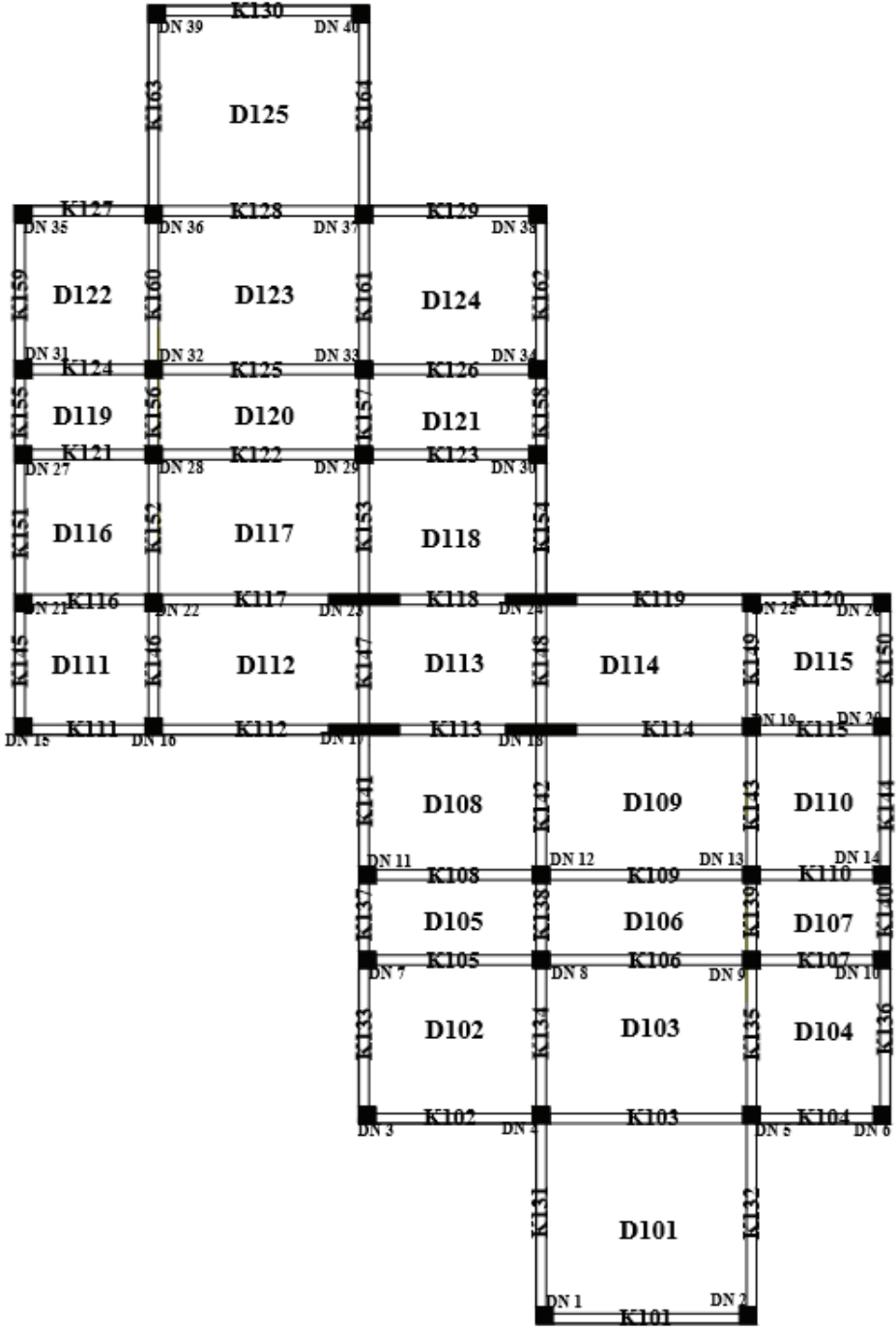
doğrulukta gerçekleştirilmiştir. Aks açıklıkları ile yapısal ve mimari elemanların boyutlarının tanıtılmasıyla Tablo 1’de sunulan metraj değerleri elde edilmiştir.

Aktivitelerin işçilik, iş makinesi ve malzeme gereksinimleri Eşitlik 1 ile hesaplanmaktadır. İlgili imalatların metraj değeri imalat türünden bağımsız biçimde hesaplanır. Elde edilen değer tanımlanmış poz tarifleri ile çarpılır. İmalatın uygulanması kullanıcı tarafından tercih edilmişse ilgili imalar için δ değeri 1, aksi durumda 0 olur. Şekil 6’da temsili olarak döşeme imalatı için işçilik ve malzeme gereksinimi hesaplama süreci gösterilmiştir. Şekil 5’te sunulan kat kalıp planında x doğrultusunda 5, y doğrultusunda 9 adet açıklık bulunmaktadır. Yapıda bulunan döşemelerin yer kaplama malzemelerinin tanımlanabilmesi için Şekil 6’da sunulduğu gibi 9 satır ve 5 sütundan oluşan tablo hazırlanmıştır. Yer döşemesi için granit, mermer, meşe ağacı, karo ve kauçuk malzemeleri kullanılarak yapılan imalatlar hazırlanan uygulamaya tanımlanmıştır. Tabloda bulunan bir döşeme konumu için seçilen imalat türünü tarif eden δ değeri 1, diğer imalat türlerinin δ değerleri 0 olacaktır. Bu şekilde imalat tanımları için parametrelerin değerleri belirlenip Eşitlik 1’de yerine konup ilgili imalat için işçilik ve malzeme gereksinimleri hesaplanmaktadır.

Tablo 1 - Kat kalıp planı Şekil 5’te sunulan yapının zemin kat için hesaplanan metraj değerleri

İnşaat Kalemi	Miktar	Birim	İnşaat Kalemi	Miktar	Birim
Kalıp	1036,71	m ²	Yer Döşemesi		
İnce donatı(8-12)	6,7887	Ton	Doğaltaş	0	m ²
Kalın donatı(14-28)	12,466	Ton	Granit	68,24	m ²
Beton	151,5915	m ³	Mermer	84,625	m ²
Kalıp İskelesi	1419,263	m ³	Meşe Ağacı	128,4	m ²
Dış Duvar	221,97	m ²	Karo	159,595	m ²
İç Duvar	191,48	m ²	Kauçuk	35,015	m ²
Kılıcına Duvar	74,855	m ²	Laminant Parke	0	m ²
Cephe İskelesi	418,2	m ²	Duvar Kaplama		
Dış Cephe Mantolama	293,01	m ²	Boya	1216,63	m ²
Dış Cephe Sıva	304,96	m ²	Traverten	103,8	m ²
Dış Cephe Boya	304,96	m ²	Ahşap	23,69	m ²
İç Cephe Duvar Alçı Sıva	1126,19	m ²	Mermer	81,6	m ²
İç Cephe Kaba Sıva	475,875	m ²	Duvar Fayansı	134,88	m ²

Şekil 6’da sunulan yer kaplaması seçimi veri doğrulaması ile sadece sisteme tanımlı iş tariflerinin seçiminin yapılabileceği bir ara yüz sunmaktadır. Bu sayede analizi yapılamayacak olan bir imalatın seçimi önlenmektedir. Farklı iş sınıfı iç ve dış cephe kaplaması, duvar örülmesi iş kalemlerinde de bulunmaktadır. Belirtilen iş tanımları Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığınca hazırlanmış olan poz tarifleri kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 5 - Örnek projenin kat kalıp planı

Döşemelerin Kaplama Türü					
	1	2	3	4	5
1		Granit			
2	Kauçuk	Meşe Ağacı	Karo		
3	Karo	Meşe Ağacı	Karo		
4	Karo	Meşe Ağacı	Karo		
5	Mermer	Mermer	Mermer	Mermer	Mermer
6			Karo	Meşe Ağacı	
7			Karo	Meşe Ağacı	
8			Karo	Meşe Ağacı	
9				Granit	

Şekil 6 - Döşeme için farklı kaplama türünün seçilebilmesi

Aktivite süresi ve kaynak temini hesaplamaları gün içinde tamamlanması gereken aktivitelerde Eşitlik 3 ve 4 uygulanarak gerçekleştirilmektedir. Gün içinde tamamlanma koşulu iş makinesinin gerçekleştirdiği işlere paralel yürüyen işlerin analizini gerçekleştirebilmek için getirilmiştir. Vaka analizinde derinliği 15,75 metre olan fore kazık imalatları 1 metre delme işini 0,32 saatte gerçekleştirebilen iş makineleri ile yürütülmektedir. Eşitlik 2 ile belirtilen imalat için bir iş makinesinin fazla mesai yaparak günde 2 adet kazık kuyusu delebileceği belirlenmiştir. Bu iş için 3 adet aynı iş makinesi tahsis edildiğinde günde 6 adet fore kazık imalatı gerçekleştirilecektir. Fore kazık işinin iş tarifi delmeyi ve betonlamayı içermektedir. Fakat donatı işini içermemektedir. Bir adet fore kazık için yerleştirilmesi gereken donatı miktarı günlük inşa edilen fore kazık sayısı ile çarpılarak günlük gereken donatı miktarı hesaplanır. Belirtilen hesaplama Eşitlik 3 ile tanımlanmıştır. Donatı miktarının hazırlanması için çalışması gereken personel sayısı ise Eşitlik 4 ile hesaplanır. Belirtilen işlemlerin özeti Tablo 2’de sunulmuştur. İlgili adam.saat hesaplamaları parametre tayin ederek birbirini arasında ilişkilendirildiği için iş makinesi sayısının veya imalat türünün değişimi durumlarında tüm hesaplamalar insan müdahalesi olmadan gerçekleştirilmektedir.

Tablo 2’nin 7 ve 8. satırlarında bir adet fore kazık için kullanılacak fret ve boyuna donatı miktarı ton biriminde belirtilmektedir. Tablonun dokuz ve onuncu satırlarında ise günde 6 adet kazık yapılacak olması nedeniyle günlük kullanılacak donatı miktarları yer almaktadır. Günlük kullanılacak donatı miktarları Ø8-12 ve Ø14-28 ebatlı donatı yerleştirme işlerine ait pozlarda yer alan birim iş için gereken makine kullanımı ve işçilik değerleri ile çarpılarak günlük gereken işçilik değerleri hesaplanır. Belirtilen donatı işleri birim iş için farklı çalışma süresi gerektirmektedir. Bu nedenle her iki iş için gereken iş makinesi ve işçilik değerleri ilgili metraj değerinin iş tarifi ile çarpılır ve çarpım değerleri toplanır. İşçiler için adam.saat, iş makineleri için makine.saat olarak tanımlanan değerler tablonun son dört satırında sunulmaktadır. Sunulan rakamlar bir günde gerçekleştirilen fore kazık imalatları için ihtiyaç duyulan donatının yerleştirilmesi için kaç saat makine ve personelin çalıştırılması gerektiğini ifade etmektedir. Değerlerin yanında parantez içinde sunulan rakamlar ise gereken çalışmayı günlük mesai saati içinde veya 11 saati aşmadan fazla mesai yapılarak kaç işçi veya iş makinesi ile tamamlanabileceğini ifade etmektedir. Belirtilen donatı işi mutlaka 1 günde tamamlanması gerektiği için personel ve makine sayıları işin belirtilen sürede yapılabilmesini sağlayacak şekilde hesaplanmıştır.

Tablo 2 - Fore kazık işinin adam.saat ve metraj hesaplama detayı

İşin Tanımı	Birimi	Miktar
Delgi makinesi	adet	3
Makine Başına Yapılan İmalat	adet	2
Fore Kazık	adet	6
Delgi makinası yakıtı	litre	517,1
Erbab işçi	adam.saat	15,12 (2 işçi)
Düz işçi	adam.saat	15,12 (2 işçi)
Bir fore kazık için gereken (8-12) donatı	Ton	0,058
Bir fore kazık için gereken (14-28) donatı	Ton	0,664
Günlük gereken (8-12) donatı	Ton	0,366
Günlük gereken (14-28) donatı	Ton	4,263
Demir kesme makinesi	saat	8,664 (1 makine)
S.D.U	saat	17,676 (2 işçi)
S.D.U.Y	saat	26,515 (3 işçi)
Düz işçi	saat	48,175 (4 işçi)

Tablo 1’de metraj değerleri sunulan donatı, kalıp, duvar, yer döşemesi gibi iş kalemlerinin süre tayini fore kazık donatı işine göre daha serbest biçimde gerçekleştirilir. Belirtilen işlerin belirli bir süre içinde mutlaka tamamlanma zorunluluğu ancak özel durumlarda oluşabilir. Önce Eşitlik 1 kullanılarak metraj değerleri ile ilgili poz tarifleri çarpılarak adam.saat ve makine.saat değerleri elde edilir. Hesaplanan işçilik değerleri göz önüne alınarak makul bir aktivite süresi tayin edilir ve Eşitlik 5 uygulanarak işin gerçekleştirilmesi için kaç personel ve kaç ekipmanın temin edilmesi gerektiği hesaplanır. Hesaplanan ekip boyutları çok kalabalık veya az olursa aktivite süresi deneme yanılma ile ayarlanarak daha makul büyüklükte ekiplerin oluşturulması sağlanabilir.

Tüm aktivite sürelerinin belirlenmesinin ardından doğrusal iş programına göre iş programı oluşturulur ve Eşitlik 6 uygulanarak iş günü biriminde inşaat süresi belirlenir. Bu aşamada inşaatın kaç iş gününde tamamlanacağı işçilerin farklı tatil günlerine sahip olmayacağı, çalışma veriminin sürekli en üst düzeyde olacağı ve temin edilmesi gereken kaynaklar üzerinde bir kısıt olmadığı varsayılarak belirlenmektedir. Vaka çalışması için kalıp ve donatı işlerinin 9 gün, beton dökümünün 1 gün ve priz süresinin 5 gün olacağı varsayılarak bir kat kaba inşaatın 15 günde tamamlanacağı varsayılmıştır. İnce iş kalemleri olan duvar işinin 10 gün, tesisatın 2 gün, iç cephe sıvasının 3 gün, yer döşemesinin 3 gün, kapı ve pencere doğramalarının 4 gün, cephe iskelesinin kat başına 1 gün, dış cephe mantolama işinin kat başına 6 gün, dış cephe sıva işinin 6 gün, dış cephe boya işinin 7 günde tamamlandığı durumda inşaatın 915 iş gününde tamamlanacağı hesaplanmıştır.

Belirtilen süre hesaplaması hiç tatil yapılmadan çalışıldığı, kaynak temininde hiçbir kısıtın olmadığı ve iş veriminin her zaman en üst düzeyde olduğu varsayımlarına dayanmaktadır.

Belirtilen varsayımlar nedeniyle inşaat süresinin hesaplanan süreden daha uzun sürmesi yüksek olasılıktadır. Bu sebeple iş günü olarak hesaplanan sürede işin tamamlanmasını taahhüt etmek çok risklidir. Tatil günlerini dikkate alarak takvimli iş programını oluşturmak için ilgili aktivitelere Tablo 3'te sunulan ekiplerin tatil günleri atanmıştır. Takvimli iş programı her aktivite 1 gün bile tatil yapsa doğrusallıktan ayrılmaktadır. Çünkü 2 gün süren tesisat işi 3 kat ilerledikten sonra 1 gün tatil yaparken 9 gün süren kalıp ve donatı işleri 1 kat bitmeden tatil yapmaktadır. Bu durum doğrusal hesaplamayı bozduğu için Eşitlik 9 ve 10 uygulanarak iş programı oluşturulabilmektedir.

Tablo 3 - Aktiviteleri yürüten taşeronların izin günleri

İş Adı	İzin Günü
Kalıp	Pazar
Donatı	Cumartesi
Beton Dökümü	Pazar
Priz	YOK
Duvar	Pazar
Tesisat	Cumartesi
İç cephe sıva	Cuma
Yer döşemesi	Perşembe
Doğrama	Perşembe
İç cephe kaplama	Cuma
Cephe iskelesi	Cumartesi
Mantolama	Pazar
Dış cephe sıva	Pazar
Dış cephe boya	Pazar

Tablo 4'te sunulan her 2 iş çizelgesinde aktivitelerin inşaat boyunca aynı iş hızında ilerlediği ve kaynaklar üzerinde bir kısıt bulunmadığı varsayılmıştır. Aktivite süreleri ve ekip büyüklükleri belirlenirken diğer aktivitelerle olan kaynak çakışması durumu incelenmeden iş programı oluşturulmuştur. İnşaat süresince şantiyenin aşırı kalabalık olması salgın hastalık riski artırıp malzeme tedarikini de zorlaştırabilecektir. Buna ek olarak inşaatların yoğunlaştığı dönemlerde kalıpcı, demirci, doğramacı, kaynakçı gibi iş gruplarının yevmiyeleri yükselmektedir. Personel giderlerini çok arttırmamak için istihdam edilecek işçi sayısı üzerinde kısıt uygulamak gerekebilmektedir. Deneme yanılma ile işçi sayısı üzerindeki kısıtların çözülmesi durumunda yüksek maliyetli bir çözüme ulaşılması olasıdır. Çünkü gerçekleştirilebilecek iş programı sayısı trilyonları geçebilmekte ve birkaç deneme sonrası elde edilecek iş programının en iyi çözüme göre daha yüksek maliyetli olması beklenmektedir.

Tablo 4 - İş günü ve takvim gününe göre belirlenmiş aktivite başlangıç ve bitiş günleri

Aktivite	İş Günü		Takvim Günü	
	Başlama	Bitiş	Başlama	Bitiş
Kaba İnş	239	704	241	746
Duvar	409	719	398	760
Tesisat	664	726	693	765
İç cephe sıva	671	764	699	807
Yer döşemesi	676	769	705	813
Doğrama	684	808	710	854
İç cephe kaplama	719	812	755	863
Cephe iskelesi	676	707	710	746
Mantolama	682	868	756	973
Dış cephe sıva	687	873	760	977
Dış Cephe Kaplama	698	915	763	1016

Kaynaklar üzerindeki kısıtların ihlal edilmeden en kısa sürede inşaatı tamamlanmasını sağlayan iş programının belirlenmesi kaynak kısıtlı iş programı problemi olarak tanımlanmaktadır. Bu problemin dışında inşa edilecek binanın kullanımından elde edilecek gelir inşaat süresi tamamlandıktan sonra elde edilmeye başlanacağı için inşaat süresi de belirleyici bir etkidir. İnşaat süresinin uzaması tesisin açılmasını geciktireceği için beklenen gelirden mahrum kalacaktır. Ayrıca inşaatın yürütüldüğü sırada şantiyenin temizlenmesi, aydınlatılması, güvenliği, işçilerin beslenmesi, barındırılması gibi masraflar da ortaya çıkacaktır. İnşaat süresi ile alakalı maliyetleri ve inşaat maliyetleri toplamını en aza indirmeyi amaçlayan problem zaman-maliyet ödünleşim problemi olarak tanımlanmaktadır. Belirtilen iki problemde birbirleri ile çakışan kısımlar bulunmaktadır. KKİPP’de personel giderlerini en aza indirmek için personel sayılarında kısıtlar bulunurken ZMÖP’te personel veya iş makinesi giderleri süre kısalmasından elde edilecek kazanımlardan daha az arttığı durumda personel ve iş makinesi sayıları artırılarak aktivite süresi kısaltılmaktadır. Bu çalışmada her iki problem birlikte ele alınarak kaynaklar üzerine kısıtlar tanımlanmış ve inşaat süresinin aşırı uzayıp işin gecikmesi sonucu tesisten elde edilecek gelirden mahrum kalmamak için kaynak kısıtlarının gevşetilebileceği kaynak kısıtlı zaman maliyet ödünleşim problemi oluşturulmuştur.

Zaman maliyet ödünleşim ile çok modlu kaynak kısıtlı iş problemlerini oluşturmak plancılara önemli miktarda iş yükü getirmektedir. Bu nedenle uygulamada her iki problem de iş yükünü azaltmak için yüzeysel olarak ele alınmaktadır. Vaka analizinde de görüleceği üzere bu çalışmada metraj verilerini kullanarak adam.saat ve malzeme gereksinimi hesaplayıp aktivitelerin başlangıç zamanına göre ekip sayısı ve iş verimini dikkate alarak aktivitenin bitiş zamanını hesaplayan bütünsel bir yaklaşım getirilmiştir. Bu sayede optimizasyon sürecinde aktivitelere atanan süre değerlerine göre inşaat süresi hesaplanmış ve kaynak kısıtlarının ihlalleri varsa belirlenip amaç fonksiyonu hesaplanmıştır. Böylece ZMÖP ve KKİPP birlikte detaylı biçimde analiz edilerek inşaattan elde edilecek fayda ve işçi kısıtlarının aşım maliyetleri birlikte ele alınmış ve detaylı bir optimizasyon problemi oluşturulmuştur.

Literatürde KKİPP iş günü temel alınarak oluşturulmaktadır. Fakat şantiye genel giderleri ve tesisten elde edilecek kira geliri iş gününün yanı sıra tatil günlerinde de ortaya çıkmaktadır. Ayrıca mevsimsel etkenlerden dolayı aşırı sıcak ve soğuk havalar nedeniyle ve inşaatın yer seviyesinden yükselmesi sonucu iş veriminde düşüşlerin gözlemlendiği literatür taramasında belirlenmiştir. İş veriminin az olduğu mekânda ve günlerde kalabalık ekipler oluşturmak hatalı sonuçlar verecektir. Çünkü literatürdeki problemler her zaman personel veriminin sabit kaldığını kabul etmektedir. Belirtilen kabul ile verimin düşük olduğu dönemlerde yüksek sayıda personelle çalışmak aynı maliyet artışına neden olacaktır fakat gerçek durumda verimin yüksek olduğu dönemdekine eş miktarda süre kısalması sağlamayacaktır. Belirtilen olumsuzluğu gidermek için inşaatın yürütülmesi sırasında uzun yıllar meteorolojik değerlerin ortalaması dikkate alınarak hava durumu simüle edilerek Eşitlik 11 ve 12 uygulanarak çalışma verimi hesaplanmıştır.

Problemin tanımlanması için inşaatın fırsat maliyeti ve genel giderleri toplamının 15.000 TL/gün olduğu kabul edilmiştir. İnşaatla aynı anda en fazla 40 işçinin çalışabileceği ve bu kısıtı aşmanın günlük maliyetinin aşılma işçi başına 1000 TL olacağı varsayılmıştır. Aktivitelerin 1 ile 13 gün arasında tamamlanabileceği kabul edilmiş ve belirlenen değerler dikkate alınarak kaynak kısıtlı zaman maliyet ödünleşim problemi oluşturulmuştur.

İş programının en iyi duruma getirilmesi sürecinde su yalıtım membranı, geri dolgu, kaba inşaat, iç duvar, dış duvar, iç sıva, dış sıva, tesisat, iç cephe boyası, dış cephe boyası ve 5 adet yer kaplaması işleri olmak üzere toplam 12 aktivitenin süresi girdi parametresi olarak tayin edilmiştir. İş paketlerine atanabilecek süreler 1 ile 13 gün arasında belirlenmiştir. Bu durumda $13^{12} = 2,33 \cdot 10^{13}$ adet farklı iş programı kombinasyonu ortaya çıkacaktır. İnşaatın süresi hesaplanırken doğrusal iş programı uygulanarak arama uzayının büyüklüğü önemli ölçüde daraltılmıştır. Kritik Yol Yöntemi iş çizelgelemesinde çok yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Fakat yüksek katlı bina inşaatlarında çok sayıda aktivitenin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada 10 adet aktivite optimizasyon sürecine dahil edilirken KYY ile iş programı oluşturulsaydı aktivite sayısı 300'e çıkacaktı. Her katta aktivite sürelerinin değişebileceği kabulü yerine doğrusal iş programı ile her katta aktivitelerin kesintisiz ve aynı ekiple yürütüleceği kabulü ile optimizasyon sürecinde bina üst yapısı ile ilgili parametre sayısı 10 ile sınırlandırılarak problemin arama uzayı önemli ölçüde daraltılarak optimum veya yakın-optimum sonuç alma olasılığı artırılmıştır.

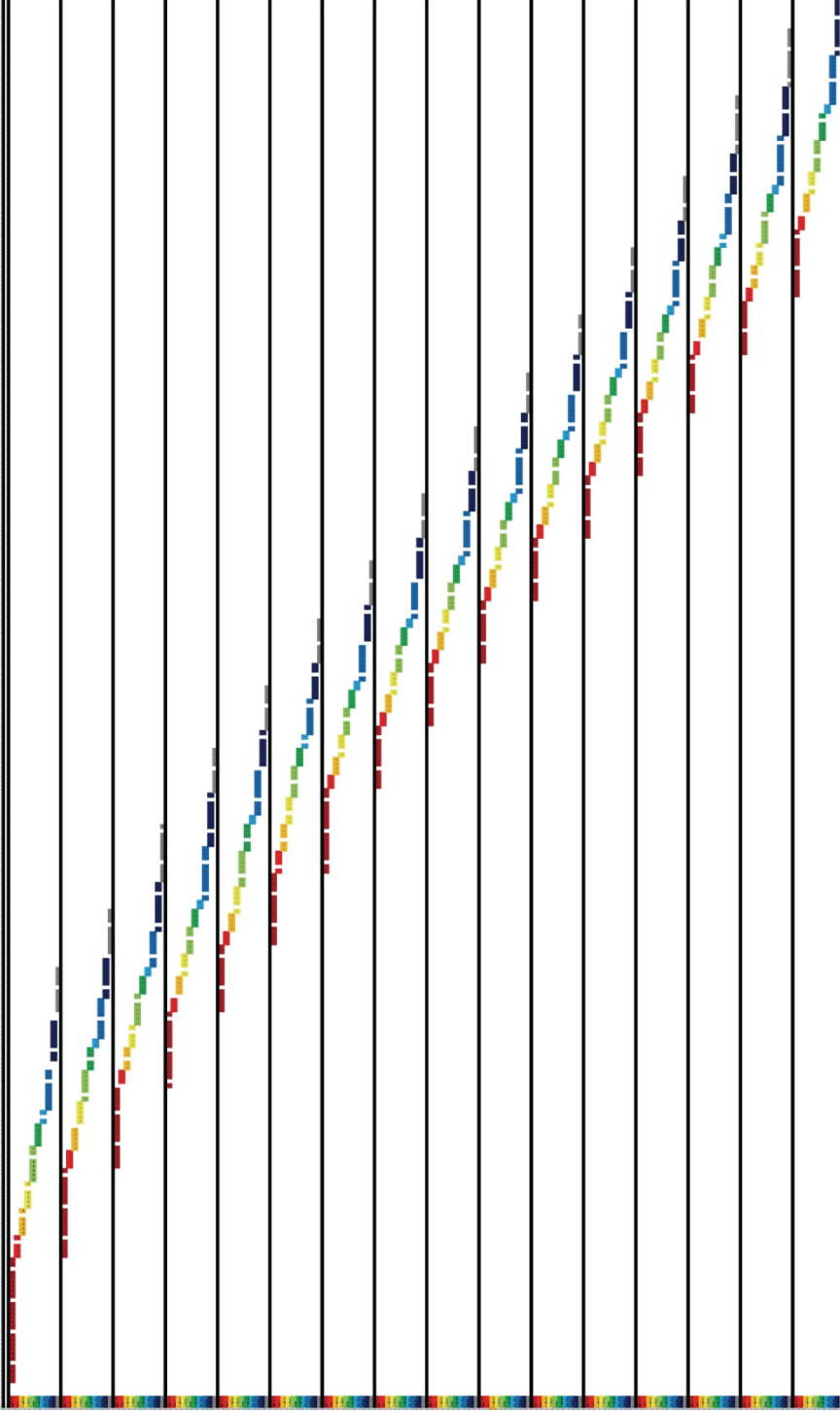
Doğrusal iş programı uygulanarak iş kalemleri için kurulan ekiplerin tüm katlarda değişmeden aynı işçi sayısı ile devam ettiği kabul edilmiştir. Bu kabul uygulamada yer bulmaktadır ve çok zorunlu haller dışında ekipler sabit kalmamaktadır. Doğrusal iş programının uygulanmasına rağmen aktivitelerin tatil günlerinin farklı olması, aktivitelerin iş verimlerinin farklı oranlarda etkilenmesi ve iş miktarlarının her katta aynı olmaması nedenlerinden dolayı ardıl aktiviteler öncel aktivitelere üst katlarda yetişebilmektedir. Eşitlik 7 ve 8 ile Şekil 2 ve 3'te ifade edildiği üzere ardıl aktivitenin öncel aktiviteye yetiştiği durumda ardıl aktiviteye ara verilmesi hiç ara verilmeden işin yürütülebileceği duruma göre başlangıç zamanının tayin edilmesine göre işin daha erken tamamlanabilmesini sağlamaktadır. Aktivitelerin iş veriminin sabit olmaması ve her katta aynı işin yapılmaması nedeniyle çakışma olmayacak şekilde aktivite başlangıç zamanlarının belirlenmesi oldukça güçtür. Bu nedenle ara katlarda aktivitelerin başlayabilmesi için ilgili aktivitenin bir alt katta tamamlanması ve aktivite öncelinin aynı katta tamamlanmış olması koşullarının sağlanması

yeterlidir. Bir alt katta aktivite tamamlanmış fakat aynı kattaki öncel aktivite tamamlanmamış ise ilgili aktiviteye ara verilerek doğrusal iş programı yönteminden ayrışılmaktadır.

Vaka çalışmasının Malatya ilinde gerçekleştirileceği varsayılarak Tablo 6'da sunulan Malatya ilinin meteorolojik verileri girilerek inşaat süresince gerçekleşmesi beklenen çalışma verimleri Eşitlik 11 ve 12 ile hesaplanmıştır. Aktivitenin yürütülmesi sırasında gerçekleşen verim aktivitenin yerden yüksekliğine de bağlı olacağı için yükseklikten kaynaklı verim değişimi Eşitlik 13 ile hesaplanmıştır. Buna ek olarak Ramazan ayında işçilerin oruç tutması durumunda oluşabilecek verim kaybının dikkate alınması Eşitlik 14'te sunulan denklemlerle gerçekleştirilir. Belirtilen aktivite süreleri ile verim dikkate alınmadan 915 iş gününde, taşeronların tatil günleri dikkate alınarak hazırlanan iş çizelgesine göre ise 1016 takvim gününde tamamlanan inşaat, mevsimsel etkilerin ve çalışma yüksekliğinin dikkate alınması ile 1320 takvim gününde tamamlandığı hesaplanmıştır.

Tanımlanan veriler ile Eşitlik 9-30 uygulanarak optimize edilmiş biçimde takvimli iş programı elde edilir. Geliştirilen uygulama takvimli iş programını Gantt şeması biçiminde Şekil 7'de gösterildiği gibi sunmaktadır. Şekil 7'deki şemada bordo renk duvar, kırmızı renk tesisat, turuncu renk iç cephe sıvası, sarı renk yer döşemesi, açık yeşil renk doğrama, koyu yeşil renk iç cephe kaplaması, açık mavi renk dış cephe iskelesi kurulumu, mavi renk ısı yalıtım mantolaması, koyu mavi renk dış cephe sıvası ve gri renk dış cephe boyası işlerini ifade etmektedir. Şemanın x eksenini takvim gününü, y eksenini ise imalatların hangi katta yürütüldüğünü belirtmektedir. Birinci kat y ekseninin en üstünde temsil edilmektedir ve y ekseninde aşağı inildikçe kat sayısı artmaktadır. Aktivitelerin tatil gününe denk geldiği takvim günlerinde aktivitenin temsil edildiği kısım renklendirilmemiştir. Şekil 7 incelendiğinde ekiplerin tatil günlerine denk gelen günlerde aktiviteleri gösteren çizgilerin kesildiği görülecektir. Bu şekilde çalışılan ve çalışılmayan günler şema üzerinde kolaylıkla belirlenebilecektir.

Şekil 8'de Şekil 7'de sunulan Gantt şemasının 1. Kat için büyültülmüş hali sunulmaktadır. Aktivitelerin tatil günleri Şekil 8'de daha net görülmektedir. İnce iş grubunda ilk başlayan iş birinci katın duvar işidir. İşin sürdürüldüğü zamanı temsil eden hücrelerin içinde yazan değer Eşitlik 11-14 uygulanarak hesaplanan çalışma verimidir. Çalışma verim değerlerinin toplamı iş günü biriminde aktivite süresine eşit olduğu durumda aktivite tamamlanmış olacaktır. Şekil 8'de duvar işinin son gününde verim değeri Eşitlik 15 ile hesaplanan aktivitenin tamamlanması için gerçekleştirilmesi gereken iş günü birimindeki iş miktarını ifade etmektedir. Son gün duvar işi mesai bitiminden önce tamamlanacağı için son gün 0,210 birim günde gerçekleştirilebilecek miktarda iş yapılacaktır. Duvar iş kaleminin süresi 10 iş günü olarak belirlenmesine rağmen tatil günleri ve iş veriminin mevsimsel etkilere bağlı olarak azalabilmesinden dolayı duvar işi 28 takvim günü süreceği tahmin edilmiştir. Sekizinci katta ise mevsim koşulları daha elverişli olduğu için 14 takvim gününde duvar işi tamamlanabilmektedir. Bu çalışmada uygulanan çalışma verimi tahmin denklemleri R^2 değeri 0.64 olan polinomlardır. Belirtilen değer oluşturulan denklemin deneyler esnasında yapılan çalışma verimi ölçümleri sonucu elde edilen veri setindeki varyasyonun %64'ünü ifade edebilmektedir. Bir başka deyişle çalışma verimindeki değişimin tamamını kapsayamadığını ifade etmektedir. Bu nedenle takvimli iş programı ile elde edilen tamamlanma zamanları tam doğru değerler olmayabilir. Gantt şemasına ek olarak Eşitlik 16 ve 17 uygulanarak şantiyede günlük harcanan malzeme miktarı, Eşitlik 18 ve 19 uygulanarak şantiyede çalışan günlük personel sayıları hesaplanmaktadır.



Şekil 7 - Çalışma takvimi, hava koşulları ve çalışma yüküklüğü dikkate alınarak oluşturulan Gantt şeması

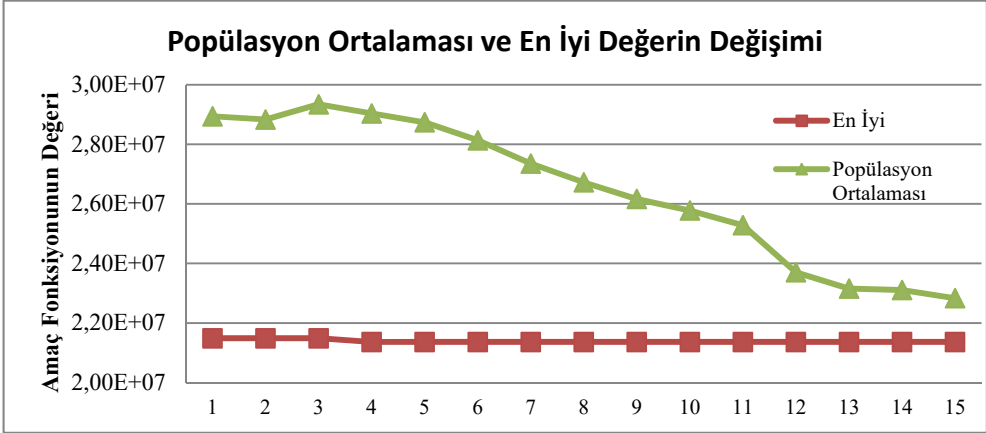
İnşa edilen imalatın çalışma verimi inşaat süresince farklılaşsa da işi yürüten ekiplerin aynı büyüklükte kaldığı, aktivitenin süresinin uzadığı kabulü ile günlük çalışan personel sayıları belirlenmiştir. Personele ödenecek ücret ise yapılan sözleşme ile tarif edilmektedir. Götürü bedel bir sözleşme imzalanmışsa sözleşmedeki bedel üzerinden gerçekleştirilen işin yüzdesi karşılığında ödeme yapılır. Çalışan personel sabit ücret karşılığı istihdam edilmişse takvimli iş programında oluşan aktivite süresi temel alınarak ödenecek tutar hesaplanır. Aktivitenin gerçekleştirilmesi için kullanılması gereken malzeme miktarı Eşitlik 16 ile hesaplanmaktadır. Kullanılan malzeme miktarı işin gerçekleştirilme hızı ile orantılı biçimde değişmektedir. Duvar işi için tuğla, su, kum, çimento, kum ve sönmüş kirecin kullanılması gereklidir. O gün içinde kullanılacak malzeme miktarı, tüm işin gerçekleştirilmesi için gereken miktarın çalışma verimi ile çarpılıp aktivitenin iş günü birimindeki süresine bölünmesi ile elde edilir. Çimento duvar işinin dışında yer döşemesi, sıva işlerinde de kullanılmaktadır. Aynı gün içerisinde farklı katlarda aynı malzemeye ihtiyaç duyan işlerin yürütülmesi durumunda günlük kullanılan malzeme miktarı Eşitlik 17 ile hesaplanır. Poz tariflerinde malzemenin bir miktar zayı olabileceği göz önüne alınarak gereken malzeme miktarı belirtildiği için günlük harcanan malzeme miktarına zayıatlar da dâhildir. Duvar işi ile ilgili ilk sekiz takvim gününün malzeme kullanım detayı Tablo 5’te sunulmuştur.

Eşitlik 20-25 uygulanarak inşaat süresince oluşan nakit akışı hesaplanmaktadır. Eşitlik 28’de sunulan amaç fonksiyonunun minimum değerini elde etmek için optimizasyon süreci başlatılır. Kaynak kısıtlı zaman maliyet ödünleşim problemi oluşturulurken P_{mak} ve TS parametreleri sırasıyla en fazla 40 işçinin aynı anda şantiyede çalışmasına izin verildiği ve işe 01.07.2017 tarihinde başlanıp 01.05.2019’da işin tamamlanması taahhüt edilecek şekilde sözleşme imzalandığı varsayılmıştır.

Tablo 5 - Duvar işi için günlük malzeme kullanımı

Tarih	31.1.18	1.2.18	1.2.18	2.2.18	2.2.18	3.2.18	3.2.18	4.2.18	4.2.18
Çalışma Verimi	0,383	0,428	0,428	0,428	0	0,428	0,428	0,428	0,428
Tuğla (adet)	191	213	213	213	0	213	213	213	213
Su (m3)	0,103	0,115	0,115	0,115	0	0,115	0,115	0,115	0,115
Kum (m3)	0,117	0,131	0,131	0,131	0	0,131	0,131	0,131	0,131
Çimento (ton)	0,029	0,033	0,033	0,033	0	0,033	0,033	0,033	0,033
Sön Kir ton	0,009	0,010	0,010	0,010	0	0,010	0,010	0,010	0,010

Problem tanımlanırken PC ve GC parametreleri için sırası ile 1.000 ve 15.000 değerleri atanmıştır. TBGA ile 15 yineleme yapılmış ve Şekil 9’da gösterilen yakınsama grafiği $2,33 \cdot 10^{13}$ adet çözüm arasından 1190 deneme yapılarak elde edilmiştir. Kısıt ihlalleri azaltılarak başlangıç çözümüne göre oldukça önemli iyileşme sağlanmıştır. Küçük ve orta ölçekli bir müteahhidin deneme yanılma ile süre ve kaynak üzerinde kısıtlar bulunan iş programını düşük maliyetli bir sonuç sunacak şekilde çözebilmesi oldukça düşük bir olasılık olduğu göz önüne alındığında geliştirilen uygulamanın müteahhitler için faydalı olma potansiyeli bulunmaktadır.



Şekil 9 - TBGA ile gerçekleştirilen optimizasyon sürecinin yakınsama grafiği

Nakit akışı diyagramını hazırlayan, çalışacak personel sayılarını hesaplayan ve takvimli iş programını oluşturan birçok ticari yazılım bulunmaktadır, fakat hiçbir ticari yazılım mevsimsel etkileri dikkate almamaktadır. Mevcut ticari yazılımlar iş programı oluştururken hava koşullarından dolayı iş veriminin değişebileceğini göz ardı etmekte ve iş verimini her ortamda sabit kabul etmektedirler. Bu çalışmada önerilen yöntemi uygulamak için Dubai, Malatya, Moskova ve Londra şehirlerinin yıllık ortalama iklim verileri derlenerek Tablo 6’da sunulmuştur. Belirtilen veriler geliştirilen uygulamaya girilerek Tablo 7’de sunulan değerler elde edilmiştir.

Tablo 6 - Mevsimsel koşulların inşaat süresine etkisini simülasyonla ölçmek için toplanan meteorolojik veriler

Şehir	Parametre	O	Ş	M	N	M	H	T	A	E	E	K	A
Dubai	Sıcaklık °F	75	78	84	93	101	104	106	106	101	95	87	78
	Rüzgar mph	8,6	9,1	9,2	8,6	8,5	8,1	7,7	7,6	7,1	7	7,4	7,9
	Bağıl nem	65	65	63	55	53	58	55	58	60	60	62	65
Malatya	Sıcaklık °F	39	43	53	64	74	85	92	92	83	69	53	42
	Rüzgar mph	6	6,5	6,8	6,6	6,5	8	8,6	7,7	6,6	5,7	5,6	5,6
	Bağıl nem	77	73	63	53	47	39	35	32	34	44	54	70
Moskova	Sıcaklık °F	24	25	36	51	65	71	75	70	59	46	33	26
	Rüzgar mph	11,9	11,7	10,8	9,8	9,3	8,6	8	8,5	9,5	10,5	11	11,7
	Bağıl nem	84	82	77	67	66	72	75	77	81	83	86	85
Londra	Sıcaklık °F	47	48	52	58	63	69	73	72	67	60	53	49
	Rüzgar mph	13,1	12,6	12,1	11	10,5	9,9	9,8	9,9	10,6	11,5	11,8	12,5
	Bağıl nem	82	79	75	63	64	64	66	63	74	79	83	84

Tablo 6’da yer alan veriler weatherspark.com, worldweatheronline.com ve weather-and-climate.com web sayfalarından elde edilmiştir.

Tablo 7 - Aynı inşaatın aynı sayıdaki personelle farklı coğrafi konumlarda yapılmasının tamamlanma süresine etkisi

Konum	Başlangıç	Bitiş	Süre
Dubai	01.07.2016	02.04.2020	1371
Malatya	01.07.2016	11.02.2020	1320
Moskova	01.07.2016	15.10.2020	1568
Londra	01.07.2016	19.04.2020	1388

Tablo 7’de sunulan süreler hava koşulları ve çalışma yüksekliği dikkate alınarak elde edilmiştir. Tedarikçilerin teslimatları düzenli yapması, işçi hakları ve sendikalarla olan ilişkiler, denetçilerin imalatları denetleme konusundaki katılımı, inşaat bölgesinde uygulanan çevre kanunları gibi etkenler inşaat süresini etkileyecektir. Belirtilen etkenler çalışmanın kapsamı dışında olduğu için analize dâhil edilmemiştir. İnşaat süresinde gözlenen değişim Eşitlik 11-14’te hesaplanan iş veriminden kaynaklanmaktadır ve mevsim koşulları ile çalışma yüksekliğinin inşaat süresine etkisini göz önüne sunmaktadır. İnşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan Primavera ve MS Project yazılımları mevsim koşullarını dikkate almadığı için 4 şehir için aynı inşaat süresini sunacaktır.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada çok katlı bina inşaatlarının metraj hesaplaması, kaynak ihtiyacının belirlenmesi, kaynak tahsisinin yapılması, iş programının hazırlanması ve nakit akış diyagramının oluşturulması adımları formülleştirilerek en az insan emeği ile gerçekleştirilmesini sağlayan bir süreç geliştirilmiş ve hesap tablosu uygulaması olarak programlanmıştır. Tüm metraj kalemleri bina boyutları ve geometrisine göre formülleştirilerek hesaplanmıştır. Bu sayede bina boyutlarının değiştirilmesi sonucu sadece ilgili veri hücrelerindeki verinin güncellenmesi ile metraj değerleri tekrar hesaplanmakta ve nakit akış diyagramının oluşturulmasına kadar uzanan süreçteki tüm aşamalar hiçbir insan müdahalesi olmadan tekrar hesaplanmaktadır.

Geliştirilen uygulamada doğrusal iş programının seçilme nedeni optimizasyon sürecine dahil olacak parametre sayısının düşürülmesidir. Doğrusal iş programı birbirini tekrar eden işlerden oluşan çok katlı bina inşaatları için oldukça uygun bir iş çizelgeleme yöntemidir. Doğrusal iş programında her aktivitenin inşası için oluşturulan ekiplerin en alt kattan en üst kata kadar ekip büyüklüğü değişmeden çalıştığı kabul edilmiştir. Bu sayede parametre sayısı sadece yürütülmekte olan iş kalemi sayısına eşit olmakta ve optimizasyon süreci kolaylaşmaktadır. Kritik yol yönteminde ise kaynak kısıtlı iş programı ve zaman maliyet ödünleşim problemlerinin çözümünde her aktivite için aktivite süresi ve aktivitenin ertelenme süresi veya aktivite önceliği atanması gerekmektedir. Bu durumda parametre sayısı örnek problem olarak çözülen 30 katlı bir binada 300’ü geçebilmektedir. Doğrusal iş

programında ise optimize edilecek değişkenler iş kalemlerinin bir kat için iş günü birimindeki süreleridir.

İş makinelerinin ve dönemsel olarak bazı personel sınıflarının temininde zorluklar görülebilir. Bu durumda iş programının temin edilebilen kaynak sayısına göre oluşturulması gereklidir. Bu nedenle iş programı hazırlanırken temin edilebilen iş makinesi sayısına göre aktivite süreleri belirlenmektedir. Aktivitenin ihtiyaç duyduğu diğer kaynaklar ise tamamlanma süresi göz önüne alınarak tahsis edilmiştir. Bu sayede temin edilebilen kaynak miktarına göre en kısa sürede proje tamamlanabilecek ve en az sayıda kaynak boşa kalacak şekilde iş programı oluşturulabilecektir.

İnşaat süresi boyunca personelin birim zamanda yaptığı iş miktarı sabit kalmamakta, mevsim şartlarına ve mekâna göre değişiklik göstermektedir. Hava sıcaklığı, rüzgâr hızı ve bina kat sayısının iş verimi üzerindeki etkisi literatür çalışması ile derlenmiş ve formüleştirilmiştir. İnşaatın yürütülmesi sırasında mevsimsel ve kültürel etkilerin, bayram ve resmi tatillerin, taşeronların çalışma günlerinin de dikkate alınabildiği bir iş programı oluşturularak inşaatın kaç iş günü ve kaç takvim gününde tamamlanacağı hesaplanmıştır. Bu sayede farklı çalışma takvimleri ve iş başlangıç tarihleri denenerek senaryo analizleri yapılabilecek ve taşeronların önerebileceği farklı çalışma günlerinin iş programını nasıl etkileyeceği kolaylıkla belirlenebilecektir. İnşaatın gerçekleştirileceği ilin meteoroloji verilerinin girilmesi ile takvimli iş programında ay boyunca aktivitelerin hangi verimde yürütüleceği tahmin edilmektedir. Personel verimlerinin hesaplanması literatürde kabul gören Koehn ve Brown tarafından önerilen formüllerle gerçekleştirilmiştir [29]. İş verimi dikkate alınarak farklı kentlerde inşaatın simüle edilmesi ile elde edilen sonuçlar Tablo 7’de sunulmuştur. İş veriminin inşaatın ilerlemesi boyunca değişiminin dikkate alınması mevcut ticari proje yönetim yazılımlarının hiçbirinde bulunmamaktadır. Bu çalışmada uygulanan verim hesaplaması literatürde gerçekleştirilmiş iş verimi çalışmalarının derlenmesi ile elde edilen verim hesaplamalarına dayanmaktadır. Rüzgâr, bağıl nem, sıcaklık ve çalışma yüksekliğinin iş verimine etkisi literatürde yer alan denklemler kullanılarak modellenmiştir. İşçilerin fizyolojik ve psikolojik durumları iş verimini önemli ölçüde etkilemektedir. Ayrıca haftalarca aşırı sıcak veya soğuk koşulda bulunulması durumunda insan metabolizması koşullara adapte olarak verim kaybının bir kısmını telafi edebilmektedir. İş verimini çalışılan mekândaki işçi yoğunluğu, mekânsal çakışma, yapılan işin karmaşıklığı, tekrar eden iş sayısı, şantiye yöneticileri ile saha personeli arasındaki iletişim, işçi sendikası ile işveren arasındaki uyum gibi birçok etken etkilemektedir. Bu nedenle gerçekleştirilen iş verimi hesaplamalarının iş verimini etkileyen tüm etkenleri dikkate almadığını belirtmek gerekir.

ZMÖP ve KKİPP literatürde yaygın olarak incelenen bir problem türüdür. Endüstri sektörü fabrika ortamında çalıştığı için işçi verimlerini tüm zamanlar için sabit alabilmektedir. Fakat, sabit personel verimi inşaat sektörüne uygun bir yaklaşım değildir. Bu çalışmada inşaat süreci boyunca hesaplanan günlük personel ve iş makineleri kullanımı KKİPP için gerekli verileri oluşturmuş ve genel giderlerin toplam maliyete eklenmesi ile ZMÖP tanımlanmıştır. Mevsimsel koşulların dikkate alınması ile ZMÖP ve KKİPP inşaat sektörü için literatürde yer alan çalışmalarla kıyaslandığında daha gerçekçi biçimde oluşturulmuştur.

İnşaat sektörü yaygın olarak iş programlarını MS Project ve Primavera yazılımlarını kullanarak hazırlamaktadır. Belirtilen yazılımlar hava koşullarının ve çalışma yüksekliğinin iş verimine etkisini tamamen ihmal ederek iş programını hazırladığı için plancılar teklif süresini belirlerken sezgisel olarak ilave süre eklemektedir. Önerilen yaklaşımla teklif süresi

için iş verimi kaybından dolayı süre eklenmesine gerek kalmamaktadır. Toklu ve Bettemir tarafından yapılan karşılaştırmalarda Primavera ve MS Project yazılımlarının KKİPP'yi optimum çözümden çok uzak biçimde çözdüğünü göstermiştir [58, 61]. Bu çalışmada GA'nın yakınsama yeteneğini önemli ölçüde iyileştiren tavlama benzetimi ile hibritleştirilmesi ile oluşturulan TBGA kullanılarak optimum veya yakın-optimum çözümlerin elde edilmesi sağlanmıştır. Gerçeğe daha yakın iş programı oluşturması ve daha yetkin bir optimizasyon algoritmasına sahip olması geliştirilen uygulamanın mevcut ticari yazılımlara karşı üstünlükleridir. Çalışmada sunulan yaklaşım şantiye yerleşim planlamasını ihmal etmektedir. Belirtilen planlama dolaylı giderlerin düşürülmesine önemli katkılar sağlamaktadır [62]. Ayrıca iş kazalarının önlenmesine yönelik hata ağacı analizi optimizasyon sürecine dahil edilerek iş kazalarının önlenmesi veya azaltılmasına yardımcı olabilir [63]. İleri çalışma olarak şantiye yerleşim planlamasının ve iş kazalarının gerçekleşmesine yönelik risk analizlerinin de optimizasyon sürecine dahil edilip geliştirilen yöntemle eklenmesi mevcut ticari yazılımlara göre daha geniş özellikli olmasını sağlayacaktır.

İş programının oluşturulması ile aktivitelerin yürütülmesi için kullanılacak malzeme miktarları tüm malzeme kalemleri için günlük hesaplanmaktadır. Bu sayede şantiyede stok takibinin yapılması oldukça kolaylaşmaktadır. Malzeme kullanımına ek olarak şantiyede günlük çalışan personel ve iş makinesi sayıları da hesaplanmaktadır. Malzeme, personel ve iş makinelerinin birim maliyetlerinin girilmesi ile gerçekleştirilen işlerin doğrudan maliyetleri hesaplanmakta ve nakit akış diyagramı oluşturulmaktadır. Geliştirilen hesaplama süreci ve yöntem sayesinde yüklenicinin mali durumuna göre inşaat hızının ayarlanması kolaylaşmaktadır. İnşaat süresinin uzun olması durumunda birim fiyatlardaki değişiklikler de dikkate alınmakta ve gerçek maliyet analizi yapılmaktadır.

Geliştirilen uygulama, tanımlanan veriler doğrultusunda metraj hazırlayıp, kaynak ve malzeme kullanım tahminlerinde bulunup iş programını oluşturmaktadır. Ayrıca inşaat süresince günlük kullanılan malzeme miktarları, çalışan personel ve gerçekleşen harcamalar hesaplanmaktadır. Bu sayede inşaat süresince oluşan kısıt aşımaları tespit edilip ZMÖP ve KKİPP optimizasyon sürecinin amaç fonksiyonuna yansıtılmıştır. Metraj hesaplamaları kolonların boyutu ve konumunun değişmesi ile güncellenmektedir. Ayrıca yer döşemesi, duvar kaplaması gibi iş kalemlerinin de imalat cinsinin değiştirilmesi ile metraj değerleri insan müdahalesi olmadan yeniden hesaplanmakta ve benzer çalışmalara göre daha doğru sonuçlar sunmaktadır [64, 65]. Belirtilen özellik YBM yazılımlarının metraj hesaplama modüllerinde bulunmaktadır. Oluşturulan bütünsel hesaplama süreci görselleştirme içermeyen 5D YBM uygulamasına denk sayılabilir. Bu çalışmada uygulanan hesaplama yöntemini uygulayacak yükleniciler, YBM uygulaması önündeki en büyük engellerden biri olan YBM yazılımlarının ve hesaplama sürecinin karmaşıklığını bertaraf ederek YBM benzeri hesap süreci ile proje yönetimi uygulamalarında kendi verimlerini yükseltebileceklerdir. Fakat güncel YBM uygulamaları sadece inşaat aşamasını değil inşa edilen tesisin bakım ve işletme sürecini de içermektedir [66]. Ayrıca yeşil bina kriterlerinin gerçekleştirilme başarısı YBM yazılımları tarafından da incelenmektedir [67].

Geliştirilen uygulama optimizasyon sürecinde aktivitelere farklı süre değerleri atayarak iş programını en uygun hale getirmeyi amaçlamaktadır. Aktivite sürelerine göre atanması gereken personel sayıları ve iş programı uygulama tarafından yeniden hesaplanıp amaç fonksiyonunun değeri belirlenmektedir. Bu sayede hesap tablosu dışında hiçbir ek yazılıma

ihtiyaç duymadan iş programı optimize edilebilmiştir. Fakat, optimizasyon süreci 2,8 GHz i5 işlemcinin tek çekirdeğinde yaklaşık bir gün sürmüştür. Optimizasyon boyunca 1190 iş programının denenmesi hesap tablosu üzerinde yapıldığı için hesaplamalar uzun sürmektedir. Hesaplama süresi makul değildir fakat hesaplamaların tamamı C++ ile kodlanarak çalıştırılabilir dosya üzerinden yürütülmesi halinde analiz süresi önemli ölçüde kısaltılabilecektir.

6. SONUÇ

Bu çalışmada bir bina inşaatının iş programı ekiplerin tatil günlerine, hava koşulları ve çalışma yüksekliğine bağlı olarak oluşturulmuştur. Ekonomik nedenler, iş güvenliği ve pandemi koşulları gereği ekip sayıları ve şantiyede çalışan toplam işçi sayısı üzerinde kısıtlamalar bulunabilmektedir. Ayrıca genel giderler ve tesisin işletmesinden beklenen gelirler nedeniyle inşaat süresinin makul düzeyde olması gereklidir. Bu çalışmada kaynak kısıtlı iş programı ile zaman-maliyet ödünleşim probleminin çalışma verimini etkileyen mevsimsel koşullarla beraber ele alınarak çözülmesi sağlanmıştır. Kaynaklar üzerindeki kısıtların inşaat süresini en az etkilemesi ve toplam proje maliyetinin en aza indirilebilmesi için Tavlama Benzetimli Genetik Algoritma ile aktivite süreleri optimize edilmiştir. Bu sayede mümkün olan en kısa sürede ve en ekonomik biçimde inşaatın tamamlanması sağlanabilecektir. Elde edilen iş programı mevsimsel ve mekânsal etkileri içermektedir. Bu çalışmanın literatüre en önemli katkısı mevcut yaklaşımlara kıyasla daha fazla etkeni dikkate alarak iş programını oluşturularak inşaat sektöründe görülebilecek inşaatın geç teslim edilmesi sonucu ödenebilecek tazminatların önüne geçilmesinde faydalı olabilecek bir yaklaşımın geliştirilmesidir.

Teşekkür

Bu çalışma İnönü Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından “Yapı Bilgi Modeli Tabanlı İnşaat Planlaması Yazılımı Geliştirimi” başlıklı FYL-2020-2052 kod numaralı bilimsel araştırma projesi kapsamında desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] AbouRizk, S.M., Babey, G.M. Karumanasseri, G., Estimating the cost of capital projects: An empirical study of accuracy levels for municipal government projects, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.29, 653-661, 2002.
- [2] Dikmen, S. Ü., Özek S., Deprem bölgelerinde zemin sınıfının sanayi yapılarının maliyetine etkisi. Teknik Dergi, 22(108), 5543-5558, 2011.
- [3] Ilter, O., Celik, T., Investigation of organizational and regional perceptions on the changes in construction projects. Teknik Dergi, 32(6), 11257-11286, 2021.
- [4] Kocaman, E., Kuru, M., Çalış, G., İhale usulü ve sözleşme türünün yapım işi sözleşme bedeline etkisinin incelenmesi. Teknik Dergi, 31(1), 9789-9812, 2020.

- [5] Koç, K., Gurgun, A.P., Causal Relationships of Readability Risks in Construction Contracts. *Teknik Dergi*, 33(2), 2021.
- [6] Kuru, M., Çalış, G., İnşaat Projelerinde Kalite Performansını Etkileyen Faktörler: Türkiye’de Bir Alan Çalışması. *Teknik Dergi*, 33(6), 2022.
- [7] Ayhan M., Dikmen I., Birgonul M.T., Comparing performanes of machine learning techniques to forecast dispute resolutions. *Teknik Dergi*, 2022.
- [8] Demirdöğen, G., Işık, Z., Structural equation model of the factors affecting construction industry innovation success. *Teknik Dergi*, 32(2), 10717-10738, 2021.
- [9] Karaman, A.E., Sandal, K., Effect of Sub-Contractor Selection on Construction Project Success in Turkey. *Teknik Dergi*, 33(4), 12105 – 12118, 2022.
- [10] Budayan, C., Celik, T., Determination of Important Building Construction Adverse Impacts Creating Nuisances in Residential Areas on Neighbouring Community. *Teknik Dergi*, 32(2), 10611-10628, 2021.
- [11] Okudan, O., Budayan, C., Arayıcı, Y., Identification and Prioritization of Key Performance Indicators for the Construction Smal and Medium Enterprises, *Teknik Dergi*, 33(5), 2022.
- [12] Olsen, D., Taylor, J. M., Quantity Take-Off Using Building Information Modeling (BIM), and Its Limiting Factors. *Procedia Engineering*, 196, 1098-1105, 2017.
- [13] Monteiro, A., Martins, J.P., A survey on modeling guidelines for quantity takeoff-oriented BIM-based design. *Automation in Construction*, 35, 238-253, 2013.
- [14] Lee, S.K., Kim, K.R., Yu, J.H., BIM and ontology-based approach for building cost estimation, *Automation in Construction*, 41, 96-105, 2014.
- [15] Aram, S., Eastman, C., Sacks, R., A knowledge-based framework for quantity takeoff and cost estimation in the AEC industry using BIM, In ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (Vol. 31, p. 1). Vilnius Gediminas Technical University, Department of Construction Economics & Property, 2014, January.
- [16] Choi, J., Kim, H., Kim, I., Open BIM-based quantity take-off system for schematic estimation of building frame in early design stage, *Journal of Computational Design and Engineering*, 2(1), 16-25, 2015.
- [17] Bettemir, Ö.H., Development of spreadsheet based quantity take-off and cost estimation application. *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation* 1(3), 108-117, 2018.
- [18] Khosakitchalert, C., Yabuki, N., Fukuda, T., Automated modification of compound elements for accurate BIM-based quantity takeoff. *Automation in Construction*, 113, 103142, 2020.
- [19] Ergen, F., Bettemir, Ö.H., Development of BIM software with quantity take-off and visualization capabilities. *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation* 5(1), 1-14, 10.31462/jcemi.2022.01001014, 2022.

- [20] Sepasgozar, S.M., Karimi, R., Shirowzhan, S., Mojtahedi, M., Ebrahimzadeh, S., McCarthy, D., Delay causes and emerging digital tools: A novel model of delay analysis, including integrated project delivery and PMBOK. *Buildings*, 9(9), 191, 2019.
- [21] Larsson, R., Rudberg, M., Impact of Weather Conditions on In Situ Concrete Wall Operations Using a Simulation-Based Approach. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(7), 05019009, 2019.
- [22] Maqsoom, A., Choudhry, R.M., Umer, M., Mehmood, T., Influencing factors indicating time delay in construction projects: Impact of firm size and experience. *International Journal of Construction Management*, 1-12, 2019.
- [23] Hurlimann, A.C., Warren-Myers, G., Browne, G.R., Is the Australian construction industry prepared for climate change? *Building and Environment*, 153, 128-137, 2019.
- [24] Russo, J.A., The economic impact of weather on the construction industry of the United States, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 47(12), 967-972, 1966.
- [25] Smith, G.R., Hancher, D.E., Estimating precipitation impacts for scheduling, *Journal of Construction Engineering and Management*, 115(4), 552-566, 1989.
- [26] Li, S., New approach for optimization of overall construction schedule, *Journal of construction engineering and management*, 122(1), 7-13, 1996.
- [27] Apipattanavis, S., Sabol, K., Molenaar, K.R., Rajagopalan, B., Xi, Y., Blackard, B., Patil, S., Integrated framework for quantifying and predicting weather-related highway construction delays, *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(11), 1160-1168, 2010.
- [28] Shan, Y., Goodrum, P.M., Integration of building information modeling and critical path method schedules to simulate the impact of temperature and humidity at the project level, *Buildings*, 4(3), 295-319, 2014.
- [29] Koehn, E., Brown, G., Climatic effects on construction, *Journal of Construction Engineering and Management*, 111(2), 129-137, 1985.
- [30] Jung, M., Park, M., Lee, H.S., Kim, H., Weather-delay simulation model based on vertical weather profile for high-rise building construction, *Journal of Construction Engineering and Management*, 142(6), 04016007, 2016.
- [31] Sönmez, M., Dikmen, S.Ü., Akbıyıklı, R., Time-cost relationships for superstructure projects in Turkey. *Teknik Dergi*, 31(2), 9869-9896, 2020.
- [32] Ahbab, C., Daneshvar, S., Celik, T., Cost and time management efficiency assessment for large road projects using data envelopment analysis. *Teknik Dergi*, 30(2), 8937-8959, 2019.
- [33] Wang, T., Abdallah, M., Clevenger, C., Monghasemi, S., Time–cost–quality trade-off analysis for planning construction projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2019.
- [34] Liu, S.S., Wang, C.J., Resource-constrained construction project scheduling model for profit maximization considering cash flow. *Automation in Construction*, Vol. 17, No. 8, pp. 966-974, DOI: 10.1016/j.autcon.2008.04.006, 2008.

- [35] Banihashemi, S.A., Khalilzadeh, M., Time-cost-quality-environmental impact trade-off resource-constrained Project scheduling problem with DEA approach. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2020.
- [36] Abdel-Basset, M., Ali, M., Atef, A., Uncertainty assessments of linear time-cost tradeoffs using neutrosophic set. *Computers & Industrial Engineering*, 141, 106286, 2020.
- [37] Toğan, V., Eirgash, M.A., Time-Cost Trade-Off Optimization with a New Initial Population Approach. *Teknik Dergi*, 30(6), 9561-9580, 2018.
- [38] Eirgash, M.A., Toğan, V., Dede, T., A multi-objective decision making model based on TLBO for the time-cost trade-off problems. *Structural Engineering and Mechanics*, 71(2), 139-151, 2019.
- [39] Bettemir, Ö.H., Birgönül, M.T., Network Analysis Algorithm for the Solution of Discrete Time-Cost Trade-off Problem. *KSCE Journal of Civil Engineering*, (2017) 21(4):1047-1058, 2016. DOI 10.1007/s12205-016-1615-x.
- [40] Zhu, L., Lin, J., Wang, Z.J., A discrete oppositional multi-verse optimization algorithm for multi-skill resource constrained project scheduling problem. *Applied Soft Computing*, 85, 105805, 2019.
- [41] Lin, J., Zhu, L., Gao, K., A genetic programming hyper-heuristic approach for the multi-skill resource constrained project scheduling problem. *Expert Systems with Applications*, 140, 112915, 2020.
- [42] Pellerin, R., Perrier, N., Berthaut, F., A survey of hybrid metaheuristics for the resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 280(2), 395-416, 2020.
- [43] Birjandi, A., Mousavi, S.M., Fuzzy resource-constrained project scheduling with multiple routes: A heuristic solution. *Automation in Construction*, 100, 84-102, 2019.
- [44] Laszczyk, M., Myszkowski, P.B., Improved selection in evolutionary multi-objective optimization of multi-skill resource-constrained project scheduling problem. *Information Sciences*, 481, 412-431, 2019.
- [45] Chakraborty, R.K., Abbasi, A., Ryan, M.J., Multi-mode resource-constrained project scheduling using modified variable neighborhood search heuristic. *International Transactions in Operational Research*, 27(1), 138-167, 2020.
- [46] Tirkolaee, E.B., Goli, A., Hematian, M., Sangaiah, A.K., Han, T., Multi-objective multi-mode resource constrained project scheduling problem using Pareto-based algorithms. *Computing*, 101(6), 547-570, 2019.
- [47] Creemers, S., The preemptive stochastic resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 277(1), 238-247, 2019.
- [48] Arab, H.G., Rayeni, A.M., Ghasemi, M.R., An effective improved multi-objective evolutionary algorithm (IMOEA) for solving constraint civil engineering optimization problems. *Teknik Dergi*, 32(2), 10645-10674, 2020.

- [49] Erzurum, T., Bettemir, Ö.H., Kaynak Dengeleme Probleminin Arama Uzayını Paralel Programlama ile Tarayarak Kesin Çözümü, *Teknik Dergi*, 32(3): 10767 – 10805, 2021.
- [50] Lotfi, R., Yadegari, Z., Hosseini, S.H., Khameneh, A.H., Tirkolae, E.B., Weber, G.W., A robust time-cost-quality-energy-environment trade-off with resource-constrained in project management: A case study for a bridge construction project. *Journal of industrial & management optimization*, 18(1), 375, 2022.
- [51] Sharma, K., Trivedi, M.K., Latin hypercube sampling-based NSGA-III optimization model for multimode resource constrained time–cost–quality–safety trade-off in construction projects. *International Journal of Construction Management*, 1-11, 2020.
- [52] Taheri Amiri, M.J., Haghghi, F., Eshtehardian, E., Abessi, O., Multi-project time-cost optimization in critical chain with resource constraints. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22(10), 3738-3752, 2018.
- [53] Albayrak, G., Novel hybrid method in time–cost trade-off for resource-constrained construction projects. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44(4), 1295-1307, 2020.
- [54] Banihashemi, S.A., Khalilzadeh, M., Time-cost-quality-environmental impact trade-off resource-constrained project scheduling problem with DEA approach. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2020.
- [55] Kannimuthu, M., Raphael, B., Palaneeswaran, E., Kuppaswamy, A., Optimizing time, cost and quality in multi-mode resource-constrained project scheduling. *Built Environment Project and Asset Management*, 2019.
- [56] Heravi, G., Moridi, S., Resource-constrained time-cost tradeoff for repetitive construction projects. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(8), 3265-3274, 2019.
- [57] Al Alawi, M.K., Modeling, investigating, and quantification of the hot weather effects on construction projects in Oman. *The Journal of Engineering Research [TJER]*, 17(2), 89-99, 2020.
- [58] Bettemir, Ö.H., Optimization of time-cost-resource trade-off problems in project scheduling using meta-heuristic algorithms, PhD Thesis, METU, Ankara, Türkiye, 2009.
- [59] Miriam, A.J., Saminathan, R., Chakaravathi, S., Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-III) for effective resource allocation in cloud. *Evolutionary Intelligence*, 1-7, 2020.
- [60] Hwang, S.F. He, R.S., Improving Real-Parameter Genetic Algorithm with Simulated Annealing for Engineering Problems. *Adv. Eng. Softw.*, 37(6), 406 – 418, 2006.
- [61] Toklu, Y.C., Application of genetic algorithms to construction scheduling with or without resource constraints. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 29(3), 421-429, 2002.
- [62] Oral, M., Bazaati, S., Aydinli, S., Oral, E., Construction site layout planning: Application of multi-objective particle swarm optimization. *Teknik Dergi*, 29(6), 8691-8713, 2018.

- [63] Gökçe, Ş., Zorluer İ., İnşaat Sektöründeki İş kazalarının Hata Ağacı Analizi ile Değerlendirilmesi. *Teknik Dergi*, 33(6), 2022.
- [64] Bettemir, Ö.H., Gündüz, E., Akkurt, O., Hilal, E., Arslan, M.A., İnşaat işlerinin iş programına bağlı nakit akışı değişkenliğinin saptanması ve düzenlenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(1), 211-223, 2019.
- [65] Bettemir, Ö.H, Yücel, T., Zaman maliyet ödünleşim probleminin en az insan müdahalesi ile oluşturulup çözülmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(2), 461-480, 2021.
- [66] Halmetoja, E., Lepkova N., Utilising Building Information Models in Facility Maintenance and Operations *Teknik Dergi*, 2022.
- [67] Gürgün, A.P., Koç, K., Atabay, Ş., Yapı bilgi modellemesi kullanımının sürdürülebilir yeşil bina projeleri üzerine etkileri. *Teknik Dergi*, 33(3), 11857-11886, 2022.

Kozmik Işın Nötron Sayacı ile Ölçülen Toprak Neminin Hidrolojik Modellerde Kullanımı

Mustafa Berk DUYGU¹
Zuhal AKYÜREK²

ÖZ

Kozmik ışınlar yeryüzüne çarptığında ortaya çıkan nötronlar hidrojen ile temas ettiklerinde enerjilerini kaybetmektedirler. Enerjisi azalmış nötronlar sayılarak bir bölgenin toprak nemi yüksek başarı ile tespit edilebilmektedir. Bu prensip ile çalışan kozmik ışın nötron sayacı (CRNP) ülkemizde ilk olarak Niğde-Çakıt havzasında denenmiş ve elde edilen sonuçlar bu çalışmada sunulmuştur. Yaklaşık 670 metre çapında bir alan için toprak nemi bilgisini sürekli olarak sağlayabilen CRNP, yüksek mekânsal ve zamansal çözünürlükte toprak nemi verisine ihtiyaç duyan hidrolojik çalışmalar için önemli bir alternatif oluşturmaktadır. 11 Kasım 2016 ile 01 Temmuz 2019 tarihleri arasında, CRNP ile saatlik olarak düzenli veri temini yapılmış olup, elde edilen verilerin aynı bölgede bulunan zaman alanı reflektometresi (TDR) cihazıyla da çok uyumlu sonuçlar verdiği tespit edilmiştir. Biriktirmeli kavramsal bir model olan NAM modeli ile hidrolojik değişkenlerin akıma olan etkileri belirlenebilmektedir. Bu çalışmada CRNP ile elde edilen toprak nemi verileri NAM kavramsal modelinin iyileştirilmesinde kullanılmış, modelin kalibrasyonunda toprak nemi verilerinin de dikkate alınmasıyla Çakıt Havzası debi verileri için Kling-Gupta Verimlilik skoru 0,56(Kalibrasyon) ve 0,42(Doğrulama)'dan 0,81(Kalibrasyon) ve 0,64(Doğrulama)'ya yükselmiştir. Hem Çakıt Havzası hem de Darboğaz Alt Havzası için istatistiksel ölçütlerin çoğunda benzer gelişmeler kaydedilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kozmik ışın nötron sayacı, CRNP, toprak nemi.

ABSTRACT

Using Soil Moisture Measured by the Cosmic Ray Neutron Probe in Hydrological Models

Scattered neutrons which occur as a result of the collision between cosmic rays and the Earth surface, lose their energy when they come into contact with hydrogen. The soil moisture of

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 25 Ağustos 2021 günü ulaşmıştır. 14 Nisan 2022 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Ocak 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.986949>

1 T.C. Tarım ve Orman Bakanlığı, Su Yönetimi Genel Müdürlüğü, Ankara
mustafaberk.duygu@tarimorman.gov.tr - <https://orcid.org/0000-0002-0946-3656>

2 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara
zakyurek@metu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-3744-2702>

a region can be determined with high success by counting these neutrons with reduced energy. Cosmic ray neutron probe (CRNP) works using this principle, it was first tested in Turkey at Çakıt basin and the results are presented in this study. CRNP can continuously provide soil moisture information for an area with a diameter of approximately 670 meters, thus, constitutes an important alternative for hydrological studies that require soil moisture data with high spatial and temporal resolution. Between 11 November 2016 and 01 July 2019, regular hourly data were obtained with CRNP, and it was determined that the data has very consistent results with the time domain reflectometer (TDR) located in the study area. NAM, which is a lumped conceptual model, helps determining the effects of hydrological variables on the discharge outputs. In this study, soil moisture data obtained with CRNP were used to improve the NAM conceptual model and Kling-Gupta Efficiency score for the discharge data of Çakıt Basin increased from 0.56(Calibration) and 0.42(Validation) to 0.81(Calibration) and 0.64(Validation). Similar improvements were noted for most of the statistical measures for both Çakıt Basin and Darboğaz sub-basin.

Keywords: Cosmic ray neutron probe, CRNP, soil moisture.

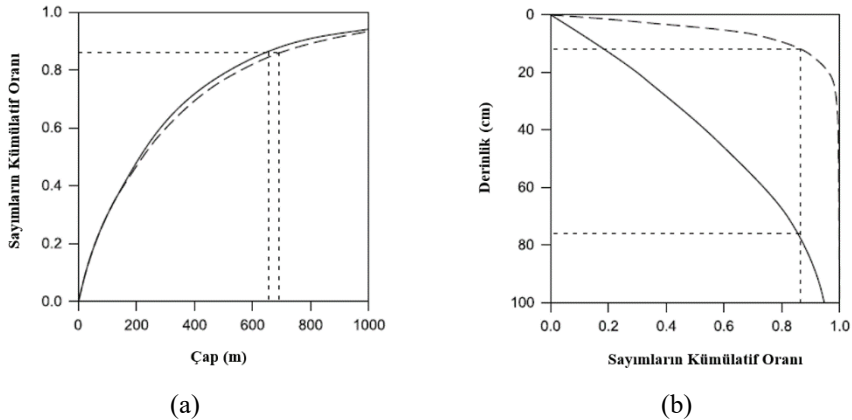
1. GİRİŞ

Toprak nem içeriği hidrolojik döngünün önemli değişkenlerinden biridir ve su kaynakları mühendisliğinin çeşitli alanlarında sıklıkla kullanılmaktadır. Mekânsal ve zamansal çözünürlüğü uygun olan toprak nemi verisine sahip olduğunda taşkın ve kuraklık gibi doğal afetlerin risk seviyesinin belirlenmesinden tarımsal sulama sistemlerinin etkinliğinin artırılmasına kadar birçok farklı alanda karar alma süreçleri geliştirilebilmektedir. Toprak su içeriğini ölçmek için çok çeşitli yöntemler bulunmaktadır. 19. Yüzyıldan beri laboratuvar testleri ile toprağın önce tartılması, ardından fırınlanması ve tekrar tartılması ile buharlaşan su miktarının ve dolayısıyla toprak nem içeriğinin tespit edilmesi mümkün olmaktadır. Ancak bu yöntem yalnızca örnek alınan kısıtlı bir alan için doğru sonuç vermektedir. Ayrıca, zaman içerisinde tekrarlanarak toprak neminin zaman ile değişiminin elde edilmesi çok yoğun iş gücü ve maliyet gerektirmektedir. Bu şekilde elde edilen toprak nemi verisi, uygun mekânsal ve zamansal çözünürlüğe sahip değildir. Bu nedenle toprak nemini tespit etmek için laboratuvar testine alternatif yöntemler geliştirilmiştir. Toprağın elektromanyetik özelliklerinin nemliliğe karşı değişimini kullanarak “Zaman Alanı Reflektometresi (TDR)” yöntemi geliştirilmiştir [1]. Bu yöntem ile aynı nokta ve toprak derinliği için farklı zamanlarda toprak nemi ölçümü yapmak kolaylaşmış olsa da TDR yönteminin ölçüm alanı kısıtlıdır. Jeofiziksel yöntemler kullanılarak da toprağın nem miktarı belirlenmektedir. Bu anlamda yer radarı olarak da bilinen GPR metodu [2] ile geniş alanlar ve farklı toprak derinlikleri için toprak nemi ölçümü yapılabilmektedir ancak bu yöntem ile sürekli olarak toprak nemi ölçümü yapmak için yoğun emek, bilgi birikimi ve kaynak ihtiyacı gerekmektedir. Yer gözlemlerinin yanı sıra uydular aracılığı ile de toprak nemi saptanabilir. Pasif ve aktif mikrodalga uzaktan algılama yöntemleri [3, 4] ile de toprağın ilk birkaç santimetrelilik bölümündeki su miktarı ile ilgili fikir sahibi olmak mümkündür, ancak uydu ürünlerinin mekânsal çözünürlüğü onlarca hektar olabilmekte, uyduların dünyanın etrafındaki hareket hızına bağlı olarak aynı nokta için ölçüm sıklıkları haftalar düzeyini bulabilmektedir. Bütün bu ölçüm türlerinden farklı olarak, toprak nem içeriği ortamda bulunan yavaşlatılmış nötron miktarının sayılması sonucu da ölçülebilmektedir. Nötron sayıları ve toprak su içeriği arasındaki ilişki belirlendikten sonra [5] ilk nötron sayaçları

geliştirilmiştir. Hızlı nötronlar havada çeşitli elementlerle karşılaştıklarında hızlarını kaybederler, hidrojen bu noktada diğer elementlere kıyasla çok daha etkili olduğundan yavaşlatılmış nötron sayısı ortamdaki hidrojen miktarı hakkında bilgi verebilmektedir. Hidrojen de doğada en çok su formunda bulunduğundan nötron sayaçları ile su miktarı ölçülebilmektedir. İlk nötron sayaçları nötron kaynağı olarak radyoaktif elementler kullanmaktaydılar. Bu maddelerin kontrolü çevre açısından problem oluşturduğundan sürekli olarak kullanılmaları ve cihazın çalışma alanında bırakılıp sürekli olarak veri sağlanması mümkün değildir. 2008 yılında keşfedilen kozmik ışın toprak nemi sayacı [6, 7] bu sorunu ortadan kaldırmış ve kozmik ışınların nötron sayaçlarında nötron kaynağı olarak kullanılmasına olanak sağlamıştır. Kozmik ışınlar ilk olarak 20. yüzyılın başlarında tanımlanmış olup [8], sonrasında kozmik ışınların yeryüzü ile teması sonucu oluşan parçacıklar keşfedilmiştir [9]. Toprak su içeriği ile düşük enerjili nötron sayısı arasında bir ilişki olduğuna dair literatürde çeşitli çalışmalar da bulunmaktadır [10, 11, 12]. Yavaşlatılmış nötronların nasıl ölçüleceği ise Knoll, 2010 tarafından [13] detaylı olarak açıklanmıştır. Kozmik ışın nötron sayaçlarının [6] keşfi ile de kozmik ışınların yeryüzüne ulaşması ile yavaşlatılmış nötronların toprak nemi ölçümünde ne şekilde kullanılacağı belirtilmiştir. 2015 yılında gerçekleştirilen bir çalışmada [14], model kaynaklı toprak nemi verisi ile uydu kaynaklı bitki gelişimi verilerinin ülkemizde zamansal ve mekânsal olarak geniş ölçekli hidrolojik çalışmalarda kullanılabilirliği gösterilmiştir. Bu çalışmada kozmik ışın nötron sayaçları ile toprak nemi ölçümünün detayları ve Türkiye'deki örnek uygulaması ortaya konulmuş olup CRNP ile elde edilen toprak nemi verisinin hidrolojik modelleri iyileştirmede kullanımı tartışılmıştır.

2. KOZMİK IŞIN NÖTRON SAYACI (CRNP)

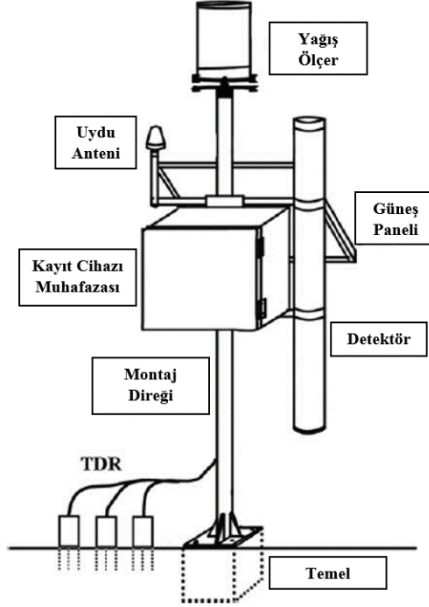
Kozmik Işın Nötron Sayaçları (CRNP) ile toprak neminin ölçümü hidrojen atomları ile yavaşlatılmış nötronların sayılmasına dayanmaktadır. Bu yöntem ile yaklaşık 600 m



Şekil 1 - a) CRNP'den yatay olarak uzaklaşılması ile nötron sayımlarının değişiminin kümülatif oranı, b) Derinlik ile nötron sayımları değişiminin kümülatif oranı arasındaki ilişki. Düz çizgi kuru toprak durumunu, kesikli çizgi ise %40 doyumluk oranındaki toprak durumunu göstermektedir. [6]

çapındaki bir alan için sürekli olarak (saatlik) toprak nemi verisinin ölçülmesi mümkün olmaktadır [15]. Bu seviyedeki bir mekânsal ve zamansal çözünürlük toprak nemi verisine ihtiyaç duyan birçok hidrolojik çalışma için yeterli olmaktadır. CRNP'lerin yataydaki ölçüm alanı büyüklüğü toprak neminden bağımsız olarak belirlenebiliyor olmakla birlikte (Şekil 1-a), düşeydeki ölçüm alanı yani ölçüm derinliği, toprak nem miktarı ile ters orantılıdır (Şekil 1-b) [6].

CRNP'lerin şematik görünümü Şekil 2'de gösterilmektedir. CRNP içerisinde yer alan nötron detektörü bir veri kaydediciye bağlanmıştır. Güneş paneli ile enerji ihtiyacı karşılanan CRNP yudu ya da şebeke bağlantısı ile sürekli olarak anlık veri sağlayabilmektedir.



Şekil 2 - Kozmik Işın Nötron Sayacının Kurulum Şeması [16]

3. CRNP İLE TOPRAK NEMİNİN ELDE EDİLMESİ

3.1. CRNP ile Elde Edilen Yavaşlatılmış Nötron Sayımlarının Çevresel Etkiler Hesaba Katılarak Düzeltilmesi

Kozmik ışınların şiddeti ve dünyamıza ulaştığında göstereceği etkileri farklı bölgelerde farklı şekillerde olabilmektedir. Bu farklılıklar temelde hava basıncı, havadaki su buharı miktarı ve uzaydan gelen kozmik ışınların yoğunluğu ile ilişkilidir.

Atmosferik hava basıncına göre nötron sayılarının düzeltilmesi deniz seviyesinin referans atmosferik basıncı ve atmosferik azaltım katsayısı kullanılarak gerçekleştirilir (Denklemler 1)[17].

$$f_p = \exp[\beta(P - P_{ref})] \quad (1)$$

Kozmik ışın kaynaklı nötronlar yalnızca toprak nemi ile değil hidrojen içeriği olan su buharı ile de yavaşlatılabilirler. Havanın içerdiği neme yönelik olarak nötron sayılarının düzeltilmesi referans koşullardaki mutlak nem değeri kullanılarak gerçekleştirilir. (Denklemler 2) [18].

$$f_{wv} = 1 + 0.0054(\rho_{v0} - \rho_{v0}^{ref}) \quad (2)$$

Son olarak da dünyamıza gelen kozmik ışınların yoğunluğunun değişkenliği göz önüne alınarak bir düzeltme yapılması gerekmektedir. Bu kapsamda ölçüm yapan ve nötron akısı ölçen cihazlar dünyanın farklı yerlerinde bulunmakta ve Neutron Monitor Database (NMDB) kapsamında verilerini yayınlamaktadırlar [19]. Bu cihazlar tarafından gerçekleştirilen ölçümler CRNP'den farklı olarak su miktarından etkilenmez çünkü CRNP yalnızca yavaşlatılmış nötronları ölçmektedir. Referans olarak jeomanyetik kesme rijitliği CRNP'nin kurulduğu alana yakın olan bir NMDB istasyonu seçilerek Denklem-3 kullanılarak gelen nötron akısının değişimine göre düzeltmeler gerçekleştirilir.

$$f_i = \frac{I_m}{I_{ref}} \quad (3)$$

Sayılan her bir etmen için bir düzeltme katsayısı belirlendikten sonra nötron sayılarının düzeltilmesi Denklem-4 kullanılarak gerçekleştirilir. [16]

$$N = N_{raw} \left(\frac{f_p f_{wv}}{f_i} \right) \quad (4)$$

3.2. Düzeltilen Nötron Sayıları ile Toprak Nemi Arasındaki İlişkinin Belirlenmesi

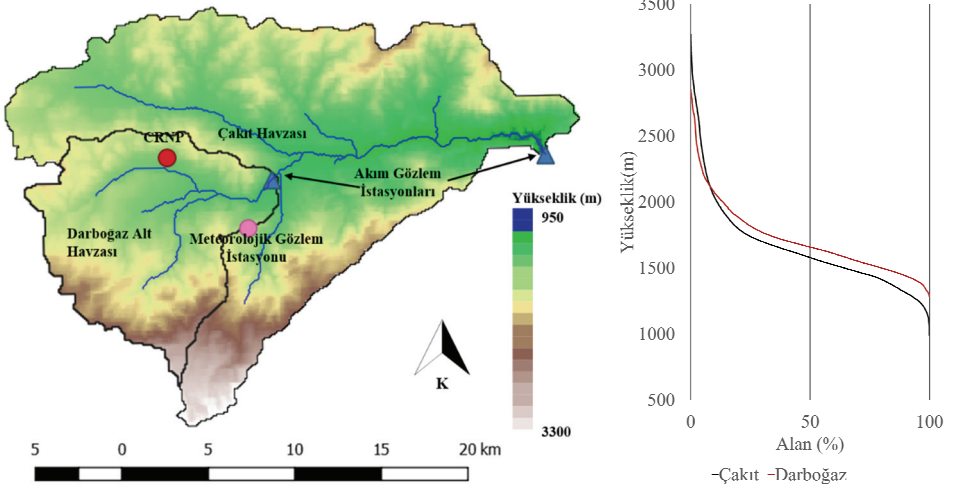
Enerjisi azaltılmış nötron sayıları ile toprak su içeriği arasında doğrusal olmayan ters bir orantı bulunmaktadır [7]. MCNPX nötron parçacık modeli kullanılarak [20] farklı nötron sayımlarında toprak neminin nasıl değiştiğinin hesaplanabilmesi için N_0 kalibrasyon yöntemi oluşturulmuştur [7]. Sonrasında kristal kafes suyu ve topraktaki organik maddelerin de nötron sayılarını doğrudan etkileyeceği ortaya konmuş ve N_0 kalibrasyon yöntemi geliştirilmiştir [21, 22, 23].

Bu yönteme göre toprak nem içeriği Denklem-5 [16] kullanılarak hesaplanabilir.

$$\theta = \left(\frac{0.0808}{\left(\frac{N}{N_0}\right)^{-0.372}} - 0.115 - w_{lat} - w_{SOM} \right) \rho_{bd} \quad (5)$$

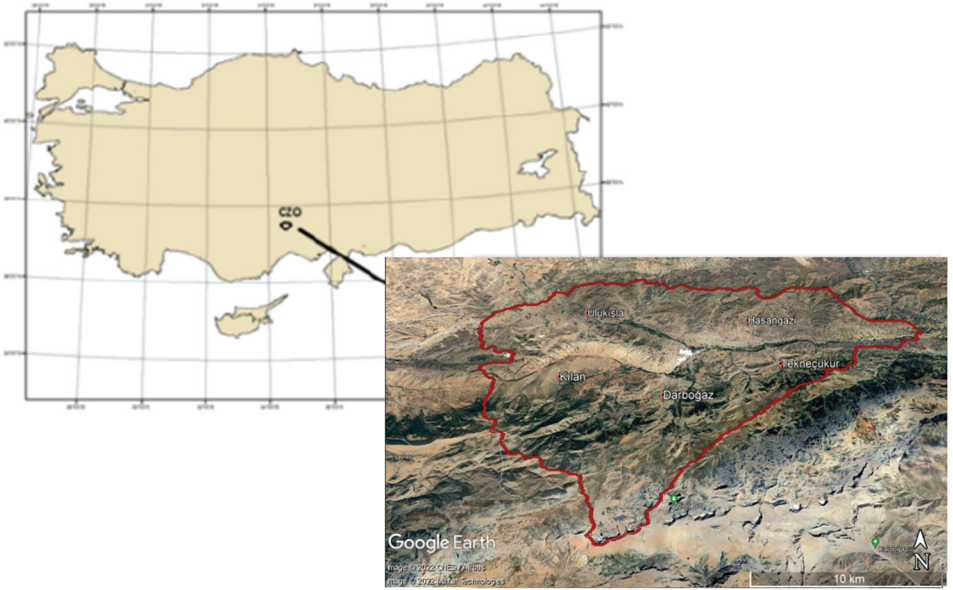
4. ÖRNEK CRNP UYGULAMASI (ÇAKIT HAVZASI)

Çakıt Havzası çalışma alanına (Şekil 3) kurulan CRNP istasyonundan TUBITAK 115Y041 Projesi kapsamında 11 Kasım 2016 – 01 Temmuz 2019 tarihleri arasında veri alınmıştır. 2016 yılı aralık ayında gerçekleşen aşırı kar yağışı nedeniyle meydana gelen veri kaybı hariç bölgeden sürekli olarak saatlik veri akışı sağlanmıştır.



(a)

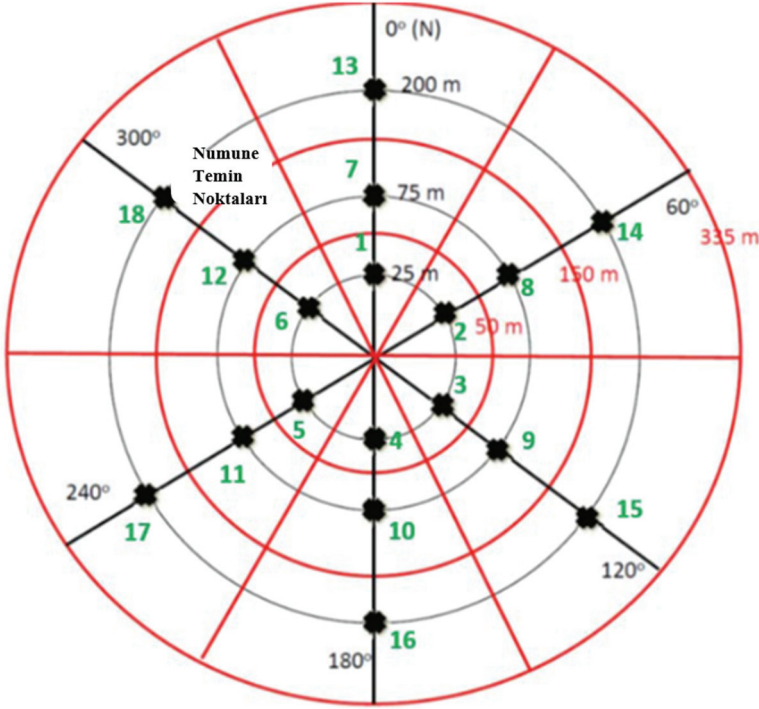
(b)



(c)

Şekil 3 - Niğde İli Çakıt Havzası Çalışma Alanı, a) Sayısal Yükselti Haritası, b) Hipsometrik Eğriler, c) Havzanın Türkiye'deki Yeri

N_0 kalibrasyon yönteminin çalışma alanında uygulanması için gerekli olan referans örnekleme çalışması 3 ve 5 Aralık 2016 tarihlerinde gerçekleştirilmiştir. Belirlenen her bir numune temin noktası (Şekil 4) için 5, 10, 15, 20, 25 ve 30 cm derinliklerinden numuneler alınmıştır [24].



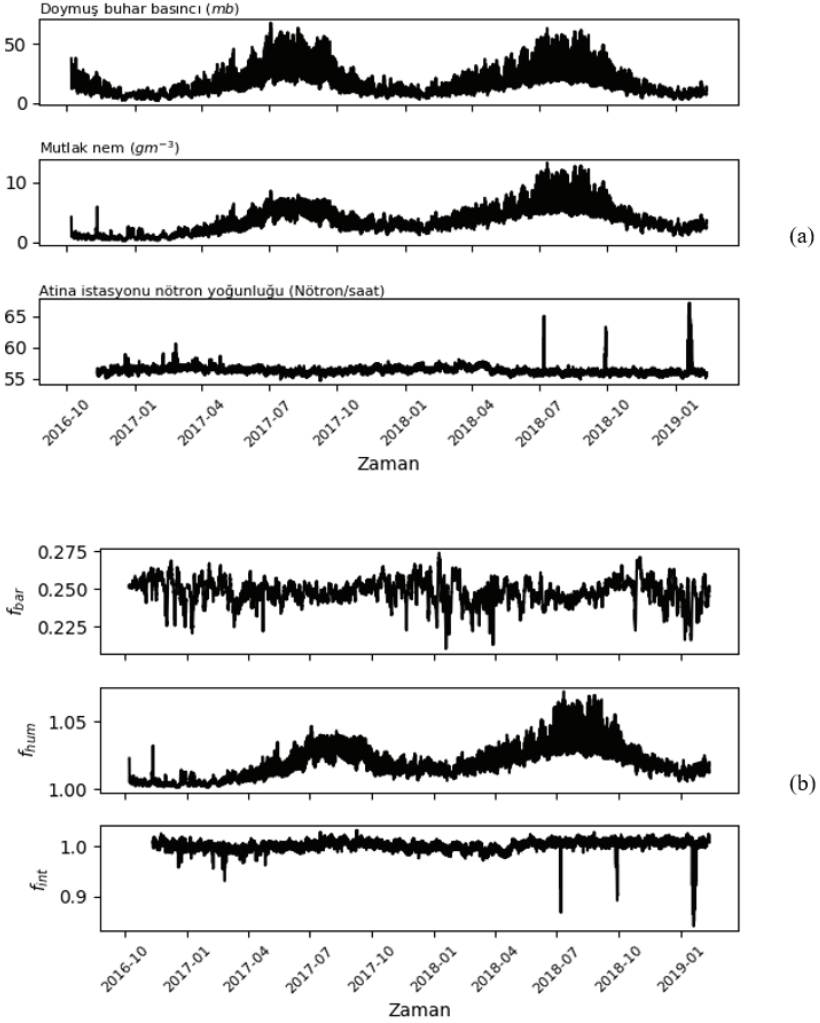
Şekil 4 - Toprak Referans Örnekleme Çalışması Numune Temin Noktaları [24]

Örnekleme çalışmasından elde edilen örneklerin laboratuvar testleri sonucunda ortalama toprak su içeriği 0.148kg/kg olarak belirlenmiştir. Örneklerin ortalama yoğunluğu 1.495 gr/cm³'tür. Kristal kafes suyu ve organik madde değerleri ihmal edilebilecek kadar az olduğu için 0 olarak alınmıştır. Bu durumda Denklem-5'e göre N_0 değeri saatte 1933,4 sayım olarak hesaplanmıştır ve bundan sonraki bütün toprak nemi hesaplamalarında bu değer kullanılmıştır.

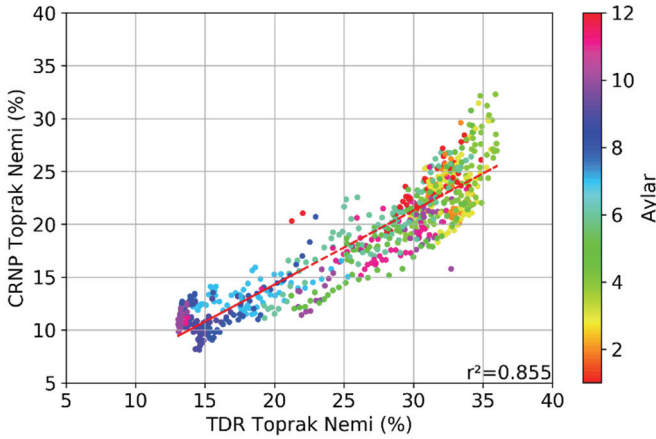
Cihazın kullanımı için gerekli olan nötron sayımı düzeltmeleri, çalışma alanında yer alan Ulukışla Meteorolojik Gözlem İstasyonu'ndan elde edilen veriler ile gerçekleştirilmiştir. Dünyamıza ulaşan kozmik ışınların yoğunluğu ile ilgili düzeltme için NMDB veri tabanında bulunan ve Çakıt Havzasına en yakın jeomanyetik kesme rijitliğine sahip olan Atina istasyonu referans olarak alınmıştır. Her iki istasyonun bulunduğu bölgenin kesme rijitliği 7.9 GV olduğu için ilave bir düzeltme gerçekleştirilmemiştir. Söz konusu düzeltmelerde kullanılan değişkenler ve düzeltme katsayıları Şekil 5'te gösterilmektedir.

N_0 yöntemi kullanıldığında, nötron sayımları doğrudan toprak nemi ile ilişkilendirilir ve hesaplamalar buna göre gerçekleştirilir. Ancak kış aylarında havzada kar birikmesi olduğunda nötron sayımları yalnızca toprak nemi ile değil kar miktarı ile de ilişkilidir ve yavaşlatılan nötronların ne kadarının kardan ne kadarının toprak neminden etkilendiğini anlamak imkânsız hale gelir. Bu nedenle havzada kar yükü olan dönemler analizlerden çıkarılmıştır.

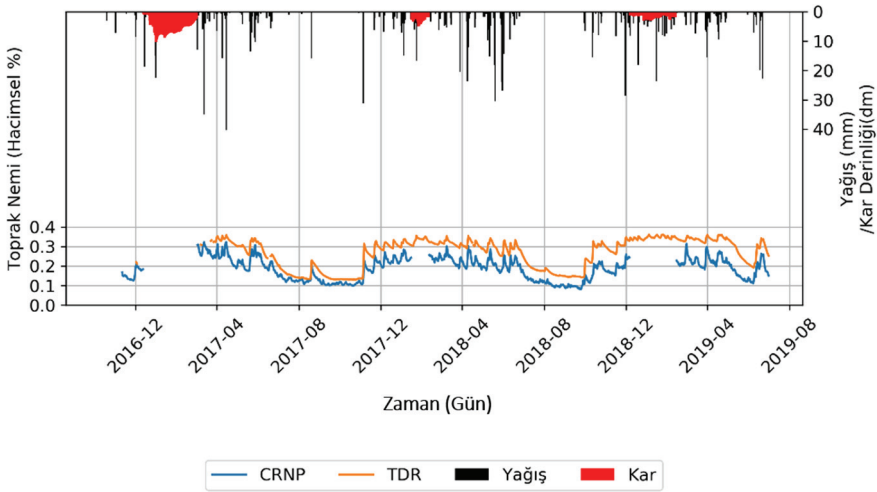
Elde edilen toprak nemi zaman serisi çalışma alanında CRNP'nin hemen yanında 5 cm derinliğe yerleştirilmiş olan TDR toprak nemi ölçüm cihazı ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6a ve Şekil 6b).



Şekil 5 - Çakıt Havzası CRNP Nötron Düzeltmeleri İçin Gerekli Olan Çevresel Değişkenler (a) ve Hesaplanan Düzeltme Katsayıları (b)



(a)



(b)

Şekil 6 - Çakıt Havzasında CRNP ve TDR ile Ölçülen Toprak Neminin Karşılaştırılması a) Dağılım Grafiği, b) Zaman Serisi

5. CRNP TOPRAK NEMİ VERİSİNİN KAVRAMSAL HİDROLOJİK MODELLEMEDE KULLANIMI

Hidrolojik çalışmalarda havza ölçeğinde sürekli veri elde etmek en büyük zorluklardan birini oluşturmaktadır. Kozmik Işın Nötron Algılama (CRNS) ile toprak nemi ölçüm metodu, diğer yöntemlere kıyasla yatayda daha geniş ölçüm alanına sahip olması nedeniyle [6] ölçümleri havzayı daha iyi temsil etmekte ve bu da verilerin hidrolojik çalışmalarda kullanılması için çok önemli bir potansiyel oluşturmaktadır. Hidrolojik modellerin debi verileriyle kalibrasyonu, hidrolojik çalışmalarda en yaygın yaklaşım olmasına rağmen, hidrolojik modellerin toprak nem verileri [25, 26, 27] kullanılarak kalibrasyonunu içeren çalışmalar da

bulunmaktadır. Széles vd. (2020) tarafından gerçekleştirilen çalışmada kavramsal hidrolojik modelin toprak nemi kullanıldığında etkinliğinin önemli ölçüde arttığı sonucuna ulaşılmıştır [27]. Bir diğer çalışmada ise [25] hidrolojik modellerin geliştirilmesinde CRNS kaynaklı verilerin kullanımı değerlendirilmiş ve Birleşik Krallıkta bulunan nemli özelliklere sahip çalışma alanında bu yöntemin hidrolojik model sonuçlarına az da olsa geliştirici etkisi olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada, Türkiye'de bulunan yarı kurak bir çalışma sahası olan Çakıt Havzası için hidrolojik modelin kalibrasyonunda CRNS tabanlı toprak nemi verilerinin kullanılmasının faydaları araştırılmıştır. Çakıt Havzası (421 km²) ve alt havzalarından biri (Darboğaz Alt Havzası – 121 km²) için hidrolojik çalışmalar yapılmıştır (Şekil 3-a) Çakıt havzasının ortalama yüksekliği 1580 m, Darboğaz alt havzasının ortalama yüksekliği ise 1659 m'dir (Şekil 3-b).

Kavramsal hidrolojik modelin kalibrasyonunda toprak nemi verisinin sürekliliği önem arz ettiğinden kar birikmesi vb. nedenlerle CRNP ile ölçülemeyen toprak nemi verisi TDR ve havzadaki meteoroloji istasyonundan elde edilen veriler ile çalıştırılan Noah Yer Sistem Modelinden (Noah LSM) elde edilen toprak nemi verisi ile doldurulmuştur [28].

Debi verileri, Şekil 3-a'da gösterildiği gibi biri Darboğaz alt havzasının çıkışında, diğeri ise Çakıt havzasının çıkışında yer alan iki akım gözlem istasyonundan elde edilmiştir.

5.1. Kullanılan İstatistiksel Ölçütler

Bu çalışmada, gözlenen debi ve toprak nemi değerleri, model ile üretilen değerler ile çeşitli istatistiksel ölçütler kullanılarak karşılaştırılmış ve bu sayede hidrolojik modelleme performansı değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler, kalibrasyon ve doğrulama periyotları ayrı ayrı dikkate alınarak yapılmıştır. Çalışmada kullanılan istatistiksel ölçütler; Nash Sutcliffe Verimliliği (NSE) [29] (Denklem-6), Logaritmik Nash Sutcliffe Verimliliği (logNSE) (Denklem- 7), Ortalama Kare Hatası (RMSE) [30] (Denklem-8), Yüzde Sapma (PBIAS) [31] (Denklem-9), Korelasyon Katsayısı (r²) [32] (Denklem-10), Görelî Hacim Hatası (VE) [33] (Denklem-11) ve Kling-Gupta Verimliliği (KGE)'dir [34] (Denklem-12). NSE hesabında, mükemmel bir modelin NSE değerinin 1 olacağı düşünülerek bir hidrolojik modelin tahmin hatası hesaplanmaktadır. Logaritmik NSE ise genellikle düşük debilerin bir havzanın hakim karakteristiği olduğu durumlarda kullanılır. RMSE, simülasyonların ortalama hatasının doğrudan temsilidir. PBIAS, simüle edilen değerlerin gözlemlenenlerden farklı olma eğiliminin bir göstergesidir. r² değerleri -1 ile 1 arasında değişir; burada -1 tersine korelasyonu, 0 olmayan korelasyonu ve 1 de doğrudan doğrusal ilişkiyi gösterir. VE, kümülatif akım veya toprak nemi verilerinin tahmin edilmesindeki hatadır. KGE, doğrusal ilişkiyi, sapmayı ve varyans oranını temsil eden üç göstergenin birlikte değerlendirilmesi ile hesaplanmaktadır.

$$NSE_x = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (x_{sim}^i - x_{obs}^i)^2}{\sum_{i=1}^N (x_{obs}^i - \bar{x}_{obs})^2} \quad (6)$$

$$\logNSE_x = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\ln(x_{sim}^i) - \ln(x_{obs}^i))^2}{\sum_{i=1}^N (\ln(x_{obs}^i) - \ln(\bar{x}_{obs}))^2} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_{obs}^i - x_{sim}^i)^2} \quad (8)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^N x_{obs}^i - \sum_{i=1}^N x_{sim}^i}{\sum_{i=1}^N x_{sim}^i} \times 100 \quad (9)$$

$$r^2 = \frac{cov(x_{obs}, x_{sim})}{\sigma_{x_{obs}} \sigma_{x_{sim}}} \quad (10)$$

$$VE_X = \frac{\sum_{i=1}^N x_{sim}^i - \sum_{i=1}^N x_{obs}^i}{\sum_{i=1}^N x_{obs}^i} \quad (11)$$

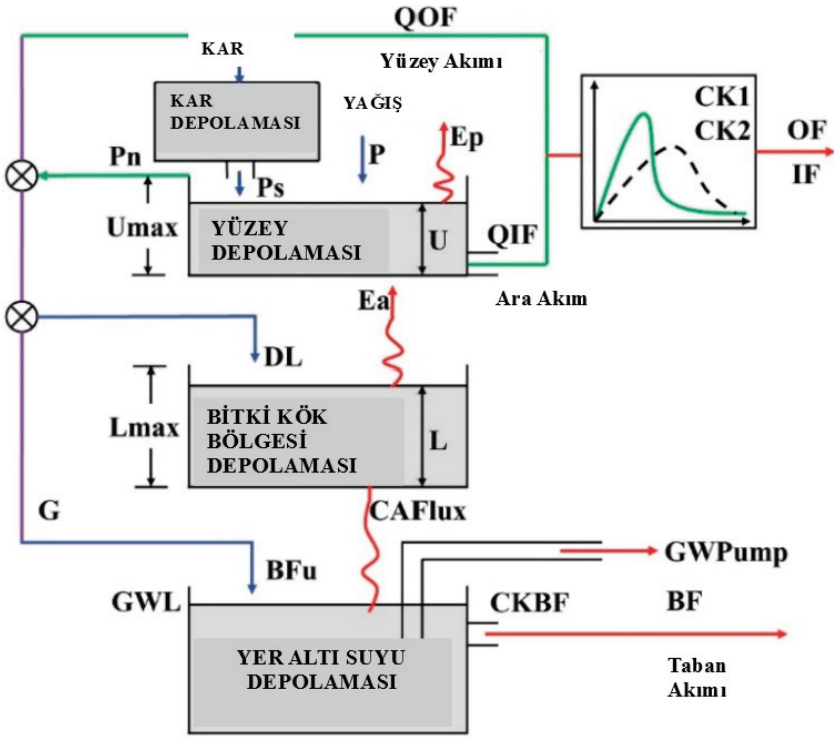
$$KGE_X = \sqrt{(1 - r)^2 + \left(1 - \frac{\sigma_{x_{sim}}}{\sigma_{x_{obs}}}\right)^2 + \left(1 - \frac{\bar{x}_{sim}}{\bar{x}_{obs}}\right)^2} \quad (12)$$

Burada; x_{obs} , x_{sim} sırasıyla gözlemlenen ve simüle edilen değişken zaman serilerini (Örneğin gözlenen ve simüle edilen debi veya toprak nemi), \bar{x} ise değişkenin ortalama değerini ifade eder.

5.2. Nam Kavramsal Modeli

Kavramsal hidrolojik modeller, hidrolojik döngüdeki doğal ilişkileri taklit ederek hidrolojik döngü parametrelerinin tahmin edilmesi için kullanılır. Bu modeller genellikle havzalar ölçeğinde oluşturulur ve çalışılan alanın yağış-akış ilişkisini anlamak için kullanılır. Green-Ampt yöntemi [35], Rasyonel metod [36] ve Soil Conservation Services (SCS) Eğri Numarası yöntemi [37] dahil olmak üzere çeşitli özelliklerde farklı yağış-akış modelleri vardır. Kavramsal hidrolojik modeller, hidrolojik çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tür modellere örnek olarak HBV (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) [38], HEC-HMS (Hidrolojik Modelleme Sistemi) [39] ve NAM (NedborAfstromnings Modeli) [40] verilebilir. Bu çalışmada, hidroloji alanındaki çeşitli uygulamalarda [41, 42, 43, 44, 45, 46] kullanılan toplu ve deterministik bir kavramsal model olan NAM [40] modeli kullanılarak yağış-akış ilişkisi araştırılmıştır. Suyun havzada üç farklı şekilde hareket edeceği (yüzey akışı, yüzey altı ve taban akışı) düşünülerek her bir zaman adımı için toprak neminin sürekli olarak hesaplanması NAM modelinin ana çalışma prensibidir. Bu nedenle gözlemlenen toprak nemi verilerinin kalibrasyonda kullanılması daha çok anlam kazanmaktadır. NAM ve benzeri toplu kavramsal modeller, bir havzanın özelliklerini tek bir parametre kümesi ve değişkenlerle temsil eder; burada, nihai parametre kümesini tahmin etmek için kullanılan modelin fiziksel yapısı, modelin hidrolojik gözlemler kullanılarak kalibrasyonuna dayanır. Her bir zaman adımı için, NAM, Şekil 7'de gösterildiği gibi [47] birbiriyle ilişkili dört tip depolamayı (kar, yüzey, kök veya alt bölge ve yeraltı suyu) kullanarak havza çıktısı olan akış verisini tahmin eder.

Bu çalışmada NAM modelinin kalibrasyonu üç farklı yaklaşımla yapılmıştır. İlk yaklaşım, gözlenen debiyi kullanarak modeli kalibre etmek, ikinci yaklaşım, modeli kök bölgesi için tahmin edilen toprak nemi verilerini kullanarak kalibre etmek ve üçüncü yaklaşım, hem gözlenen debiyi hem de toprak nemini kullanarak modeli kalibre etmektir.



Şekil 7 - NAM Kavramsal Modeli Şeması [46]

İlk yaklaşımda, modelin kalibrasyonu, Nash Sutcliffe Verimliliği değerleri NSE_Q (Denklemler-6) kullanılarak akım ölçme istasyonlarından elde edilen gözlenen akım verileri dikkate alınarak yapılmıştır. Amaç fonksiyonunun $(1 - NSE_Q)$ en küçük değerini elde etmek hedeflenmiştir. İkinci yaklaşımda, amaç fonksiyonunun $(1 - NSE_{SM})$ en küçük değerini elde etmek için toprak nem değerlerinin Nash Sutcliffe Verimliliği (NSE_{SM}) kullanılarak tahmini kök bölgesi toprak nemi verileri ile modelin kalibrasyonu yapılmıştır. Üçüncü yaklaşımda ise, [48] tarafından önerilen metodoloji kullanılarak toprak nemi ve akım verisi birlikte değerlendirilmiştir. Bu yaklaşımda en düşük değeri elde etmek için kullanılan amaç fonksiyonu Denklem-12 ile gösterilmektedir. Bu formüldeki F_Q ve F_{SM} sırasıyla akıma ve toprak nemine bağlı amaç fonksiyonlarını temsil etmekte olup "a" değeri akımın ağırlık katsayısını göstermektedir. Bu değer [49] tarafından önerildiği şekliyle 5/7 olarak alınmıştır. F_{SM} değerinin hesaplanması için Nash Sutcliffe Verimliliği $(1 - NSE_{SM})$ kullanılmakla birlikte F_Q değerinin hesaplanması için (Denklemler-13) farklı istatistiksel yöntemlerin kombinasyonu kullanılmıştır (Denklemler-14,15,16,17).

$$F_{joint} = a \cdot F_Q + (1 - a) \cdot F_{SM} \quad (12)$$

$$F_Q = F_{logNS} + F_{BoxNS} + F_{KGE} + F_{bias} \quad (13)$$

$$F_{logNS} = \frac{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{sim}^i + v) - \ln(Q_{obs}^i + v)]^2}{\sum_{i=1}^N [\ln(Q_{sim}^i + v) - \ln(Q_{obs}^i + v)]^2} \quad (14)$$

v : Sıfırdan Farklı En Küçük Akım Değeri

$$F_{BoxNS} = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{sim}^i - Q_{obs}^i)^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{sim}^i - \bar{Q}_{obs})^2}, \quad (Q' = \frac{(Q+1)^\gamma - 1}{\gamma}, \gamma = 0.3) \quad (15)$$

$$F_{KGE} = \sqrt{(1-r)^2 + \left(1 - \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}}\right)^2 + \left(1 - \frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}\right)^2} \quad (16)$$

$$F_{bias} = \left[\max\left(\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}, \frac{\bar{Q}_{obs}}{\bar{Q}_{sim}}\right) - 1 \right]^2 \quad (17)$$

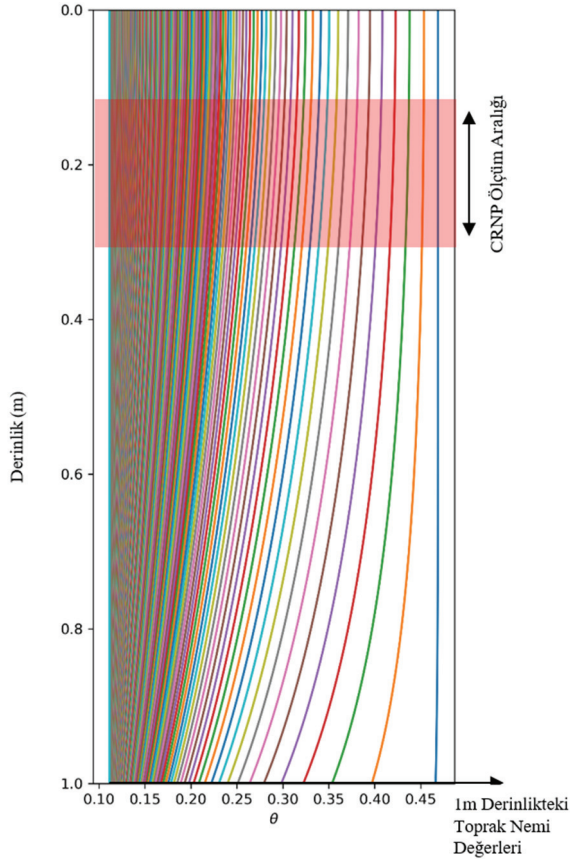
Modelin kalibrasyonu ve doğrulaması yağış, debi, potansiyel buharlaşma ve toprak nemi verileri kullanılarak yapılmıştır. Kalibrasyon dönemi 2016-10-01 ve 2018-09-30 arasındadır, doğrulama dönemi ise 2018-09-30 ve 2019-07-01 arasındadır.

5.3. Toprak Nemi Verisinin Model Çıktılarına Uyumlu Hale Getirilmesi

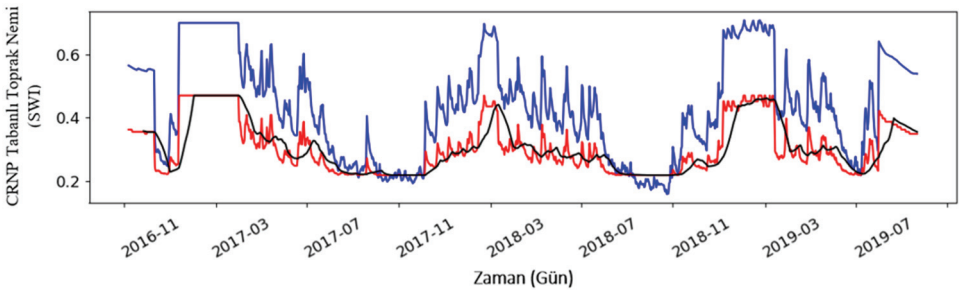
Bu çalışmada temelde CRNP ile elde edilen toprak nemi verileri kullanılmakla birlikte CRNP verisinin temin edilemediği dönemler için TDR ve Noah modelinden elde edilen toprak nemi değerleri kullanılmıştır. Farklı toprak nemi verilerinin farklı özellikleri bulunmakla birlikte bu çalışma için en büyük farklılık ölçüm derinliğinden kaynaklanmaktadır. Çakıt havzasında yer alan TDR 5 cm derinlikten ölçüm yaparken Noah modeli 4 farklı derinlikte toprak nemi değeri verebilmektedir. CRNP'nin ölçüm derinliği ise sabit olmamakla birlikte toprak nem miktarına bağlıdır [50]. CRNP'nin etkin derinliği (z^*) Denklem-18 ile tespit edilir [51].

$$z^* = \frac{5.8}{(\rho_{(bd)\tau} + \theta + 0.0829)} \quad (18)$$

Çalışmalarda kullanılan NAM kavramsal modeli de toprakta tutulan su miktarını bitki kök derinliği üzerinden tahmin etmektedir. Çakıt havzasında yer alan çalışma alanında toprak karakteristiklerine göre [52] 80 cm ile 120 cm arasında değişebilen olası çeşitli bitki köklenme derinliklerinin olduğu varsayılmış olup bu değer çalışmanın geri kalanında 1 metre olarak alınmıştır. Model ayrıca toprak nemini yüzey suyu indeksi (SWI) cinsinden vermekte olup model sonuçları ile ölçüm değerlerinin karşılaştırılabilmesi için ölçüm değerleri gözeneklilik değerine bölünerek SWI değeri elde edilmiş ve hesaplamalar bu şekilde gerçekleştirilmiştir. NAM kavramsal modeli için kabul edilen derinlikte toprak nemi değerlerini elde etmek için Richards denkleminin kapalı form çözümü [53] ve zaman alanında üstel filtreleme yaklaşımı [53] kullanılmıştır. CRNP'nin etkin derinliği bu çalışma için 12 ile 25 cm arasında değişmektedir ve her bir zaman adımı için, Şekil 8 ile verilen toprak nem profili kullanılarak kök bölgesi toprak nemi değerleri elde edilmektedir (Şekil 9).



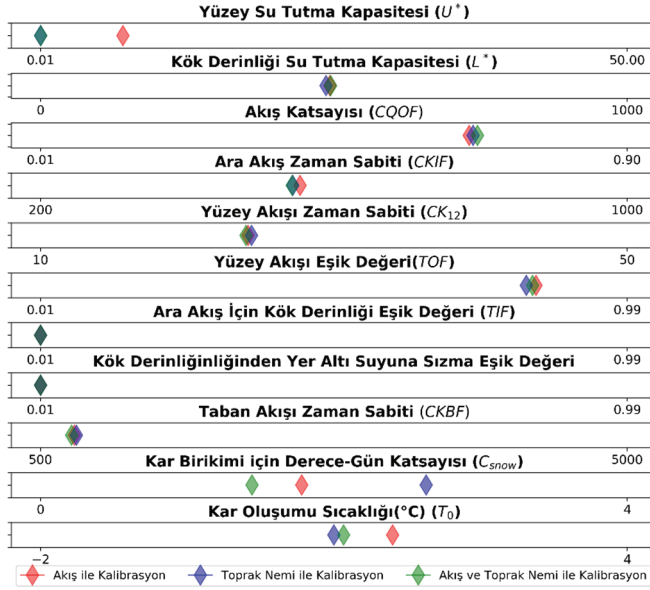
Şekil 8 - Richards Denklemine Göre Çakıt Havzası Toprak Nemi Düşey Profilleri, farklı renkler farklı muhtemel toprak nemi profillerini temsil etmektedir.



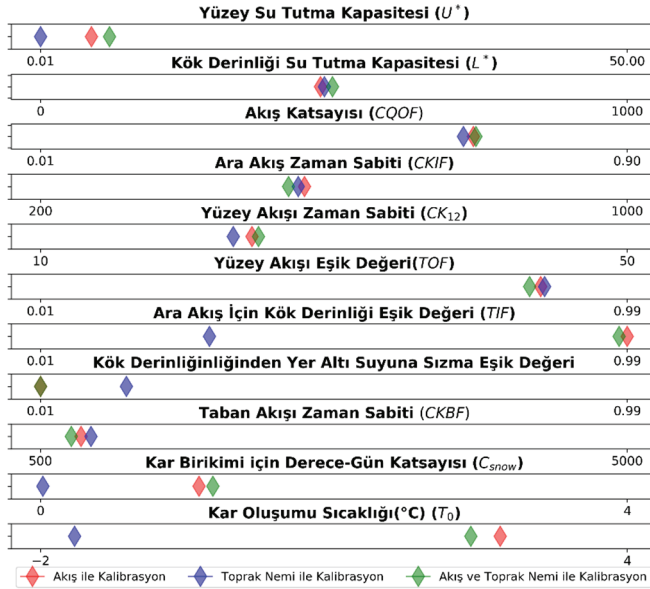
Şekil 9 - Bitki Kök Derinliği İçin Hesaplanan Toprak Nemi (Mavi: Ölçüm derinliğindeki toprak nemi, Kırmızı: Richards Denklemi ile Hesaplanan Kök Derinliği Toprak Nemi, Siyah: Üstel Filtreleme ile hesaplanan toprak nemi)

5.4. Nam Modelinden Elde Edilen Sonuçlar

Üç farklı kalibrasyon yöntemi ile NAM modelinde kullanılan parametreler Çakıt ve Darboğaz havzalarında kalibre edilmiş, elde edilen sonuçlar Şekil 10 ve Şekil 11'de gösterilmiştir.

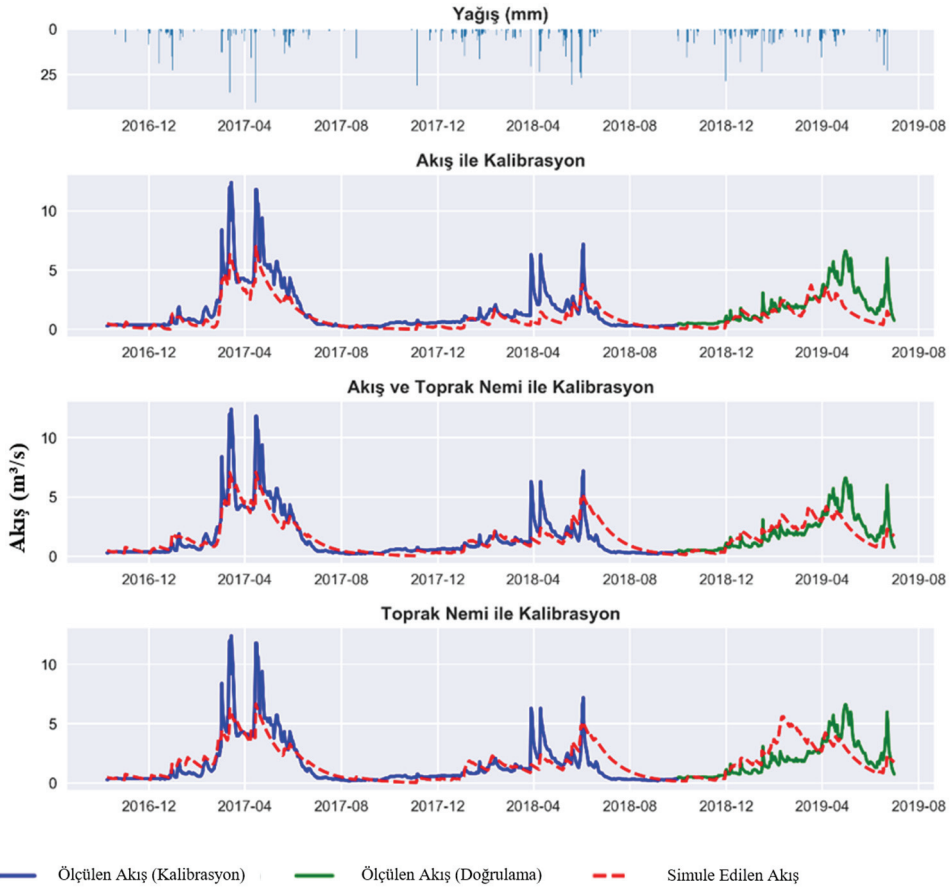


Şekil 10 - Çakıt Havzası İçin Kalibre Edilen Hidrolojik Model Parametreleri

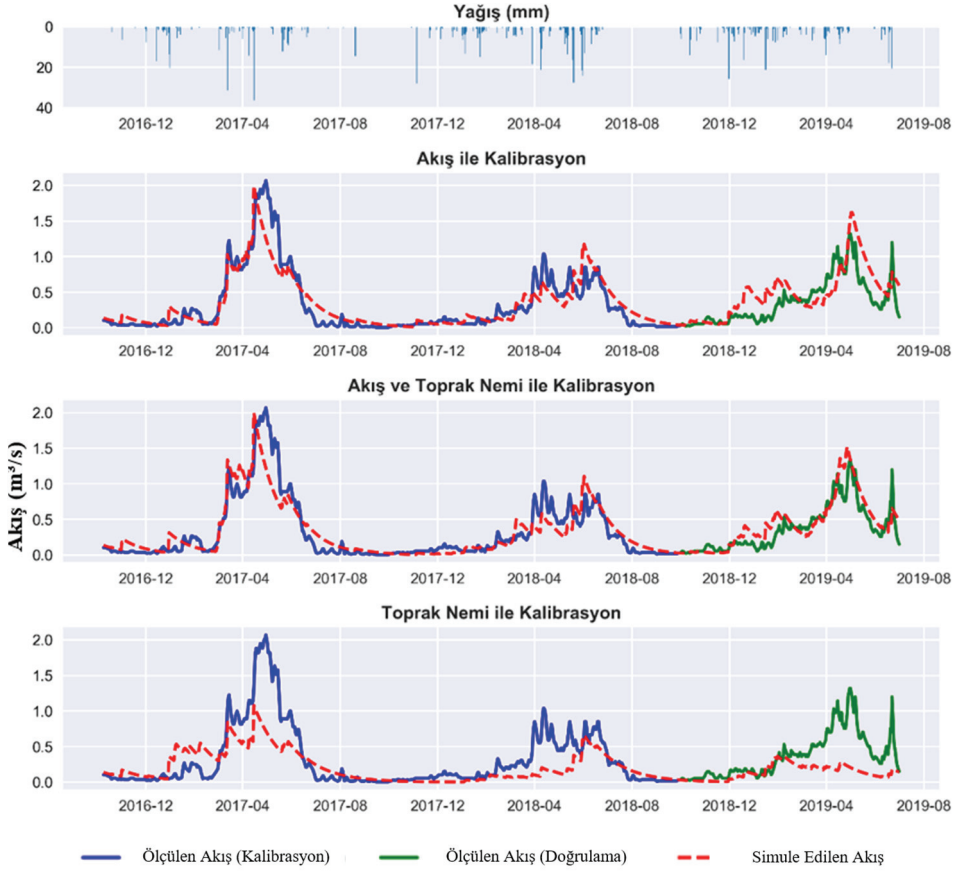


Şekil 11 - Darboğaz Alt Havzası İçin Kalibre Edilen Hidrolojik Model Parametreleri

NAM hidrolojik modeli, kalibrasyon sonucu elde edilen parametreler kullanılarak çalıştırılmıştır. Çakıt havzası için, NAM modelinin kalibre edilen parametrelerinden Maksimum Yüzey Suyu Depolama(U^*), Kar Birikimi Derece-Gün Katsayısı (C_{snow}) ve Kar Oluşumu Sıcaklığı (T_0) farklı kalibrasyon türlerinde farklı değerler almıştır. Bu havzada toprak nemi kalibreli ve debi kalibreli modeller arasındaki temel fark, yüzey ve kar depolama hesaplamalarında ortaya çıkmaktadır. Çakıt Havzası'ndan farklı olarak Darboğaz Havzası için hesaplanan parametreler kalibrasyon tipine göre daha fazla farklılık göstermekte olup, bu havza için tüm su depolama çeşitlerinin hesaplanması her kalibrasyon tipi için birbirinden farklılık göstermektedir. Üç farklı kalibrasyon yaklaşımı ile elde edilen sonuçlar Şekil 12'de (Çakıt havzası) ve Şekil 13'te (Darboğaz alt havzası) sunulmaktadır.



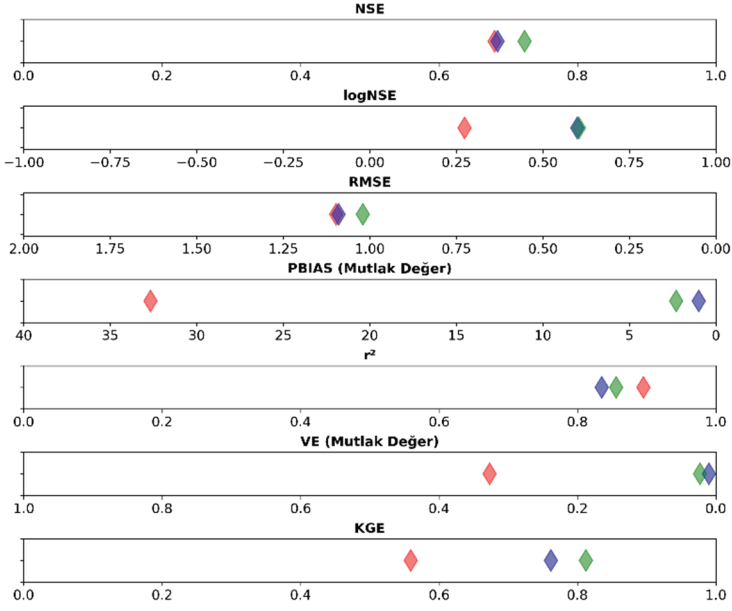
Şekil 12 - Çakıt Havzası İçin Hidrolojik Model ile Simüle Edilmiş ve Gözlenmiş Debi Değerleri



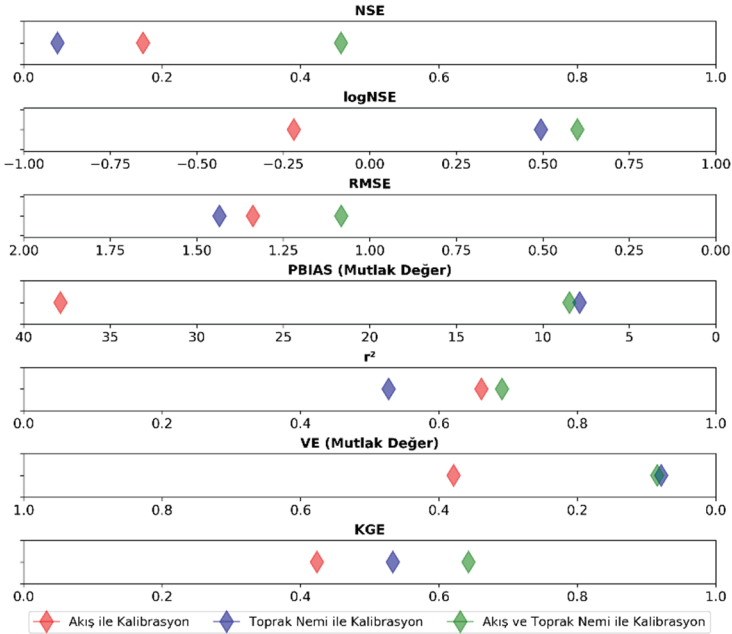
Şekil 13 - Darboğaz Havzası İçin Hidrolojik Model ile Simüle Edilmiş ve Gözlenmiş Debi Değerleri

Model performanslarını gösteren istatistikler Şekil 14 ve Şekil 15 ile gösterilmektedir. Bu şekillerde gösterilen sonuçlar şeklin sağ tarafına yaklaştıkça model istatistiklerinin de iyileştiği görülebilmektedir. Söz konusu grafiklerde, debi ve toprak nemi ile kalibrasyon sonucu elde edilen değerlerin yalnızca debi ile elde edilen değerlere kıyasla genel olarak şekillerin sağına daha yakın olması toprak nemi verisi ile hidrolojik model istatistiklerinin iyileştirilebildiğinin bir göstergesidir.

Şekil 14 ve Şekil 15 ile sunulan sonuçlar değerlendirildiğinde, modele debi verileriyle birlikte toprak nemi verilerinin dahil edilmesi durumunda ortaya çıkan istatistiklerin daha iyi olduğu görülebilmektedir. NSE ve KGE değerleri toprak neminin modelde kullanılması ile önemli ölçüde iyileştirilmiştir. İki havza karşılaştırıldığında, toprak nemi verileri kalibrasyona dahil edildiğinde Darboğaz alt havzası için istatistiksel ölçütlerin iyileşmesi daha belirgin olmuştur. İstatistiksel ölçütlerin bir kısmında, kalibrasyon için tek başına toprak nemi verilerinin kullanılması bile model tahminlerini iyileştirmiştir, ancak en iyi sonuçlar toprak nemi ve debi değerleri birlikte kullanıldığında elde edilmektedir.

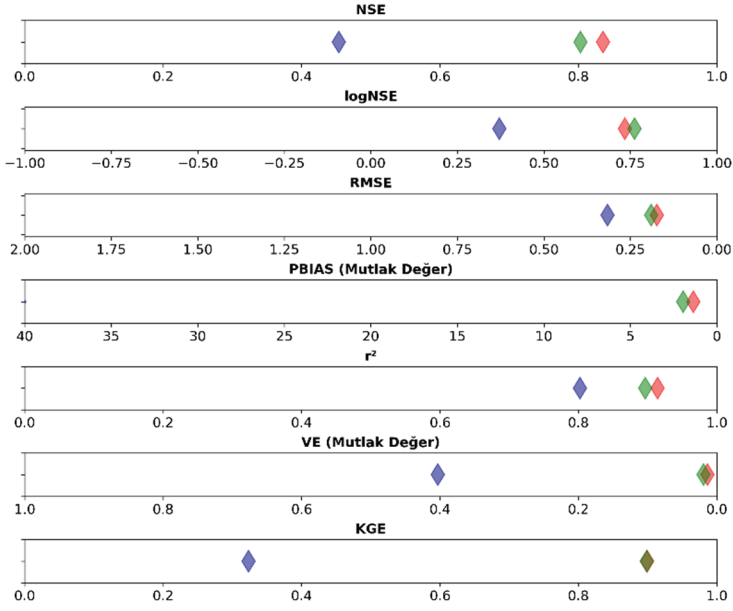


(a)

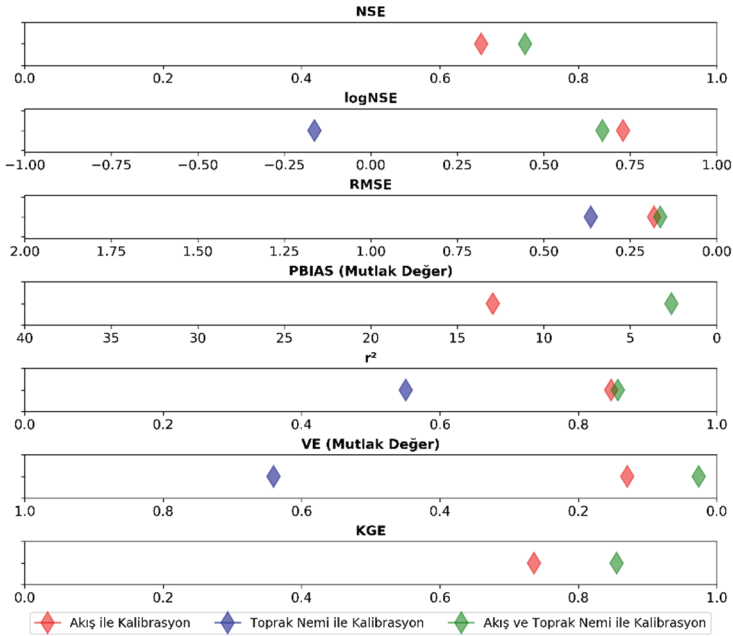


(b)

Şekil 14 - Çakıt Havzası için üç Farklı Kalibrasyon Yöntemi ile Elde Edilen Model İstatistikleri: (a) Kalibrasyon Dönemi (b) Doğrulama Dönemi



(a)



(b)

Şekil 15 - Darboğaz Havzası için üç Farklı Kalibrasyon Yöntemi ile Elde Edilen Model İstatistikleri: (a) Kalibrasyon Dönemi (b) Doğrulama Dönemi

Modelin kalibrasyon periyodu, bu tür çalışmalar için çok sınırlı bir zaman aralığı olarak değerlendirilebilecek olan iki su yılını kapsamaktadır. Kalibrasyon için kullanılan sürenin yetersizliğine rağmen, doğrulama periyodunda debi değerleri oldukça doğru bir şekilde tahmin edilebilmiştir. Kalibrasyon periyodunun daha uzun olduğu koşullarda, modelin ısınma süresi de hesaba katılarak ilk birkaç aylık kalibrasyon verileri analizlerden çıkarılarak çok daha iyi istatistikler elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, CRNP'nin eksik verileri diğer toprak nemi verileri (TDR ve Noah LSM) ile doldurulmuş olup, CRNP verilerinin analizin tamamında kullanımı modelin verimini daha da artırabilmektedir. Ayrıca, Çakıt Havzasında kalibrasyonun ikinci yılında meydana gelen pik akımlar bu çalışmada kullanılan modelleme yaklaşımı ile tam doğru bir şekilde tahmin edilememektedir. Bu durum muhtemel sebeplerinden biri, NAM modelinin kar erimesini havza şartlarını tam olarak yansıtacak şekilde modelleyememesi olabilir. Havzanın yüksek bölgelerinde kar birikmesi olan dönemlerde şiddetli sağanak yağışların olması [55] yağışın kinetik enerjisi ile kar yükünün erimesine yol açmaktadır. Bu durum hidrolojik modellere yansıtılmadığından yoğun sağanak yağış görülen dönemlerde pik akımlar yakalanamayabilmektedir. Yukarıda belirtilen eksikliklere rağmen, NAM modeli her iki havza için de çok iyi performans göstermiştir ve model istatistiklerini iyileştirmede akım ve toprak nemi verilerini birlikte kullanan bütünlük kalibrasyonunun etkisi açıkça görülmektedir.

Kavramsal modelde toprak nemi verileri (CRNP) kullanıldığında istatistiksel ölçütlerin büyük bölümünün iyileştirildiği görülmektedir. KGE ve NSE değerleri, hem kalibrasyon hem de doğrulama dönemlerinde yalnızca debi ile gerçekleştirilen kalibrasyona kıyasla oldukça iyileştirilmiştir. NAM modeli daha küçük alanların hidrolojik davranışını temsil etmede daha başarılı olduğu için iyileştirmelerin etkileri Darboğaz alt havzasında Çakıt havzasından daha belirgindir. Bazı parametreler için sadece toprak nemi verileri kullanılarak hidrolojik modelin kalibrasyonu, hidrolojik modelin sadece debi verileri kullanılarak kalibrasyonundan daha iyi olsa da, modelin gerçek anlamda iyileştirilmesi toprak nemi ve debi verileri birlikte kullanıldığında mümkün olmaktadır. Özellikle akım ölçümlerinin yeterli olmadığı havzalarda, CRNP bazlı toprak nemi verisi hidrolojik modellerin etkinliği artırmada kullanılabilir.

6. SONUÇLAR

Bu çalışma ile Türkiye'de ilk defa Kozmik Işın Nötron Sayacının (CRNP) toprak nemi ölçümü için uygulaması Çakıt Havzasında gerçekleştirilmiş ve elde edilen toprak nemi değerleri NAM hidrolojik modelinin iyileştirilmesinde kullanılmıştır. Çakıt Havzasında ölçülen yavaşlatılmış nötron sayımlarının toprak nemi hesaplanmasında kullanılması için, çalışma alanında yer alan meteoroloji gözlem istasyonundan ve Çakıt Havzasına benzer jeomanyetik özelliklere sahip olan Atina NMDB istasyonundan elde edilen veriler ile gerekli düzeltmeler yapılmıştır. Kozmik Işın Nötron Sayacının yakınlarında yer alan TDR ölçüm aleti ile de CRNP ölçümleri karşılaştırılmıştır. Her iki toprak nemi verisi arasında çok yüksek korelasyon görülmekle birlikte ölçüm derinliklerinin farklı olması sebebiyle TDR verisi düzenli bir şekilde CRNP verisinden bir miktar yüksek çıkmaktadır. CRNP'nin ölçüm derinliği toprak nem miktarına bağlı olarak 0-12 ile 0-76 cm arasında değişmekte iken TDR ölçümleri 5 cm derinlikten gerçekleştirilmiştir. Yüzeğe yakın olan cihazın biraz daha yüksek değerler vermesi bu anlamda normal karşılanmalıdır. CRNP ile TDR verisinin yağışlara verdiği tepkilerin aynı olması da CRNP'nin güvenilirliğini artırmaktadır. Sonuç olarak

onlarca hektar genişliğindeki bir alanın toprak nemi ile ilgili olarak düzenli veri sağlayabilen CRNP cihazı Çakıt Havzası çalışma alanında denenmiş ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Yukarıda belirtilen bütün faydalarının yanı sıra, CRNP cihazının iki temel problemi bulunmaktadır. Birincisi kar birikmesinin olduğu dönemlerde veri sağlayamıyor olması, ikincisi de ölçüm derinliğinin sabit olmayıp nem içeriğine bağlı olarak 12 ile 76 cm arasında değişmesidir. Bu iki problemin göz ardı edilebildiği hidrolojik ve tarımsal çalışmalarda geniş alanlarda sürekli olarak güvenilir veri sağlaması sebebiyle Kozmik Işın Nötron Sayaçları diğer toprak nemi ölçüm yöntemlerine önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Ayrıca kozmik ışın sayımı tabanlı teknolojiler kar yükünün belirlenmesi için de kullanılmaktadır. Gelecekte kar ve toprak nemi miktarlarının ayırımının yapılabileceği bir sistemin geliştirilmesi ve CRNP toprak nemi ölçümünün potansiyelinin artırılması da mümkündür.

Bu çalışmada kullanılan CRNP Türkiye’de kullanılan ilk ve tek CRNP’dir. Dünyada CRNP verilerinin bir araya getirilip değerlendirilmesi amacıyla oluşturulmuş olan ulusal ve uluslararası veri ağları bulunmaktadır. Gelecekte yapılacak hidrolojik ve tarımsal araştırmalar ve uygulamalar için, geniş alanlarda toprak nemi ölçümündeki etkinliği bu çalışma ile de sunulmuş olan CRNP istasyonları Türkiye’de farklı noktalarda da kurulmalı ve ülkemiz için de bir CRNP veri ağı oluşturulmalıdır.

Semboller

BF	Taban akışı
BFu	Yüzeyden yer altı suyu depolamasına sızan su
CKBF	Taban akışı zaman sabiti
CKBF	Taban akışı zaman sabiti
CKIF	Ara akış zaman sabiti
CQOF	Yüzey akışı zaman sabiti
C_{snow}	Kar oluşumu için derece-gün katsayısı
Ea	Terleme
Ep	Buharlaştırma
f_i	Gelen nötron yoğunluğu için düzeltme faktörü.
f_p	Atmosfer basınç değişimi için düzeltme faktörü
f_{wv}	Atmosferik su buharı değişiklikleri için düzeltme faktörü
G	Yer altı suyu depolaması
GWL	Yer altı suyu seviyesi
GWPump	Yer altı suyu çekimi
IF	Ara akış
I_m	Herhangi bir belirli zaman için nötron sayacının sayımı

I_{ref}	Aynı nötron sayacı için keyfi olarak belirlenen belirli bir zaman için referans nötron sayımı.
KGE	Kling Gupta verimliliği
L*,L_{max}	Kök derinliği su tutma kapasitesi
logNSE	Logaritmik Nash Sutcliffe verimliliği
N	Düzeltilmiş nötron akısı
N	Referans basıncına ve nötron yoğunluğuna normalize edilen nötron sayımı
N₀	Aynı referans koşulları altında kuru toprakta nötron sayımı.
N_{raw}	CRNP'den alınan düzeltilmemiş nötron sayısı
NSE	Nash sutcliffe verimliliği
OF	Yüzey akışı
P	Yağış (hidrolojik model için)
P	Atmosferik basınç (mb)
PBIAS	Yüzde sapma
P_{ref}	Referans atmosferik basınç (mb) (Deniz seviyesindeki atmosferik basınç (1013.25 hPa) genellikle kullanılır.)
Ps	Kar erimesi kaynaklı yüzey suyu
QIF	Ara akış debisi
QOF	Yüzey akış debisi
r²	Korelasyon katsayısı
RMSE	Ortalama Kare Hatası
T₀	Kar oluşumu sıcaklığı
TIF	Ara akış için kök derinliği eşik değeri
TOF	Yüzey akışı eşik değeri
U*,U_{max}	Yüzey su tutma kapasitesi
VE	Görelî hacim hatası
W_{lat}	Kristal kafes suyu
W_{SOM}	Toprak organik maddesinin su eşdeğeri
z*	Etkin derinlik (cm)
β	Atmosferik azaltım katsayısı (cm ² g ⁻¹ ya da mb ⁻¹)
θ	Hacimsel su varlığı

ρ_{bd}	Toprağın yığın yoğunluğu (g/cm^3).
ρ_{v0}	Yüzeğe yakın mutlak nemi ($g\ m^{-3}$)
ρ_{v0}^{ref}	Referans mutlak nem ($g\ m^{-3}$)

Teşekkür

Bu çalışma TUBITAK 115Y041 Projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir.

Kaynaklar

- [1] G. C. Topp, J. Davis, A. P. Annan, “Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines”, *Water resources research*, 16(3), 574–582, 1980.
- [2] J. Huisman, S. Hubbard, J. Redman, A. Annan, “Measuring soil water content with ground penetrating radar”, *Vadose zone journal*, 2(4), 476–491, 2003.
- [3] S. Hong & I. Shin, “A physically-based inversion algorithm for retrieving soil moisture in passive microwave remote sensing”, *Journal of hydrology*, 405(1-2), 24–30, 2011.
- [4] D. Entekhabi, S. Yueh, P. E. O’Neill, K. H. Kellogg, A. Allen, R. Bindlish, M. Brown, S. Chan, A. Colliander, W. T. Crow, vd. , “Smop handbook–soil moisture active passive: Mapping soil moisture and freeze/thaw from space”, 2014.
- [5] W. Gardner & D. Kirkham, “Determination of soil moisture by neutron scattering”, *Soil Science*, 73(5), 391–402, 1952.
- [6] M. Zreda, D. Desilets, T. Ferré, R. L. Scott, “Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons”, *Geophysical research letters*, 35(21), 2008.
- [7] D. Desilets, M. Zreda, T. Ferré, “Nature’s neutron probe: Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays”, *Water Resources Research*, 46(11), 2010.
- [8] V. F. Hess, “Observations of the penetrating radiation on seven balloon flights”, *Physik. Zeitschr*, 13, 1084–1091, 1912.
- [9] S. Glasstone & M. C. Edlund, “The elements of nuclear reactor theory”, 1952.
- [10] H. A. Bethe, S. A. Korff, G. Placzek, “On the interpretation of neutron measurements in cosmic radiation”, *Physical Review*, 57(7), 573, 1940.
- [11] L. Hendrick & R. Edge, “Cosmic-ray neutrons near the earth”, *Physical Review*, 145(4), 1023, 1966.
- [12] M. Kodama, S. Kudo, T. Kosuge, “Application of atmospheric neutrons to soil moisture measurement”, *Soil science*, 140(4), 237–242, 1985.
- [13] G. F. Knoll, *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons, 2010.

- [14] Bulut, B., YILMAZ, M. T., “Türkiye’deki 2007 ve 2013 Yılı Kuraklıklarının NOAH Hidrolojik Modeli ile İncelenmesi.” *Teknik Dergi*, 27(4), 7619-7634, 2016.
- [15] D. Desilets & M. Zreda, “Footprint diameter for a cosmic-ray soil moisture probe: Theory and monte carlo simulations”, *Water Resources Research*, 49(6), 3566–3575, 2013.
- [16] A. Hawdon, D. McJannet, J. Wallace, “Calibration and correction procedures for cosmic-ray neutron soil moisture probes located across australia”, *Water Resources Research*, 50(6), 5029–5043, 2014.
- [17] D. Desilets, M. Zreda, T. Prabu, “Extended scaling factors for in situ cosmogenic nuclides: new measurements at low latitude”, *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3-4), 265–276, 2006.
- [18] R. Rosolem, W. Shuttleworth, M. Zreda, T. Franz, X. Zeng, S. Kurc, “The effect of atmospheric water vapor on neutron count in the cosmic-ray soil moisture observing system”, *Journal of Hydrometeorology*, 14(5), 1659– 1671, 2013.
- [19] J. A. Simpson, “The cosmic ray nucleonic component: The invention and scientific uses of the neutron monitor”, in *Cosmic Rays and Earth*, 11–32, Springer, 2000.
- [20] D. B. Pelowitz, “MCNPXTM user’s manual”, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, 5(369), 2005.
- [21] M. Zreda, W. Shuttleworth, X. Zeng, C. Zweck, D. Desilets, T. Franz, R. Rosolem, “Cosmos: the cosmic-ray soil moisture observing system”, *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(11), 4079–4099, 2012.
- [22] T. Franz, M. Zreda, R. Rosolem, T. Ferre, “A universal calibration function for determination of soil moisture with cosmic-ray neutrons”, *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(2), 453–460, 2013.
- [23] J. Dong, T. E. Ochsner, M. Zreda, M. H. Cosh, C. B. Zou, “Calibration and validation of the cosmos rover for surface soil moisture measurement”, *Vadose zone journal*, 13(4), 2014.
- [24] G. Demir, “Soil water content estimation from point scale to plot scale,” *Orta Doğu Teknik Üniversitesi*, 2018.
- [25] K. Dimitrova-Petrova, J. Geris, E. M. Wilkinson, R. Rosolem, L. Verrot, A. Lilly, C. Soulsby, “Opportunities and challenges in using catchment-scale storage estimates from cosmic ray neutron sensors for rainfall-runoff modelling”, *Journal of Hydrology*, 124-878, 2020.
- [26] D. Kundu, R. W. Vervoort, F. F. van Ogtrop, “The value of remotely sensed surface soil moisture for model calibration using swat”, *Hydrological Processes*, 31(15), pp. 2764–2780, 2017.
- [27] B. Széles, J. Parajka, P. Hogan, R. Silasari, L. Pavlin, P. Strauss, G. Blöschl, “The added value of different data types for calibrating and testing a hydrologic model in a small catchment”, *Water resources research*, 56(10), 2020.

- [28] M. B. Duygu & Z. Akyürek, “Using cosmic-ray neutron probes in validating satellite soil moisture products and land surface models”, *Water*, 11(7), 1362, 2019.
- [29] J. E. Nash & J. V. Sutcliffe, “River flow forecasting through conceptual models part i—a discussion of principles”, *Journal of hydrology*, 10(3), 282–290, 1970.
- [30] J. S. Armstrong & F. Collopy, “Error measures for generalizing about forecasting methods: Empirical comparisons”, *International journal of forecasting*, 8(1), 69–80, 1992.
- [31] S. Sorooshian, Q. Duan, V. K. Gupta, “Calibration of rainfall-runoff models: Application of global optimization to the sacramento soil moisture accounting model”, *Water resources research*, 29(4), 1185–1194, 1993.
- [32] J. Devore, *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*. Nelson Education, 2011.
- [33] R. E. Criss & W. E. Winston, “Do nash values have value? discussion and alternate proposals”, *Hydrological Processes: An International Journal*, 22(14), 2723–2725, 2008.
- [34] H. V. Gupta & H. Kling, “On typical range, sensitivity, and normalization of mean squared error and nash-sutcliffe efficiency type metrics”, *Water Resources Research*, 47(10), 2011.
- [35] W. H. Green & G. Ampt, “Studies on soil physics.”, *The Journal of Agricultural Science*, 4(1), 1–24, 1911.
- [36] M. B. McPherson, “Some notes on the rational method of storm drain design”, *American Society of Civil Engineers*, 1969.
- [37] A. T. Hjelmfelt Jr, “Investigation of curve number procedure”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(6), 725–737, 1991.
- [38] S. Bergström, *Development and application of a conceptual runoff model for Scandinavian catchments*. 1976.
- [39] A. D. Feldman, “Hec models for water resources system simulation: theory and experience”, in *Advances in hydroscience*, 12, 297–423, Elsevier, 1981.
- [40] S. A. Nielsen & E. Hansen, “Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis”, *Hydrology Research*, 4(3), 171–190, 1973.
- [41] N. Agrawal & T. Desmukh, “Rainfall runoff modeling using Mike 11 NAM – a review”, *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 3(6), 659–667, 2016.
- [42] C. Doulgeris, P. Georgiou, D. Papadimos, D. Papamichail, “Evaluating three different model setups in the Mike 11 NAM model”, 241–249, 2011.
- [43] C. Doulgeris, P. Georgiou, D. Papadimos, D. Papamichail, “Ecosystem approach to water resources management using the Mike 11 modeling system in the strymonas river and lake kerkini”, *Journal of environmental management*, 94(1), 132–143, 2012.

- [44] E. K. Lafdani, A. M. Nia, A. Pahlavanravi, A. Ahmadi, M. Jajarmizadeh”, Research article daily rainfall-runoff prediction and simulation using ann, anfansand conceptual hydrological Mike11/NAM models”, *Int. J. Eng. Technol*, 1, 32–50, 2013.
- [45] M. M. Rahman, D. Arya, N. Goel, A. P. Dhamy, “Design flow and stage computations in the teesta river, bangladesh, using frequency analysis and Mike11 modeling”, *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(2), 176–186, 2011.
- [46] F. T. Teshome, H. K. Bayabil, L. Thakural, F. G. Welidehanna, vd. , “Verification of the Mike11-NAM model for simulating streamflow”, *Journal of Environmental Protection*, 11(2), 152, 2020.
- [47] F. T. Teshome, H. K. Bayabil, L. Thakural, F. G. Welidehanna, vd. , “Verification of the mike11-nam model for simulating streamflow,” *Journal of Environmental Protection*, 11(2), 152, 2020.
- [48] Y. Li, S. Grimaldi, V. R. Pauwels, J. P. Walker, “Hydrologic model calibration using remotely sensed soil moisture and discharge measurements: The impact on predictions at gauged and ungauged locations” *Journal of hydrology*, 557, 897–909, 2018.
- [49] C. Francois, A. Quesney, C. Ottlé, “Sequential assimilation of ERS-1 SAR data into a coupled land surface–hydrological model using an extended kalman filter”, *Journal of Hydrometeorology*, 4(2), 473–487, 2003.
- [50] M. Köhli, M. Schrön, M. Zreda, U. Schmidt, P. Dietrich, S. Zacharias”, Footprint characteristics revised for field scale soil moisture monitoring with cosmic-ray neutrons”, *Water Resources Research*, 51(7), 5772–5790, 2015.
- [51] T. E. Franz, M. Zreda, T. Ferre, R. Rosolem, C. Zweck, S. Stillman, X. Zeng, W. Shuttleworth, “Measurement depth of the cosmic ray soil moisture probe affected by hydrogen from various sources”, *Water Resources Research*, 48(8), 2012.
- [52] A. Phocaidés, “Technical handbook on pressurized irrigation techniques”, FAO, Rome, 372, 2000.
- [53] M. T. Van Genuchten, “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils”, *Soil science society of America journal*, 44(5), 892–898, 1980.
- [54] W. Wagner, G. Lemoine, H. Rott, “A method for estimating soil moisture from ers scatterometer and soil data”, *Remote Sensing of Environment*, 70(2), 191–207, 1999.
- [55] R. D. Harr, “Effects of clearcutting on rain-on-snow runoff in western oregon: A new look at old studies,” *Water Resources Research*, 70(7), 1095–1100, 1986.

Hidrolojik Model Kalibrasyonunda Uydu Tabanlı Aylık Buharlaştırma ve LAI Verilerinin Kullanılması

Muhammet Bahattin AVCUOĞLU¹
Mehmet Cüneyd DEMİREL²

ÖZ

Hidrolojik model parametreleri geleneksel yaklaşımda havza çıkışındaki akım gözlem istasyonlarından (AGİ) elde edilen günlük akım verileriyle tahmin edilmeye çalışılır. Modern yaklaşımda ise akım verileri yanında açık erişimli uydu tabanlı uzaktan algılama verilerinden de faydalanılır. Uzaktan algılama verilerinin kullanıldığı yöntem ile sadece akım verisiyle elde edilen noktasal iyileştirme sonuçlarının yanında alana yayılı kar örtüsü, gerçek buharlaştırma, yaprak alan indeksi, toprak nemi ve yer altı suyu beslenmesi gibi akı değerlerinin de daha tutarlı ve güvenilir olması sağlanır. Bu çalışmamızın amacı uzaktan algılama yöntemleriyle elde edilmiş MODIS aylık gerçek evapotranspirasyon (AET) verileri ile yaprak alan indeksi (LAI) haritalarının hidrolojik model kalibrasyonuna etkilerini araştırmaktır. Benzeşim deneylerimiz için Vienne (Fransa) havzası seçilmiştir. Fizik tabanlı tam yayılı mHM hidrolojik modeli bu havza için çalıştırılmış ve 6 senaryo için kalibrasyonlar yapılmıştır. Modelin akım benzeşim performansı Kling-Gupta (KGE) metriği ile modelin yayılı evapotranspirasyon performansı ise SPAEF metriği ile ortaya konmuştur. Sonuçlara göre, sadece havza çıkışındaki AGİ verilerine göre kalibre edilen model KGE 0.91'ye ulaşırken (maksimum 1), SPAEF buharlaştırma performansı düşüktür. Havzaya yayılmış 4 AGİ'li kalibrasyonda ortalama KGE 0.37 iken SPAEF kısmen iyileşmiştir. Tek AGİ ve MODIS-AET birlikte kalibrasyonda kullanıldığında KGE 0.90 SPAEF ~0.70 olmuştur. Dördüncü senaryomuzda model sadece MODIS-AET ile kalibre edilmiş SPAEF 0.60'e ulaşmıştır. Öte yandan su dengesi tutturulamamıştır (KGE -0.24). Beşinci senaryoda, model sadece 12 adet akım verisi ve MODIS-AET ile kalibre edilmiş ve KGE 0.67 iken SPAEF 0.75 gibi yüksek değerler almıştır. Altıncı son senaryoda sadece bir yıl günlük akım gözlemi yapıldığı varsayımı yapılarak MODIS-AET'nin de dahil edildiği model kalibrasyonu yapıldığında KGE 0.72 ve SPAEF yine 0.75 dolaylarında yüksek değerler almıştır. Bu altı senaryolu model kalibrasyon çalışmamızın sonuçları akım ölçümleri eksik havzalar için ümit vericidir. Öyle ki; uydu verilerinden elde edilen gerçek evapotranspirasyon (AET) ile birlikte

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 3 Şubat 2022 günü ulaşmıştır. 22 Temmuz 2022 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Ocak 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.1067466>

1 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Atıksu Dairesi Başkanlığı, Ankara mbavcuoglu@dsi.gov.tr - <https://orcid.org/0000-0002-1513-6432>

2 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul demirelmc@itu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-4402-906X>

sadece bir yıl günlük veya bir yılın her ayından bir debi ölümü toplamda 12 debi değeri ile dahi yeterli su dengesi sağlanabilmektedir.

Anahtar Kelimeler: mHM, model kalibrasyonu, gerçek evapotranspirasyon, uzaktan algılama, MODIS, lmsz havzalar.

ABSTRACT

On the Utility of Remotely Sensed Actual ET and LAI in Hydrologic Model Calibration

Hydrological model parameters are usually calibrated based on the performance of the daily river discharge data recorded at the basin outlet. In the unconventional approach, satellite-based remote sensing data, which is open to everyone, is utilized in addition to the discharge data. The latter approach is also called spatial calibration in hydrology. The objective of this study is to assess the utility of remotely sensed actual evapotranspiration (AET) and monthly leaf area index (LAI) maps on the calibration of the hydrological model. For this, six different calibration cases (scenarios) are designed using a physically-based hydrologic model for the Vienne basin in France. It should be noted that LAI is used to estimate interception and correct the PET in the model i.e. both affecting the simulated AET. The daily discharge simulation performance of the model is assessed using KGE and the spatial performance of the model is assessed using SPAEF i.e. between mHM's long-term (2002-2014) monthly average AET raster output maps and reference MODIS-AET maps. According to the results, the KGE for scenario 1 (single AGI) was 0.91, SPAEF was below zero; for scenario 2 (with 4 AGI), the KGE was 0.37 while the SPAEF was positive; for scenario 3 (Single AGI and MODIS-AET), the KGE was 0.90 while the SPAEF were ~0.70; For the 4th scenario (MODIS-AET only), the KGE was -0.24, SPAEF was around 0.60, for scenario 5 (12 flow data and MODIS-AET) the KGE was 0.67, SPAEF was around 0.75; for scenario 6 (one-year daily flow and MODIS-AET) KGE 0.72 and SPAEF was around 0.75. Our results are promising even for poorly gaged basins as we could reach reasonable performance with satellite based AET and only 12 discharge measurements.

Keywords: mHM, model calibration, actual evapotranspiration, remote sensing, MODIS, non-measured basins

1. GİRİŞ

Hidrolojik modeller, havzanın hidrolojik davranışını kontrol eden kar erimesi, sızma ve buharlaşma gibi fiziki hidrolojik süreçlerin matematiksel ifadelerinden oluşur. Model yapısı havzaya en uygun model sıfırdan kurulur veya varolan modellerden en uygunu seçilerek model parametreleri (katsayıları) deneme yanılma ile tahmin ederek havzanın hidrolojik davranışının debi dinamikleri özelinde doğru olmasına çalışılır [1]. Yaygın olarak kullanılan fizik tabanlı hidrolojik modeller alansal yapılarına göre toplu, yarı yayılı ve tam yayılı olarak sınıflandırılır. Gelişmiş ülkelerde fizik tabanlı tam yayılı hidrolojik modeller bütünleşik havza yönetiminde uzaktan algılama verileriyle birlikte kullanılmaktadır. Toplu modellerde sadece havza çıkışındaki debi benzeştirilirken tam yayılı grid yapılı modellerde havzanın herhangi bir yerinden sonuç çekilebilir. Bu nedenle yayılı hidrolojik modeller, toplu (lumped) modellere kıyasla, sonlu elemanlı yapıları nedeniyle sadece havza çıkışında değil tüm

havzada uydu verileriyle birlikte değerlendirmeye imkan sağlar [2, 3, 4]. Örneğin alana yayılmış gerçek evapotranspirasyonun (AET) güvenilir tahminleri, geniş ekili alanlarda sulama planlaması, tarımsal kuraklık izleme, sudaki ayak izi (water footprint) hesabı, görülmeyen/sanal su ticareti (virtual water trade) ve su talebi tahmini gibi çeşitli sürdürülebilir su kaynakları yönetimi uygulamaları için oldukça yararlıdır [5]. Özellikle kuraklık ile mücadelede sunacağı katkı sosyo-ekonomik etki alanları değerlendirildiğinde çalışmanın önemini arttırmaktadır [6]. Bu nedenle fizik tabanlı tam yayılı bir modelin uydu verileriyle kalibrasyonunu çalışmamızın odağına koyuyoruz.

Özellikle ölçümü kısıtlı havzalar ile değişim geçiren havzalarda güvenilir hidrolojik tahminler üretmek için hidrolojik modelin öncelikle parametrelerinin doğru belirlenmesi gerekmektedir [7]. Parametreler belirlendikten sonra doğru bir temsil için hidrolojik modelin gözlenmiş verilerle kalibre edilmesi gerekmektedir. Geleneksel olarak hidrolojik modeller, akım verisini hedefleyen tekli kalibrasyon yaklaşımı ile kalibre edilmektedir [8, 9]. Gözlenmiş akım verisi her ne kadar havzanın antropojenik ve doğal süreçlerinin bütünlük bir sonucu olarak güvenilir bir değişken olsa da [10, 11, 12, 13]; havza içi alt akımların, toprak nemi ve evapotranspirasyonun (ET) zamansal ve mekansal değişkenliğinden bağımsızdır [14, 15, 16]. Bu yüzden kalibrasyon (iyileme) ve validasyon (doğrulama) için hidrolojik çevrimin nehir debisinden ayrı gözlemi yapılan diğer parçaları da kullanılmalıdır [17]. Doğru tahmin edilen bir sürecin tanımındaki bir hata, modelin başka bölümündeki bir hata ile telafi edilebilmektedir. Bu nedenle, doğru bir fiziki temsil için modelin akım dışında diğer dahili değişkenlere karşı da kalibre edilmesi gerekmektedir [14].

Her ne kadar doğru bir temsil için çok sayıda dahili değişkene hâkim olmak gerekse de bu ölçümü kısıtlı olan havzalar için kolay değildir [18]. Fakat son yıllarda, uydu teknolojilerinin gelişmesi ve daha geniş çapta kullanılabilir hale gelmesiyle birlikte daha hassas uzaysal ve zamansal çözünürlüklerde çeşitli hidro-meteorolojik verilere ulaşmak mümkün hale gelmiştir: yağış, toprak nemi, evapotranspirasyon, yaprak alan indeksi (LAI) vb. Bu yüzden mekansal (hücrese) modellerin alandaki yayılı potansiyellerini yansıtması açısından uydu tabanlı uzaktan gözlemlerin kullanımı model simülasyon (benzeşim) becerisinin artırılması için ciddi fırsatlar ortaya çıkarmıştır [16, 19, 20, 21]. Uydu tabanlı yayılı hücrese verileri, özellikle buharlaşma verisini hidrolojik model kalibrasyonunda kullanan çalışmalar Tablo 1`de özetlenmiştir.

Ölçümü kısıtlı havzalarda çok değişkenli kalibrasyon stratejileri üzerine yapılan önceki çalışmalarda fizik tabanlı tam yayılı bir model kullanılarak yerinde gözlemler, uzaktan algılama ve yeniden analiz girdileri ile hidrolojik model performansı değişen senaryolarda test edilmiştir [27, 12]. Çalışmalarda nehir akımını baz alan kalibrasyon sonuçları yapılan değerlendirmelerde referans alınmış, uydu bazlı AET ve birlikte kalibrasyon yöntemlerinin referans kalibrasyona göre performans değişimleri gözlemlenmiştir. Çalışmalarda uzun süreli akım verisi kullanılmıştır. Bir başka benzer çalışmada Herman ve diğ. [30] AET verilerini, iki farklı uydu tabanlı uzaktan algılama veri setinden elde etmişlerdir. Bu çalışma için de üç farklı model kalibrasyonu kullanılmış; ilk olarak modelin yalnızca nehir akımı için gözlem verileri ile kalibre etmenin AET öngörülebilirliğinin iyileştirilmesine yardımcı olabileceği; modelin hem nehir akımı hem de AET için kalibre edilmesi durumunda hem nehir akımı hem de AET ile ilgili model tahmin becerilerinin iyileştiği; modelin yalnızca AET için kalibre edilmesi durumunda nehir akımı öngörülebilirliğinin iyileştirilmesine yardımcı olabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Tablo 1 - Uydu tabanlı uzaktan algılama AET verilerini hidrolojik model kalibrasyonunda kullanan çalışmalar

Referans	Uydu-Ürün	RS-Değ.	Çözünürlük	Zamansal Aralık	Hidrolojik Model	Çalışma Alanı
[3]	CMRSET (MOD43B4)	AET	0.05°×0.05	Günlük	AWRA-L	Doğu Avust.
[22]	MOD16 ET	AET	1x1km	8 Günde Bir	VIC	Columbia Ha.
[23]	ESA CCI	AET	0.25°	Günlük	SMART	Avustralya
[24]	GLEAM v3.2a	AET	0.25°	Günlük	mHM	Volta N. Ha.
[12]	GLEAM v3.2a	AET	0.25°	Günlük	mHM	Volta N. Ha.
[25]	PML_V2	AET	0.05°×5 km	8 Günde Bir	Xinanjiang	Yalong N. Ha.
[9]	SEBAL (MODIS)	AET	1x1km	Aylık	SWAT	Rechna Doab
[26]	MODIS	AET	5x5km	Günlük	SIMHYD	Avustralya
[20]	MODIS, TSEB	AET	1x1km	Günlük	mHM	Skjern havzası
[27]	MOD 16A2; GLEAM 3.2a	AET	6,5km	Aylık	mHM	Batı Afrika
[28]	TSEB (MODIS)	AET	1x1km	Günlük	mHM	Skjern havzası
[29]	MODIS, TSEB	AET	1x1km	8 Günde Bir	mHM	Skjern havzası
[30]	SSEBop (USGS) ALEXI	AET AET	1x1km 1x1km	Aylık Aylık	SWAT	Honeyoey Creek-Pine ha.
[31]	MODIS (MOD16A2)	AET	1x1km	8 Günde Bir	Modif. SWAT	Pipestem ha.
[32]	GLEAM_v3.0b	AET	0.25°	Günlük	HYMOD (Toplu)	Nyangores ha.

SMART: Soil Moisture and Runoff simulation Toolkit, SSEBop: Surface Energy Balance model, ALEXI: Atmosphere-Land Exchange Inverse model, SWAT: Soil and Water Assessment Tool, SMAP: Soil moisture active passive, TSEB: Two Source Energy Balance model, VIC: Variable Infiltration Capacity model, GLEAM: Global Land Evaporation Amsterdam Model, ESA CCI: European Space Agency Climate Change Initiative, MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer.

Son çalışmalar, su dengesini alansal olarak iyileştirmek için uzaktan algılanan buharlaşma-terleme (ET) ve akım ölçüm verilerini birlikte kullanan çok amaçlı kalibrasyonun potansiyelini göstermiştir [33]. Hatadan bağımsız desene duyarlı alansal metriklerin çalışmalarda kullanılması ise havza fiziğini iyileştirmeye dönük dikkat çekici bir çabadır. Ayrıca önceki çalışmalar uydu bazlı AET'nin uzun süreli akım verisi ile birlikte kalibrasyonunu test ederken bir yıllık ya da tek bir yıla ait az sayıda veri ile kalibrasyonunu test etmemiştir. Uzun süreli uydu bazlı AET'nin yanında kısıtlı sayıda (bir yıllık ya da daha az) akım verisi ile birlikte kalibrasyonun hem AET benzeşimini hem de akım benzeşimini ne derece iyileştirilebileceği bilinmemektedir. Uydu bazlı AET verisine uzun yıllar aralığında üstelik ücretsiz olarak ulaşılabilirken kısıtlılık ve ölçümsüzlük baskısı daha çok akım verisinde yaşanmaktadır. Çalışmamız bu yüzden akım verisi ile AET'nin çoklu ve çok amaçlı kalibrasyonunda minimum akım verisi koşullarını kıyaslar üzerinden test etmektedir. Üstelik bunu akım benzeşim başarısını bozmadan AET'yi alansal bir metrikle önceliklendirerek yapmaktadır.

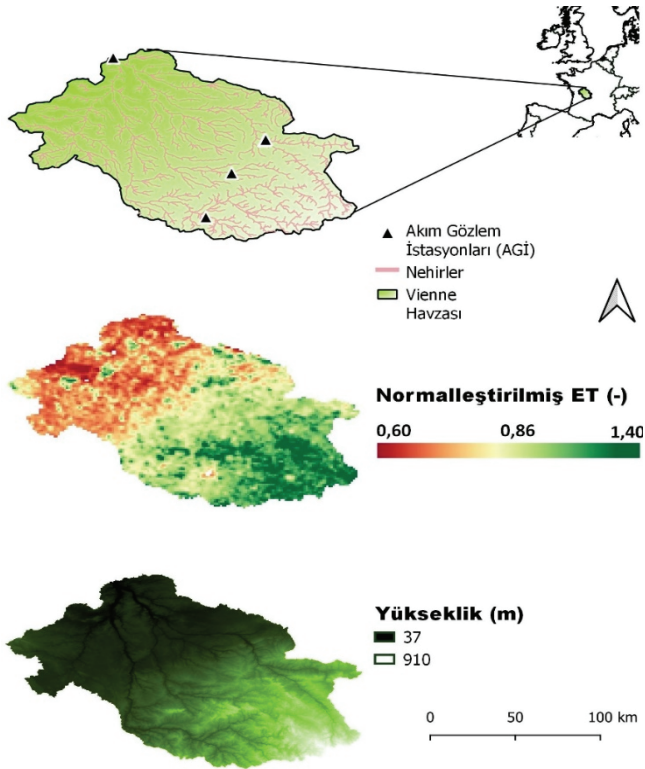
Bu çalışmamızın amacı uzaktan algılama yöntemleriyle elde edilmiş gerçek evapotranspirasyon (AET) ve aylık yaprak alan indeksi (LAI) haritalarının (1) hidrolojik model kalibrasyonuna etkilerini (2) ölçümü olmayan havzalardaki potansiyelini araştırmaktır. Bu amaca ulaşmak için veri kalitesi yüksek Vienne (Fransa) havzasında fizik

tabanlı tam yayılı mHM hidrolojik model ile farklı amaç fonksiyonlarıyla (sadece debi, sadece AET ve debi ile AET birlikte) kalibrasyon deneyleri yapılmıştır. Sonuçlarımız sistematik şekilde sunulurken tutarlı bulgularımız ortaya konmuştur.

2. ÇALIŞMA ALANI VE VERİ SETİ

2.1. Çalışma Alanı

Çalışma alanı olarak Fransa'nın 21.157 km² yüzey alanına sahip olan Vienne Havzası (Şekil 1) seçilmiştir. Eksiksiz ölçümlere sahip bu havzada yapılan ön testlerimizde model yüksek performans değerlerine (KGE>0.90) ulaştığı için bu metodolojik çalışmamızda bu havza ön plana çıkmıştır. Vienne kaynağını güneyde yer alan çıkış noktasından 372 km mesafede 920 m yükseklikteki Millevaches platosundan alır. Vienne Havzası 17.000 km nehir ağı uzunluğuna sahip olup yıllık birikimler çok değişken bir şekilde yayılmıştır. Havza üst kotlarında yağış 1.500 mm / yıl'a ulaşırken aşağıya doğru ilerledikçe azalır ve 600 mm / yıl'a kadar düşer. Havza genelinde uzun yıllar ortalaması yağış 700 mm / yıl' dır. Kasım-Ocak ayları en yağışlı aylardır (Vienne Havzası Bölgesel Kamu Teşkilatı: <http://www.eptb-vienne.fr>).



Şekil 1 - Vienne Havzası yeri; nehir ağı yayılımı; Akım Gözlem İstasyonları, Haziran-Temmuz-Ağustos Dönemi Buharlaşma Haritası, DEM Haritası.

2.2. Uydu Tabanlı (MODIS) Gerçek Evapotranspirasyon (AET) ve Yaprak Alan İndeksi (LAI)

Bu çalışmanın kalibrasyon aşamalarında MODIS ürünlerinden aylık MOD16 AET ve aylık LAI kullanılmıştır (https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_policies, 02.04.2020). NASA'nın dünya gözlem sisteminde yer alan MODIS küresel ET algoritması, MODIS uzaktan algılama verilerini kullanarak hidrolojik ve ekolojik araştırmalar için geliştirilmiştir. MOD16 [34] algoritmasından elde edilen ET verileri 8 günlük, aylık ve yıllık aralıklarla 1 km alansal çözünürlükte mevcuttur. MODIS LAI ürünü uzun dönem aylık ortalama olarak modele sokulmuştur. LAI haritaları düşük çözünürlüklü PET verilerine bitki büyüme dinamiklerini tanıtmak için kullanılır ve AET sonuçlarını doğrudan etkiler.

3. YAYILI HİDROLOJİK MODEL

Vienne havzası için kalibrasyon stratejilerini test etmek için kurgulanan tüm senaryolarda fizik tabanlı tam yayılı bir model olan mHM [35, 36] kullanılmıştır. Orta (mezo) ölçekli Hidrolojik Model (mHM) 63 global parametreye sahiptir ve yapısal olarak HBV ve VIC gibi oturmuş yaygın kullanımlı modellerin denklemlerini kullanır [37]. Model kanopi tutma, kar birikimi ve erime, toprak nem dinamikleri, sızma ve yüzey akışı, evapotranspirasyon, yüzey altı depolama ve akım oluşumu, derin süzülme ve temel akış ve akım zayıflatma ve taşkın yönlendirme süreçleri hesaba katar. Model, saatlik veya günlük meteorolojik verilerle çalışır ve gerekli parametrelerin mekansal değişkenliğini çıkarmak için gözlemlenebilir havza fiziksel özelliklerini (toprak dokusu, bitki örtüsü ve jeolojik özellikler) kullanır. mHM'nin temel özelliği, yüksek çözünürlüklü fizyografik arazi yüzey verilerine dayalı transfer fonksiyonlarını kullanarak hedef çözünürlükte parametreleri bölgeselleştirme yapabilesidir (<https://www.ufz.de/mhm>). Ayrıca LAI ve bakı haritaları potansiyel evapotranspirasyon (PET) girdilerinin normalizasyonunda kullanılarak bitki örtüsünün dinamikleri modele tanıtılmış olur. Tablo 2 bu çalışmanın model girdilerini kaynakları ile özetlemektedir.

Tablo 2 - mHM için girdi olarak kullanılan morfolojik ve meteorolojik verilere genel bakış.

Veri	Tanım	Uzamsal Çözünürlük	Kaynak
Q (günlük)	Debi	Havza çıkışı	GRDC
P (günlük)	Yağış	10 km	EOBS [38]
ETref (günlük)	Referans evapotranspirasyon	20 km	EOBS
Tavg (günlük)	Ortalama hava sıcaklığı	20 km	EOBS
LAI	8 günde bir ölçülen Yaprak Alanı İndeksi (LAI) değişimini baz alan tam yayılı 12 aylık değerler	1 km	MODIS [34]

Tablo 3 - mHM için girdi olarak kullanılan morfolojik ve meteorolojik verilere genel bakış. (devam)

Veri	Tanım	Üzamsal Çözünürlük	Kaynak
Arazi Örtüsü	Orman, geçirgen alan ve kentsel alan	250 m	MODIS
DEM ile ilgili veriler	Eğim, bakı, akış birikimi ve yönü	250 m	SRTM
Jeolojik sınıflar	16 jeolojik formasyon	250 m	UFZ-Leipzig [39]
Toprak verisi	Tam yayılı 2 metre derinlikte 6 katmanlı toprak verisi (kum oranı, kil oranı, hacimsel yoğunluğu)	250 m	HWSD ve (ESD)

GRDC: https://www.bafg.de/GRDC/EN/01_GRDC/12_plcy/policy_guidelines.pdf;jsessionid=AA96F6F200B3880575879F15334B6669.live2052?__blob=publicationFile,02.04.2014

EOBS: <http://www.ecad.eu/download/ensembles/ensembles.php,02.04.2014>

MODIS: https://lpdaac.usgs.gov/products/modis_policies,02.04.2014

SRTM: <https://lta.cr.usgs.gov/citation,02.04.2013>

HWSD: <http://webarchive.iiasa.ac.at/Research/LUC/External-World-soil-database/HTML/,02.04.2014>

ESD (European Soil Database): http://ec.europa.eu/geninfo/legal_notices_en.htm,02.04.2013

3.1. Meteorolojik ve Morfolojik Veriler

Ücretsiz olarak bu çalışma kapsamında Vienne havzası için Modelin meteorolojik girdilerinde E-OBS kullanılmıştır. Avrupa çapında E-OBS verileri sıcaklık (günlük minimum, ortalama ve maksimum değerler) ve yağış veri setinin yeni bir versiyonudur. Veri seti 1950'ye kadar olan dönemi kapsar ve orijinal E-OBS veri seti ile düzenli enlemlerde 0.25°×0.25° aralıklarla mekansal yayılım sergiler [40]. Ortalama sıcaklık 1950 yılı başından 2018 yılı sonuna kadar günlük ortalama; Yağış için 1950 yılı başından 2018 yılı sonuna kadar günlük ortalama; Potansiyel Evapotranspirasyon için 1950 yılı başından 2018 yılı sonuna kadar günlük ortalama kullanılmıştır. PET Hargreaves-Samani denkleminde türetilmiştir [41]. Havzanın hidrolojik modelinde, 44x28 grid ve her biri 0.0625 derece hücre boyutunda çalışılmıştır. mHM'nin morfolojik girdi veri kümeleri ascii formatında raster haritalar olarak sağlanmıştır. Tüm hücresel girdiler, yani morfolojik ve meteorolojik veriler aynı mekansal alanı kapsayacak şekilde temin edilmiştir. Ücretsiz arazi örtüsü verileri Avrupa için 250m çözünürlüklerle temin edilmiştir [34]. Beş istasyona (#6123400, #6123430, #6123450, #6123460 ve #6123820) ait 1960-2016 günlük debi verileri Almanya Koblenz'deki Global Runoff Data Center'dan (GRDC) beş AGİ için temin edilmiştir.

4. YÖNTEM

Çalışmamız altı farklı senaryoda AGİ ve MOD16 ürünlerinin farklı kombinasyonlarının model kalibrasyonuna etkilerini inceler. Modelin yapısı ve girdileri ile birlikte amaç fonksiyonları, parametre duyarlılık analizi, amaç fonksiyonları, kalibrasyon araçları, kalibrasyonun adımları ve seçilen yöntemler hakkında detaylı bilgi verilmiştir.

4.1. Amaç Fonksiyonları ve Metrikler

Modelin kalibrasyonu sürecinde amaç fonksiyonları tayin edilirken üç ayrı metrik (MAE(1), KGE(2) ve SPAEF(3)) kullanılmış, doğrulamalar için iki ayrı metrik (KGE ve SPAEF) kullanılmıştır. KGE ve MAE metrikleri ile hataya duyarlı, SPAEF metriği ile hataya duysarsız desene duyarlı amaç fonksiyonları oluşturulmuştur. Aşağıda sırası ile kullanılan metrikler ve türetilen amaç fonksiyonları verilmiştir:

Ortalama Mutlak Hata [42]

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |e_i|}{n}.$$
$$Amaç Fonk. = (MAE)_{MNM} + (MAE)_{HTA} + (MAE)_{EEK} \quad (1)$$

Burada n gözlem ve simülasyon sayısı iken y_i simülasyon, x_i gerçek değerdir. Ortalama mutlak hata (MAE), aynı fenomeni ifade eden eşleştirilmiş gözlemler arasındaki hataların bir ölçüsüdür [42]. MAE; buharlaşma verisinin tek başına kullanıldığı kalibrasyonda farklı ölçeklerde yer alan mekansal verilerin hatadan bağımsız paterne duyarlı SPAEF metriği ile amaçlanırken hata yönünde oluşan amaçlanma boşluğunu doldurmak için kullanılmıştır. Ayrıca beşinci senaryoda (S5) 12 adet debi (Q) ile yapılan çoklu kalibrasyonda hatanın hedeflendiği amaç fonksiyonlarında kullanılmıştır (Tablo 4; Şekil 2). MNM Mart-Nisan-Mayıs, HTA haziran-Temmuz-Ağustos ve EEK Eylül-Ekim-Kasım aylarını ifade etmektedir.

Kling-Gupta Metriği [43]

$$KGE = 1 - \sqrt{((1-r)^2 + (1-\alpha)^2 + (1-\beta)^2)}$$
$$Amaç Fonk. = 1.0 - KGE \quad (2)$$

Burada r = Pearson korelasyon katsayısı α = benzeşen ortalamasının gözlemlenen ortalamaya oranı, β = benzeşen standart sapmasının gözlemlenen standart sapmaya oranıdır. (1-KGE) her zaman minimizasyon yöntemlerinin uygulandığı hedefdir. Minimum (1-KGE) değeri 0'dır.

Alansal desen uyumu [20, 28, 29]

$$SPAEF = 1 - \sqrt{(\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2}$$
$$\alpha = \rho(A, B) \text{ and } \beta = \frac{\left(\frac{\sigma_A}{\mu_A}\right)}{\left(\frac{\sigma_B}{\mu_B}\right)} \text{ and } \gamma = \frac{\sum_{j=1}^n \min(K_j, L_j)}{\sum_{j=1}^n L_j} \quad (3)$$

$$Amaç Fonk. = (1.0 - SPAEF_{MNM})^2 + (1.0 - SPAEF_{HTA})^2 + (1.0 - SPAEF_{EEK})^2$$

Alansal verilerin uyumluluğunu denetleyen metrikte; α , gözlemlenen ve simüle edilmiş (benzeşen) desen arasındaki Pearson korelasyon katsayısıdır, β mekansal değişkenliği temsil

eden varyasyon katsayısının fraksiyonudur ve γ , gözlenen model ve histogramın verilen histogram K için histogram kesişimidir. Simüle edilmiş desenin L'si, her biri n bölme içerir. İki değişkenin farklı birimlerle karşılaştırılmasını sağlamak için γ hesabında z skoru kullanılır, [20, 28, 29]. Bu yeni metrik paterne (desene) odaklıdır ve modelin günlük çıktılarında uzun dönem (2002-2014) aylık ortalama AET haritaları ile referans MODIS-AET raster haritaları arasında hesaplanır. Ayrıca yüksek çözünürlüklü aylık LAI haritaları bitki büyüme dinamiklerini modele aktarırken ve büyük gridli PET haritalarının ölçeklenmesinde kullanılmıştır.

4.2. Duyarlılık Analizi

Tüm morfolojik (statik) ve meteorolojik (dinamik) veriler istenilen çözünürlük ve zamansal kalıplarda temin edilmiş; modelin ilk çalıştırılması parametre hassasiyeti analizi için yapılmıştır. Böylelikle en yüksek değişkenliğe sahip parametreler seçilerek gereksiz işlem yükü önlenmiştir. Tüm kalibrasyon süreçleri 63 parametre içinden belirlenen en hassas 20 parametre üzerinden yürütülmüştür. Hassasiyet analizi debi ve AET yi baz alarak KGE ve SPAEF metrikleri öncelilendirerek PEST (Parametre Tahmin Aracı) [44] ile yapılmıştır.

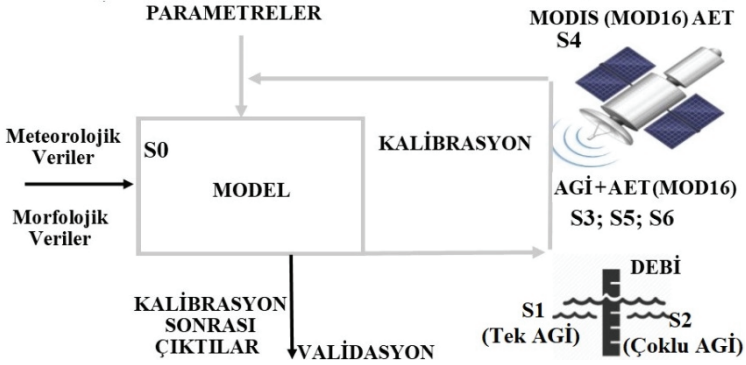
4.3. Kalibrasyon Yöntemi (PA-DDS)

Seçilen amaç işlevi için en iyi parametre konfigürasyonunu bulmak için farklı optimizasyon yöntemleri mevcuttur. Gözlemlenen veriler global ve birden fazla amaç fonksiyonu kullanılacağından hedefi kalibre etmek için Pareto Dinamik Boyutlandırılmış Arama (PA-DDS) yöntemi seçilmiştir. Herhangi bir ek yazılım yazmaya gerek kalmadan model kalibrasyonu ve tasarım optimizasyonu süreçlerini otomatikleştiren modelden bağımsız bir program olan OSTRICH [45] PA-DDS optimizasyon yönteminin uygulama aracı olarak kurulmuş ve kalibrasyon için kullanılmıştır. L. Shawn Matott tarafından geliştirilen OSTRICH, çok sayıda modelden bağımsız optimizasyon ve kalibrasyon (parametre tahmini) algoritması uygulayan, modelden bağımsız çok algoritmali, paralel uyumlu bir optimizasyon ve parametre tahmin aracıdır: çoklu ve çok amaçlı kalibrasyon stratejilerinin test edildiği senaryolarda ideal bir optimizasyon ve parametre tahmin aracı olarak görülmüş [46], çalışmamızda optimizasyon aracı olarak kullanılmıştır.

4.4. Model Kalibrasyonu ve Doğrulaması

Hidrolojik Modelin kurulum aşaması tamamlandıktan sonra altı farklı senaryo için (Şekil 2) kalibrasyon ve doğrulama süreçleri tamamlamıştır. Altı farklı senaryo için yürüyen adımlardan ilkini (S0) kalibrasyon öncesi hassas parametrelerin belirlenmesi oluşturmaktadır.

Senaryolara ait tanımlar, kalibrasyon için kullanılan metrikler, kalibrasyon stratejileri ve yöntemleri aşağıda Tablo 4 de verilmiştir.



Şekil 2 - Çalışma çerçevesi: model kurulumu, hassas parametrelerin belirlenmesi (S0), debi ile tek AGİ li kalibrasyon (Geleneksel) (S1), debi ile çok AGİ li çoklu kalibrasyon (S2), debi ve uydu verileri ile çok amaçlı çoklu kalibrasyon (S3), uydu verileri ile çok amaçlı kalibrasyon (S4), yıl içi 12 adet debi ölçümü ve uydu verileri ile çok amaçlı çoklu kalibrasyon (S5), bir yıllık günlük debi ve uydu verileri ile çok amaçlı çoklu kalibrasyon (S6), Validasyon.

Tablo 4 - Vienne havzasında kurulan Hidrolojik model için senaryolar.

Senaryo	Akım Gözlem İstasyonu (AGİ)	Akım verisi	Uydu verisi
S1	1 AGİ havza çıkışında	Eksik yok	Yok
S2	1 AGİ havza çıkışında, 3 AGİ dere kollarında	Eksik yok	Yok
S3	1 AGİ havza çıkışında	Eksik yok	MODIS AET ve LAI uzun dönem aylık ortalama haritalar
S4	Yok	Hiç ölçüm yok	MODIS AET ve LAI uzun dönem aylık ortalama haritalar
S5	1 AGİ havza çıkışında	2004 yılında her ayın 15. gününe ait günlük akım verisi (sadece 12 adet)	MODIS AET ve LAI uzun dönem aylık ortalama haritalar
S6	1 AGİ havza çıkışında	2004 yılına ait günlük akım verisi (365 adet)	MODIS AET ve LAI uzun dönem aylık ortalama haritalar

Son adımda simülasyonların gözlenmiş debi değerleri ve uydu tabanlı referans AET (MOD16) verileri ile değerlendirilmesi yapılmıştır. Çıktıların oluşturulması ve formatlanmasında, grafiklerin ve görsellerin oluşturulmasında matlab ve pyhton dilleri aktif olarak kullanılmıştır. 1998-2001 arası 4 yıl ön koşurma (spin-up) dönemi olduğundan performans hesaplarına dahil edilmemiştir. Model parametreleri Ostrich yazılımı içerisinde bulunan 750 iterasyonlu paralel pareto-DDS (PARA-PADDS) yöntemi kullanılarak kalibre edilmiştir. Çalışma kapsamında kurulan model günlük adımda 2002-2014 tarihleri arasında

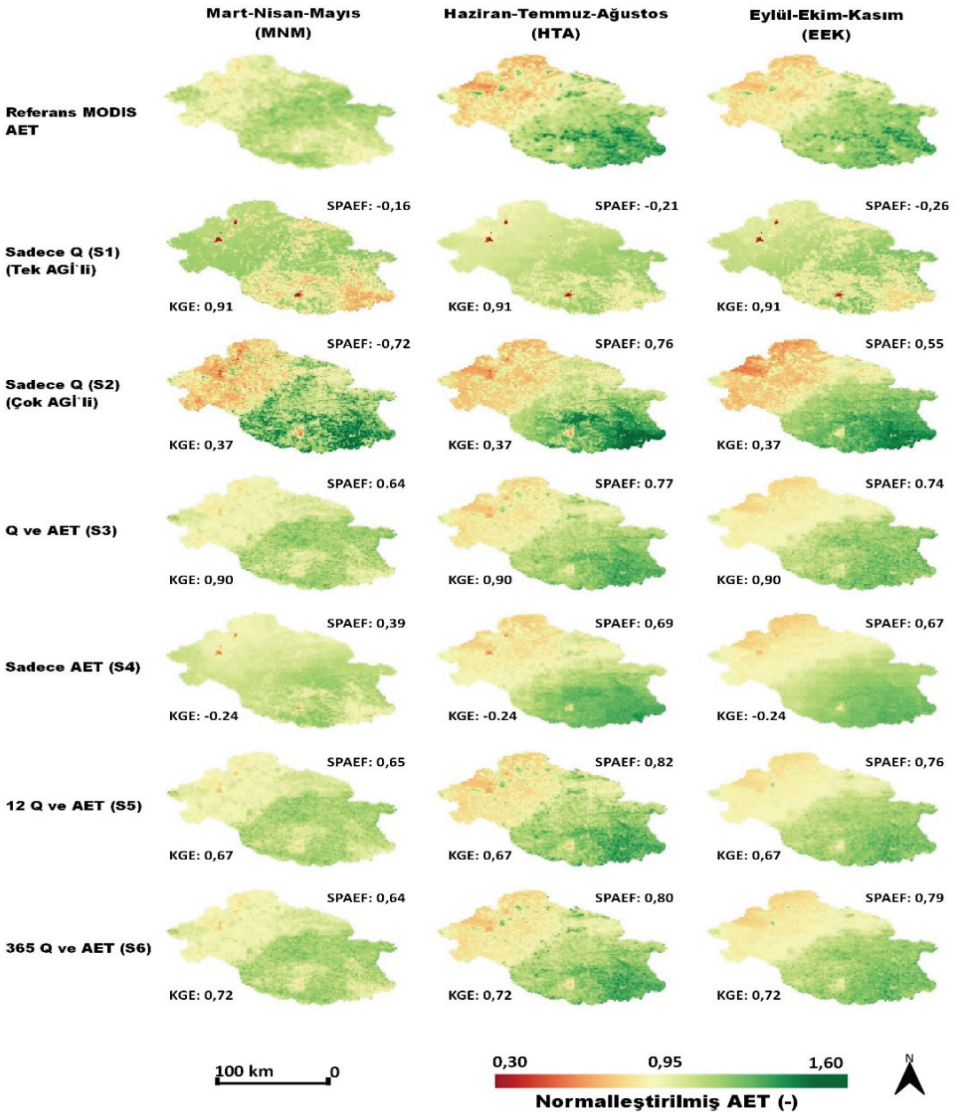
kalibre edilmiştir. 1998-2001 arası 4 yıllık süreç model ısınmasında kullanılmıştır. Uydu tabanlı AET (MOD16) değerleri yine 2002-2014 yılları arasında uzun dönem aylık haritalardır. Değerlendirmeler üçer aylık ayrı dönemlerde yapılmıştır. Buna göre; Mart-Nisan-Mayıs (MNM) ayları birinci dönem olup 13 yıllık verinin bu dönemine ait ortalamasından oluşmaktadır. Aynı şekilde Haziran-Temmuz-Ağustos (HTA) ikinci dönemi, Eylül-Ekim-Kasım (EEK) ayları ortalaması üçüncü dönemi oluşturmaktadır.

5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Çalışma kapsamında veri kalitesi yüksek Fransa'nın Vienne havzasında fizik tabanlı tam yayılı mHM modeli kurulmuş ve 6 senaryolu kalibrasyon deneyleri yapılmıştır. 2002-2014 kalibrasyon dönemindeki modelin akım benzeşim performansı modelin günlük akım çıktıları ile gözlenen akım değerleri arasında hesaplanan KGE, modelin alana yayılı fiziksel performansı ise mHM'in uzun dönem (2002-2014) aylık gerçek evapotranspirasyon (AET) raster çıktı haritaları ile referans MODIS-AET raster haritaları arasında üçer aylık üç dönemde (1. dönem: Mart, Nisan, Mayıs, 2. dönem: Haziran, Temmuz, Ağustos 3. dönem: Eylül, Ekim, Kasım için) hesaplanan SPAEF değerleri ile ortaya konmuştur (Şekil 3: S1-S6). 1998-2001 arası 4 yıl ön koşturma (spin-up) dönemi olduğundan performans hesaplarına dahil edilmemiştir. Sonuçlara göre, sadece havza çıkışında konumlandırılan bir tek akım gözlem istasyonundan elde edilen akım verilerinin kullanıldığı kalibrasyonda (senaryo 1) modelin akım performansı beklendiği gibi çok yüksek (KGE 0.91, maksimum değeri 1); modelin AET performansı ise üç dönemde de çok düşüktür (SPAEF -0.16, -0.21, -0.26). Havza çıkışındaki AGİ ve nehrin farklı alt kollarında konuşlu 3 AGİ'den alınan akım verileriyle 4 AGİ'li kalibrasyonda (senaryo 2) ortalama KGE 0.91'den 0.37'ye düşerken ve üç dönemin SPAEF değerleri -0.72, 0.76, 0.55 olmuştur. Tek AGİ ve uydu verili kalibrasyonda (senaryo 3) akım performansında 0.91'den düşme çok sınırlı olmuş (KGE 0.90), bunun yanında AET performansı üç dönemde de önemli oranda iyileşmiştir (SPAEF 0.64, 0.77, 0.74). Akım ölçümü hiç olmayan sadece uydu verili kalibrasyonda (4. senaryo) su dengesi sağlanamamış (KGE -0.24), üç dönemde SPAEF 0.39, 0.69, 0.67 değerlerini almıştır. MODIS-AET ve mHM-AET verileri normalleştirme yapılarak SPAEF metriği ile karşılaştırılmıştır. Haritalar üzerinde görünen kırmızı noktalar yerleşim yerleridir (Şekil 3).

Veri eksikliği yaşanan havzalar için iki senaryo (5 ve 6) kurgulanmıştır. Bir yılda ve sadece her ayın ortasında tek ölçüm, toplamda 12 adet akım verisi ve MODIS-AET uydu verisiyle kalibrasyonda (senaryo 5) su dengesi ve AET performansının iyileştiği gözlemlenmiştir (KGE 0.67 ve üç dönemde SPAEF 0.65, 0.82, 0.76). MODIS-AET yanında sadece bir yıllık günlük akım verileri kullanılan 6. senaryoda (Şekil 3: S6) KGE 0.72 ve üç dönemde SPAEF 0.64, 0.80, 0.79 değerlerini almıştır. Sonuçlarımız akım ölçümleri eksik ve yetersiz havzalar için ümit vericidir. Sonuçlar, fizik tabanlı yayılı modellerin uydu verileri ve uygun amaç fonksiyonları ile kalibre edildiklerinde havzanın fiziğiyle uyumlu, su dengesini de bozmayan optimum parametre setine ulaşılabilirliğini göstermiştir.

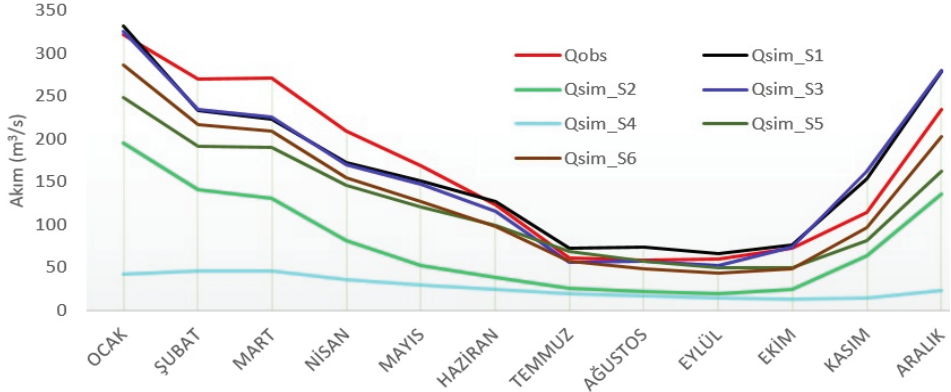
Aşağıda yer alan şekillerde akım simülasyonlarının aylıklarda gözlemlenmiş veriye göre debi (Q) değişim eğrileri (zaman serileri) (Şekil 4), simülasyonların CDF (kümülatif yayılım fonksiyonu) analizleri (Şekil 5) ve gözlemlenmiş debi ile korelasyonlarını (Şekil 6) gösteren yayılım grafikleri verilmiştir.



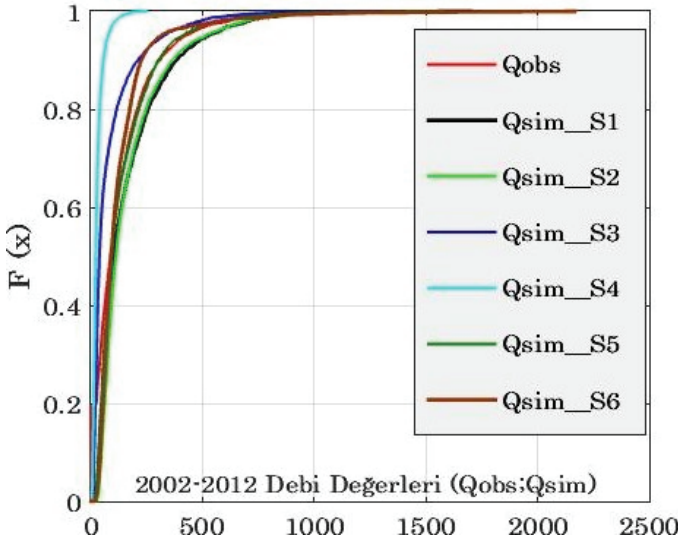
şekil 3 - mHM'in uzun dđnem (2002-2014) aylık gerçek evapotranspirasyon (AET) raster çıktı haritaları ile referans MODIS-AET raster haritaları.

Grafikte yer alan simülasyonların gözlemlenmiş Qobs ile olan değişimleri değerlendirildiğinde yalnızca AET'yi baz alan kalibrasyona ait Qsim_S4 dışında tüm simülasyonların değerim oranlarının çok yakın olduğu, özellikle Temmuz-Ağustos-Eylöl-Ekim aylarında simülasyon değerlerinin gözlemlenmiş değerlere ve birbirlerine çok benzer

olduğu anlaşılmaktadır. En yakın değişimin Qsim_S1 ve Qsim_3 simülasyonların da olduğu en düşük sonucun ise Qsim_S4 için olduğu görülmüştür. Dikkat çeken benzerlik ise Qsim_S5 ve Qsim_S6 simülasyonların da izlenmekte olup bir yıllık yıl içi her aydan birer tane olmak üzere 12 adet veri ile dahi akım tahmini sağlanabilmektedir. Özellikle yaz ayları çok daha yakın benzerlikte sonuç vermiştir.



Şekil 4 - 2002-2012 yılları için havza çıkış noktasındaki senaryolara ait ortalama aylık akım simülasyonları ve gözlem akımı. Qobs: Gözlemlenmiş debi; Qsim_S: "S" Senaryosuna ait debi simülasyonu

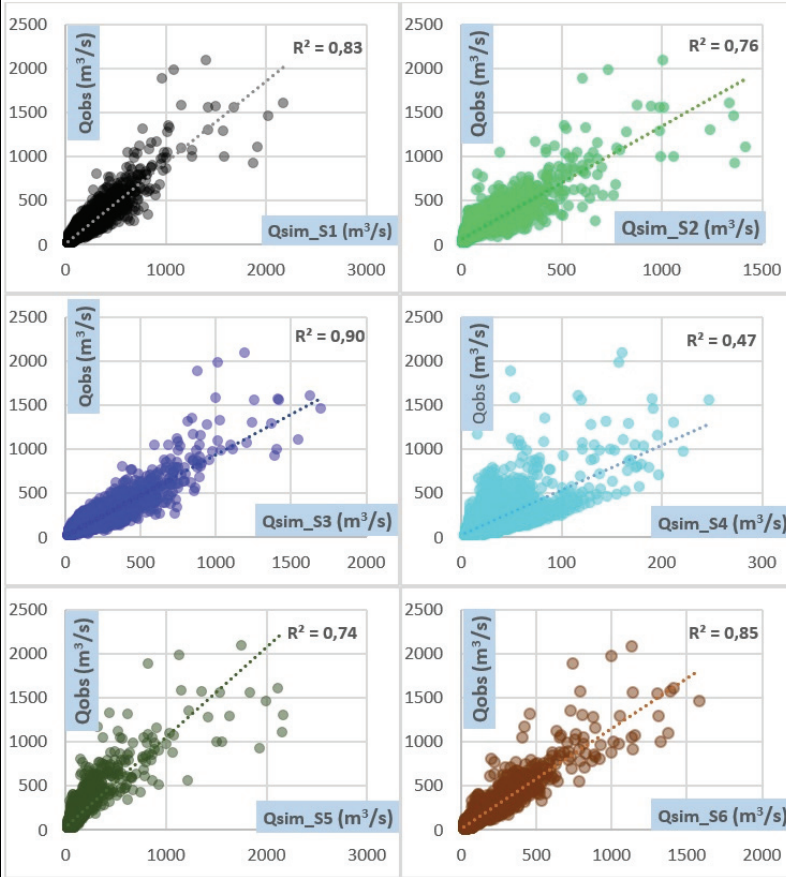


Şekil 5 - Akım simülasyonlarının eCDF (ampirik Kümülatif Yayılım Fonksiyonu) analizleri. Qobs: gözlemlenmiş debi değerleri; Qsim: simülasyon debisi; Qsim_S: senaryoya ait simülasyon debisi.

Kalibrasyonların kümülatif yayılımlardaki tutarlılıklarını görmek için CDF (kümülatif yayılım fonksiyonu) analizi yapılmıştır. Grafiklere ait sonuçlar aşağıda Şekil 5` da verilmiştir.

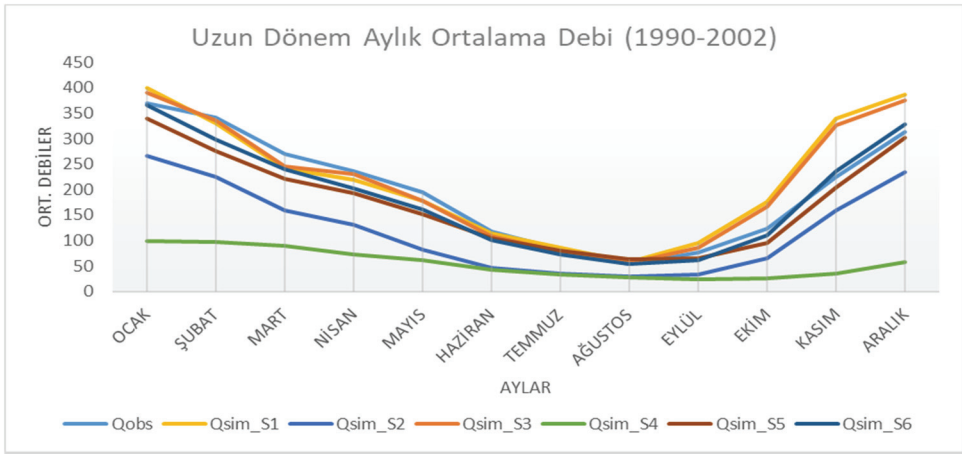
CDF analizleri incelendiğinde Qobs için en yakın eğrinin Qsim_S5 olduğu anlaşılmaktadır. Yıl içi her aydan birer tane olmak üzere 12 adet veri ile kümülatif yayılım yönünden simülasyon başarısının sağlandığı görülmüştür.

Aşağıda (Şekil 6) yer alan yayılım grafikleri akım simülasyonları ile gözlemlenen akım arasındaki korelasyonu göstermiştir. Buna göre en yüksek korelasyonun ($R^2=0.90$) Qsim_S3 için sağlandığı görülmüştür. En düşük korelasyonun da sadece AET (MOD16) ile yapılan kalibrasyon sonucu üretilen Qsim_S4 için sağlandığı anlaşılmıştır ($R^2=0.47$). Qsim_S3`e en yakın korelasyonların Qsim_S1 ve Qsim_S6 olduğu, AĞİ ve ET(MOD16)`nın kombinasyonu ile yapılan kalibrasyonların gözlemlenen akım verisi ile olan korelasyonlarının daha yüksek çıktığı grafiklerde görülmektedir.



Şekil 6 - Akım simülasyonlarının (Qsim) gözlemlenen akımla (Qobs) yayılım grağığı: simülasyonların gözlemlenmiş zaman serileri ile olan korelasyonlarını göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında; çalışma çerçevesindeki (Şekil 2) son adım olarak kalibrasyon yapılan dönem dışında bir aralık seçilerek 2002-2014 yılları arası kalibrasyonu yapılmış modelin 1990-2002 yılları için akım (Qsim-Qobs) doğrulaması (validasyon) yapılmıştır. Kalibrasyon için kullanılan aralığın bitiş tarihi AG'nin kapatıldığı tarih olduğu için 1990-2002 yılları arası doğrulamada kullanılmıştır. Doğrulama sonuçlarına göre, Senaryolar için sırası ile KGE; S1 için 0.85; S2: 0.56; S3: 0.87; S4: -0.038; S5: 0.83; S6: 0.90 olarak hesaplanmıştır. Beklendiği gibi S4 su dengesini sağlayamazken diğer senaryolarda KGE yüksek değerler almıştır. Aşağıda tüm senaryolara ait 1990-2002 yılları arası simülasyonlara ait uzun dönem aylık debi ortalamalarının gözlenen debi ile olan değişimi yer almaktadır (Şekil 7).



Şekil 7 - 1990-2002 yılları için havza çıkış noktasındaki uzun dönem aylık ortalama debiler.

6. TARTIŞMA

Bu çalışma kapsamında veri envanteri tam olan bir havzada mekansal olarak yayılı bir model kurulmuş ve farklı kalibrasyon denemeleri yapılmıştır. Uzaktan algılama verisi olarak gerçek evapotranspirasyon (AET) seçilmiştir. Literatürde birçok çalışmada kullanılmış olması (Tablo 1) modelin mekansal kalibrasyon stratejisi olarak seçilmesinde etkili olmuştur. MODIS gerçek buharlaşma ürünleri [47] 1 km çözünürlükte uzun dönem aylık ortalamalar şeklinde hazırlanmış ve mHM model çıktıları ile kıyaslanmıştır. Desen (patchy pattern) uyumu gözetilerek MODIS (MOD16) ürünü AET'nin model kalibrasyonunda kullanılmasına karar verilmiştir. "mHM" modelinin seçilmesindeki temel neden ise literatüre bakıldığında daha önce birçok çalışmada fizik tabanlı tam yayılı bir model olarak test edilmiş olması ve kullanılan çalışmalarda hedeflenen çıktıların alınmasıdır [12, 20, 24, 48].

Çalışma kapsamında toplu bir model yerine tam yayılı bir model seçerek işlem yükü artmıştır. Üstelik toplu modellerin tüm havzayı tek bir noktaya indirgeyerek genel ihtiyaçları karşılıyor olması üstelik bunu hesap yükünü azaltarak yapması yeterliliği üzerinde haklı bir görüş oluşturmaktadır. Fakat bu gerçekçi bir temsilden uzak bir yaklaşımdır. Toplu modeller yerine

fizik tabanlı tam yayılı bir model seçilmesinin temel sebebi akım ölçümü hiç olmayan ya da yetersiz olan havzalarda da kullanılabilmesidir. Ayrıca toplu (lumped) modellerin sağlayamadığı bir diğer avantajı, hücresel sonlu elemanlı yapıları nedeniyle havza çıkışı dışında da doğrulamaya izin vermesidir [2, 3, 4]. Özellikle güvenli gıda arzının her geçen gün daha da önemli olduğu günümüzde tarım faaliyetleri önemini dahada arttırmaktadır. Tarımsal faaliyetlerin planlama noktasında havzaya ait her noktada idealize edilebilmesi için var olan heterojenliğin maksimum seviyede temsil edilmesi gerekmektedir. Gelişen teknolojinde katkısı ile havzaya dair bilinmeyenlerin matematiksel olarak daha iyi izah edilmesi fizik tabanlı yayılı modellerin kullanım potansiyelini daha da güçlendirmektedir.

Model seçimine karar verdikten sonra bir başka temel yol ayrımı modelin kalibrasyon stratejisinin belirlenmesi aşamasıdır. Su kaynakları planlama ve yönetimi çalışmalarında hidrolojik modellemenin önemi artarken [49, 50, 51, 52, 53, 54] birçok araştırmacı havza içindeki ve havza çıkış noktasındaki hidrolojik süreçleri simüle eden hidrolojik modelleri eniyilemek için çalışmalar yapmış hidrolojik modellerin kalibrasyonu üzerine önemli bir literatür oluşumuna katkı sağlamıştır. Önceki çalışmalarda geleneksel yaklaşım devam etmektedir ve kapsamlı modeller dahi sadece akım gözlem istasyonlarından (AGİ) elde edilmiş nehir akım (debi) verileri yani havza çıkış noktasındaki akım hidrografları ile kalibre edilmektedir. Kurulan modellerin büyük çoğunluğunda simülasyon verileri debi gözlem verileri ile kıyaslanmış, kalibrasyon da bu değerlere göre yapılarak havza içi hidrolojik dinamikler inceleme dışında tutulmuştur [20]. Sadece akım verileri kullanılarak kalibre edilen hidrolojik bir model, su havzası çıkışında kabul edilebilir akım simülasyonu üretebilir, ancak su dengesinin gerçekçi olmayan temsillerini sağlayabilir. Zira havza çıkışında üretilen bir akım simülasyonu kalibrasyon sırasında tek bir noktanın toplulaştırılmış hatasını önceliklendirdiği için havzanın yayılı fiziksel gerçekliğinden bağımsızdır. Hataların toplamda birbirini tolere etmesinden kaynaklı havza fiziğini yansıtmayan bir simülasyon sadece akım gerçekliğini sağlayabilir. Bu nedenle geleneksel yönteminde referans kalibrasyon olarak test edildiği fakat dışında bir kalibrasyon yöntemi çalışılmıştır.

Önceki çalışmalar değerlendirildiğinde uydu tabanlı evapotranspirasyon verisinin akım verisine en ideal nasıl dahil edileceğine dair net bir kıyasın yapılamadığı, belirsizliklerin devam ettiği ve bilimsel araştırmaların farklı stratejiler ve senaryolarla devam ettirilmesi gerektiği sonucuna ulaşılmıştır [31]. Ayrıca uydu tabanlı yayılı AET verisinin simülasyon başarısına dair çok güçlü doğrulamaların henüz alınmadığı, çok seyrek veya günlük ama yıl bazında kısa süreli akım gözlemleri ile uydu tabanlı AET verilerinin çoklu ve çok amaçlı birlikte kalibrasyonunun test edilmediği anlaşılmaktadır. Ölçümü kısıtlı bir havzada özellikle sınırlı sayıda akım gözleminin uzun süreli uydu bazlı AET ile birlikte kalibrasyonu bu yüzden önemli bir araştırma konusu olarak görülmüştür. Bu yüzden çalışmamızda kalibrasyon stratejileri kurgulanan altı farklı senaryoda test edilmiştir. AET nin kalibrasyon süreçlerinde kullanım potansiyelinin gösterildiği çalışmada SPAEF [20, 28, 29] gibi sadece harita desenine duyarlı diğer maddi hataya, yanlığa (bias) duysuz bir metrik kullanılarak mekansal benzeşim sağlanmış ve havzanın fiziki gerçekliği önceliklendirilmiştir. Böylelikle ölçüm yapılmamış ya da yetersiz kayıtlara sahip havzalarda üstelik havzanın tamamında uydu tabanlı alansal yayılı veriler kullanmak sureti ile hidrolojik benzeşim başarısının sağlanması hedeflenmiştir. Bu çalışma karasal verilerin yetersizliği durumunda uydu tabanlı yayılı AET verilerinin hidrolojik model kalibrasyonuna en ideal nasıl dahil edilebileceğini göstermiştir. Ücretsiz MODIS (MOD16) ürünü buharlaşma verilerinin çok kısıtlı imkanlarla sınırlı sayıda akım verisi ile dahi desteklendiği takdirde akım ve buharlaşma simülasyon

başarısının ne denli yükselebileceği bu çalışmanın dikkat çekici yanıdır. Buna rağmen, gerçek evapotranspirasyon (AET)dışında hidrolojik çevrimin nehir debisinden ayrı gözlemi yapılabilen diğer parçaları (yer altı suyu, toprak nemi vb.) kalibrasyon deneylerinin dışında kalmıştır. Aynı şekilde simülasyonların gözlem verileri ile değerlendirilmesinde dahil edilmemiştir. Bu yönü ile çalışma ileriki çalışmalarla ve yeni kalibrasyon deneyleri ile desteklenmeye ihtiyaç duymaktadır. Ayrıca ölçüm kısıtını örneklendiren daha fazla sayıda senaryo ile yeni kalibrasyon deneylerinin yapılması, özellikle kısıtlı sayıda akım verisi ile kalibrasyon potansiyelinin daha güçlü izah edilmesi gerekmektedir. Araştırmacılar için uydu tabanlı verilerin karasal verilere dahilini konu alan kalibrasyon deneyleri hala yüksek bir potansiyel barındırmaktadır.

7. SONUÇ

Bu çalışmada hidrolojik model kalibrasyonuna MODIS gerçek evapotranspirasyon (AET) ve yaprak alanı endeksi (LAI) ürünlerinin etkileri araştırılmıştır. Bu amaca yönelik veri kalitesi yüksek bir havzada 6 farklı sentetik senaryo kurulmuştur. Özellikle ölçümü olmayan havzalar ve verilerin yetersizliği durumlarına yönelik çıkarımlarda bulunulmaya çalışılmıştır. Uydu tabanlı AET ve LAI haritalarının model kalibrasyonuna en ideal nasıl entegre edilebileceğini ve içerdiği potansiyeller kıyaslamalarla gösterilmiştir. Ayrıca validasyon yapılarak simülasyonların güvenilirliği sağlanmıştır.

Tam yayılı fizik tabanlı hidrolojik modelin (mHM) debiye dayalı geleneksel yaklaşım dışında da kalibre edilebileceği gösterilmiştir. Hidrolojik modelci fizik tabanlı model seçtiyse amacı sadece su dengesi değildir. Böylesi basit bir amaç için yayılı modele gerek yoktur. Böylesi kapsamlı modellerin başka yetenekleri de uygun amaç fonksiyonları ile sorgulanmalıdır. Su dengesinin yanında modelin diğer akı çıktılarının da fiziğe uygun performans sergilemeleri beklenir. Sonuçlarımız AGİ, MOD16-AET ve LAI'nin birlikte kullanıldığı çoklu kalibrasyon stratejisiyle hem su dengesinin hem de model fiziğinin havzanın her noktasında iyileştiğini göstermiştir. Üstelik bunun sınırlı sayıda gözlemlerle dahi mümkün olduğu anlaşılmıştır.

Gözlemi olmayan havzalarda sadece AET verisi ile ancak havzanın AET simülasyonları iyileşirken akım benzeşimleri kabul edilebilir seviyelerin altında kalmaktadır. Sadece 12 akım değeri su dengesi için yeterlidir. Böylelikle kullanıcılar ellerinde uydu tabanlı buharlaşma ve LAI verileri ile kısıtlı imkanlarla yönetilen bir havzada kısa süreli de olsa bir AGİ kurdukları takdirde akım ve AET performansına ulaşabileceklerdir. Bu bulgu, gelişen ülkeler için ve ölçümü kısa havzalar için ümit verici bir potansiyeldir.

Sonraki çalışmamızda NASA'nın GLDAS (Global Land Data Assimilation System) ve Avrupa'dan ERA5 yeniden analiz ürünü [55] yüzeysel akış verileri model kalibrasyon çalışmalarımıza dahil edilecektir. Akış haritalarının ötelemeden sonraki hali nehir debisidir ve elimizde gözlenen debiler mevcutken böylesi verilerin kalibrasyona nasıl yön vereceği önemli bir araştırma sorusudur.

Veri Kullanılabilirlik Bildirimi

Tüm veri kaynakları Tablo 2'de listelenmiştir. Vienne havza modeli kurulum verileri, Leipzig, Almanya'daki UFZ'den Dr. Oldrich Rakovec tarafından sağlanmıştır [39]. MODIS

aylık gerçek evapotranspirasyon (AET) haritaları Danimarka Jeolojik Araştırma Kurumu'ndan (GEUS) SPACE projesi kapsamında Dr Julian Koch tarafından hazırlanmıştır. Veri lisansı kısıtlamaları nedeniyle, gözlemlenen coğrafî, hidrolojik ve meteorolojik veriler yazarlardan yeniden dağıtılamaz, ancak ilgili kuruluşlar ve/veya talep üzerine Almanya'nın Leipzig kentindeki UFZ' den model kalibrasyon sonuçlarının iletileceği tahhatü üzerine ilgili yazardan alınabilir. mHM'nin kaynak kodu, <https://doi.org/10.5281/zenodo.4575390> adresinde herkese açıktır.

Teşekkür

Yazarlar Türkiye Ulusal Yüksek Performanslı Hesaplama Merkezine (UHeM) 1007292019 ve 4008242020 numaralı destekler için teşekkür eder. Yine yazarlar, Danimarka Villum Fonu'nun (<http://villumfonden.dk/>) SPACE projesine Genç Araştırmacı Programının sağladığı VKR023443 numaralı destek için teşekkür eder. İkinci yazar (MCD) TÜBİTAK 121Y585 ve 118C020 numaralı projeleriyle desteklenmiştir. Tüm MODIS verileri, "NASA Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC), USGS/Earth Resources Observation and Science (EROS) Center, Sioux Falls, Güney Dakota, https://lpdaac.usgs.gov/data_access/data_pool." izniyle çevrimiçi veri havuzundan alınmıştır. Yaprak alan indeksi ile PET düzeltmesi yapabilen dinamik ölçekleme fonksiyonu mHM sürüm 5.8 ve sonrasındaki yeni versiyonlarda mevcuttur (www.ufz.de/mhm/). Spatial Efficiency (SPAEF) için R, Python ve Matlab betikleri örnekleriyle birlikte SPACE projesi web sitesinde (<http://www.space.geus.dk/>) ve Researchgate sunucularında [28] mevcuttur.

Semboller

AET	: Gerçek Evapotranspirasyon
AGİ	: Akım Gözlem İstasyonu
aLH	: Ortalama Gizli Isı (Average Latent Heat)
DEM	: Sayısal Yükseklik Modeli (Digital Elevation Model)
ET	: Evapotranspirasyon
ETref	: Referans Evapotranspirasyon
LAI	: Yaprak Alan İndeksi (Leaf Area Index)
LST	: Kara Yüzey Sıcaklığı (Land Surface Temperature)
P	: Yağış
Q	: Debi
r	: Pearson Korelasyon Katsayısı
Tavg	: Ortalama Hava Sıcaklığı
α	: Simülasyon Ortalamasının Gözlemlenen Ortalamaya Oranı
β	: Simülasyon Standart Sapmasının Gözlemlenen Standart Sapmaya Oranı

Kaynaklar

- [1] K. K. Yilmaz, J. A. Vrugt, H. V. Gupta, ve S. Sorooshian, “MODEL CALIBRATION IN WATERSHED HYDROLOGY”, içinde *Advances in Data-Based Approaches for Hydrologic Modeling and Forecasting*, WORLD SCIENTIFIC, 2010, ss. 53–105.
- [2] S. Wi, Y. C. E. Yang, S. Steinschneider, A. Khalil, ve C. M. Brown, “Calibration approaches for distributed hydrologic models in poorly gaged basins: Implication for streamflow projections under climate change”, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, c. 19, sayı 2, ss. 857–876, Şub. 2015, doi: 10.5194/hess-19-857-2015.
- [3] A. Kunnath-Poovakka, D. Ryu, T. I. Eldho, ve B. George, “Parameter Uncertainty of a Hydrologic Model Calibrated with Remotely Sensed Evapotranspiration and Soil Moisture”, *J. Hydrol. Eng.*, c. 26, sayı 3, s. 04020070, Mar. 2021, doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002055.
- [4] C. Corbari ve M. Mancini, “Calibration and Validation of a Distributed Energy–Water Balance Model Using Satellite Data of Land Surface Temperature and Ground Discharge Measurements”, *J. Hydrometeorol.*, c. 15, sayı 1, ss. 376–392, Şub. 2014, doi: 10.1175/JHM-D-12-0173.1.
- [5] L. Zhang, Y. Zhao, Q. Ma, P. Wang, Y. Ge, ve W. Yu, “A parallel computing-based and spatially stepwise strategy for constraining a semi-distributed hydrological model with streamflow observations and satellite-based evapotranspiration”, *J. Hydrol.*, c. 599, s. 126359, Ağu. 2021, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.126359.
- [6] B. BULUT ve M. T. YILMAZ, “Türkiye’deki 2007 ve 2013 Yılı Kuraklıklarının NOAH Hidrolojik Modeli ile İncelenmesi”, *İMO Tek. Dergi*, c. 27, sayı 4, ss. 7619–7634, 2016, Erişim: May. 21, 2022. [Çevrimiçi]. Available at: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tekderg/issue/28142/299116>.
- [7] K. K. Yilmaz, H. V. Gupta, ve T. Wagener, “A multi-criteria penalty function approach for evaluating a priori model parameter estimates”, *J. Hydrol.*, c. 525, ss. 165–177, Haz. 2015, doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.03.012.
- [8] F. Yassin, S. Razavi, H. Wheeler, G. Sapriza-Azuri, B. Davison, ve A. Pietroniro, “Enhanced identification of a hydrologic model using streamflow and satellite water storage data: A multicriteria sensitivity analysis and optimization approach”, *Hydrol. Process.*, c. 31, sayı 19, ss. 3320–3333, Eyl. 2017, doi: 10.1002/hyp.11267.
- [9] R. Becker, A. Koppa, S. Schulz, M. Usman, T. aus der Beek, ve C. Schüth, “Spatially distributed model calibration of a highly managed hydrological system using remote sensing-derived ET data”, *J. Hydrol.*, c. 577, sayı 10, s. 123944, Eki. 2019, doi: 10.1016/j.jhydrol.2019.123944.
- [10] T. H. M. Rientjes, L. P. Muthuwatta, M. G. Bos, M. J. Booij, ve H. A. Bhatti, “Multi-variable calibration of a semi-distributed hydrological model using streamflow data and satellite-based evapotranspiration”, *J. Hydrol.*, c. 505, ss. 276–290, Kas. 2013, doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.10.006.

- [11] J. Koch, K. H. Jensen, ve S. Stisen, “Toward a true spatial model evaluation in distributed hydrological modeling: Kappa statistics, Fuzzy theory, and EOF-analysis benchmarked by the human perception and evaluated against a modeling case study”, *Water Resour. Res.*, c. 51, sayı 2, ss. 1225–1246, şub. 2015, doi: 10.1002/2014WR016607.
- [12] M. Dembélé, M. Hrachowitz, H. H. G. Savenije, G. Mariéthoz, ve B. Schaeffli, “Improving the Predictive Skill of a Distributed Hydrological Model by Calibration on Spatial Patterns With Multiple Satellite Data Sets”, *Water Resour. Res.*, c. 56, sayı 1, Oca. 2020, doi: 10.1029/2019WR026085.
- [13] F. DİKBAş, “Büyük Menderes Akımlarının Frekans Tabanlı Tahmini”, *İMO Tek. Dergi*, c. 27, sayı 1, ss. 7325–7343, 2016, Erişim: May. 21, 2022. [Çevrimiçi]. Available at: <https://dergipark.org.tr/en/pub/tekderg/issue/28137/298971>.
- [14] A. A. şorman, A. şensoy, A. E. Tekeli, A. Ü. şorman, ve Z. Akyürek, “Modelling and forecasting snowmelt runoff process using the HBV model in the eastern part of Turkey”, *Hydrol. Process.*, c. 23, sayı 7, ss. 1031–1040, Mar. 2009, doi: 10.1002/hyp.7204.
- [15] S. Stisen, M. F. McCabe, J. C. Refsgaard, S. Lerer, ve M. B. Butts, “Model parameter analysis using remotely sensed pattern information in a multi-constraint framework”, *J. Hydrol.*, c. 409, sayı 1–2, ss. 337–349, Eki. 2011, doi: 10.1016/j.jhydrol.2011.08.030.
- [16] M. Soltani, E. Bjerre, J. Koch, ve S. Stisen, “Integrating remote sensing data in optimization of a national water resources model to improve the spatial pattern performance of evapotranspiration”, *J. Hydrol.*, c. 603, s. 127026, Ara. 2021, doi: 10.1016/j.jhydrol.2021.127026.
- [17] B. Bulut vd., “Evaluation of Remotely-Sensed and Model-Based Soil Moisture Products According to Different Soil Type, Vegetation Cover and Climate Regime Using Station-Based Observations over Turkey”, *Remote Sens.*, c. 11, sayı 16, s. 1875, Ağu. 2019, doi: 10.3390/rs11161875.
- [18] M. E. KESKİN ve E. D. TAYLAN, “Orta Akdeniz Havzasındaki Akımların Stokastik Modellemesi”, *İMO Tek. Dergi*, c. 18, sayı 89, ss. 4271–4291, 2007, Erişim: May. 21, 2022. [Çevrimiçi]. Available at: <https://dergipark.org.tr/en/pub/tekderg/issue/12769/155280>.
- [19] J. Koch, G. Mendiguren, G. Mariéthoz, ve S. Stisen, “Spatial Sensitivity Analysis of Simulated Land Surface Patterns in a Catchment Model Using a Set of Innovative Spatial Performance Metrics”, *J. Hydrometeorol.*, c. 18, sayı 4, ss. 1121–1142, Nis. 2017, doi: 10.1175/JHM-D-16-0148.1.
- [20] M. C. Demirel, J. Mai, G. Mendiguren, J. Koch, L. Samaniego, ve S. Stisen, “Combining satellite data and appropriate objective functions for improved spatial pattern performance of a distributed hydrologic model”, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, c. 22, sayı 2, ss. 1299–1315, şub. 2018, doi: 10.5194/hess-22-1299-2018.
- [21] R. S. S. Gaur, B. Singh, A. Bandyopadhyay, S. Stisen, “Spatial pattern-based performance evaluation and uncertainty analysis of a distributed hydrological model”, *Hydrol. Process.*, c. 0, sayı e14586, 2022, doi: <https://doi.org/10.1002/hyp.14586>.

- [22] L. Jiang, H. Wu, J. Tao, J. S. Kimball, L. Alfieri, ve X. Chen, “Satellite-Based Evapotranspiration in Hydrological Model Calibration”, *Remote Sens.*, c. 12, sayı 3, s. 428, Oca. 2020, doi: 10.3390/rs12030428.
- [23] S. Kim, H. Ajami, ve A. Sharma, “Using Remotely Sensed Information to Improve Vegetation Parameterization in a Semi-Distributed Hydrological Model (SMART) for Upland Catchments in Australia”, *Remote Sens.*, c. 12, sayı 18, s. 3051, Eyl. 2020, doi: 10.3390/rs12183051.
- [24] M. Dembélé, B. Schaeffli, N. van de Giesen, ve G. Mariéthoz, “Suitability of 17 rainfall and temperature gridded datasets for largescale hydrological modelling in West Africa”, *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.*, sayı April, ss. 1–39, 2020, doi: 10.5194/hess-2020-68.
- [25] Q. Huang vd., “Using Remote Sensing Data-Based Hydrological Model Calibrations for Predicting Runoff in Ungauged or Poorly Gauged Catchments”, *Water Resour. Res.*, c. 56, sayı 8, Ağu. 2020, doi: 10.1029/2020WR028205.
- [26] Y. Zhang, F. H. S. Chiew, L. Zhang, ve H. Li, “Use of Remotely Sensed Actual Evapotranspiration to Improve Rainfall–Runoff Modeling in Southeast Australia”, *J. Hydrometeorol.*, c. 10, sayı 4, ss. 969–980, Ağu. 2009, doi: 10.1175/2009JHM1061.1.
- [27] T. Poméon, B. Diekkrüger, A. Springer, J. Kusche, ve A. Eicker, “Multi-Objective Validation of SWAT for Sparsely-Gauged West African River Basins—A Remote Sensing Approach”, *Water*, c. 10, sayı 4, s. 451, Nis. 2018, doi: 10.3390/w10040451.
- [28] J. Koch, M. C. Demirel, ve S. Stisen, “The SPATial Efficiency metric (SPAEF): multiple-component evaluation of spatial patterns for optimization of hydrological models”, *Geosci. Model Dev.*, c. 11, sayı 5, ss. 1873–1886, May. 2018, doi: 10.5194/gmd-11-1873-2018.
- [29] M. Demirel, J. Koch, G. Mendiguren, ve S. Stisen, “Spatial Pattern Oriented Multicriteria Sensitivity Analysis of a Distributed Hydrologic Model”, *Water*, c. 10, sayı 9, s. 1188, Eyl. 2018, doi: 10.3390/w10091188.
- [30] M. R. Herman vd., “Evaluating the role of evapotranspiration remote sensing data in improving hydrological modeling predictability”, *J. Hydrol.*, c. 556, sayı 1, ss. 39–49, Oca. 2018, doi: 10.1016/j.jhydrol.2017.11.009.
- [31] A. Rajib, G. R. Evenson, H. E. Golden, ve C. R. Lane, “Hydrologic model predictability improves with spatially explicit calibration using remotely sensed evapotranspiration and biophysical parameters”, *J. Hydrol.*, c. 567, sayı 12, ss. 668–683, Ara. 2018, doi: 10.1016/j.jhydrol.2018.10.024.
- [32] T. Roy, H. V. Gupta, A. Serrat-Capdevila, ve J. B. Valdes, “Using satellite-based evapotranspiration estimates to improve the structure of a simple conceptual rainfall–runoff model”, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, c. 21, sayı 2, ss. 879–896, Şub. 2017, doi: 10.5194/hess-21-879-2017.
- [33] A. E. Odusanya vd., “Multi-site calibration and validation of SWAT with satellite-based evapotranspiration in a data-sparse catchment in southwestern Nigeria”, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, c. 23, sayı 2, ss. 1113–1144, 2019, doi: 10.5194/hess-23-1113-2019.

- [34] Q. Mu, M. Zhao, ve S. W. Running, “Improvements to a MODIS global terrestrial evapotranspiration algorithm”, *Remote Sens. Environ.*, c. 115, sayı 8, ss. 1781–1800, Ağu. 2011, doi: 10.1016/j.rse.2011.02.019.
- [35] R. Kumar, L. Samaniego, ve S. Attinger, “Implications of distributed hydrologic model parameterization on water fluxes at multiple scales and locations”, *Water Resour. Res.*, c. 49, sayı 1, ss. 360–379, Oca. 2013, doi: 10.1029/2012WR012195.
- [36] Samaniego vd., “mesoscale Hydrologic Model - mHM v5.11.1”. Leipzig, Şub. 2021, doi: 10.5281/ZENODO.4462822.
- [37] T. Poméon, B. Dieckrüger, ve R. Kumar, “Computationally Efficient Multivariate Calibration and Validation of a Grid-Based Hydrologic Model in Sparsely Gauged West African River Basins”, *Water*, c. 10, sayı 10, s. 1418, Eki. 2018, doi: 10.3390/w10101418.
- [38] M. R. Haylock, N. Hofstra, A. M. G. Klein Tank, E. J. Klok, P. D. Jones, ve M. New, “A European daily high-resolution gridded data set of surface temperature and precipitation for 1950–2006”, *J. Geophys. Res.*, c. 113, sayı D20, s. D20119, Eki. 2008, doi: 10.1029/2008JD010201.
- [39] O. Rakovec, R. Kumar, S. Attinger, ve L. Samaniego, “Improving the realism of hydrologic model functioning through multivariate parameter estimation”, *Water Resour. Res.*, c. 52, sayı 10, ss. 7779–7792, 2016, doi: 10.1002/2016WR019430.
- [40] R. C. Cornes, G. van der Schrier, E. J. M. van den Besselaar, ve P. D. Jones, “An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Data Sets”, *J. Geophys. Res. Atmos.*, c. 123, sayı 17, ss. 9391–9409, Eyl. 2018, doi: 10.1029/2017JD028200.
- [41] George H. Hargreaves ve Zohrab A. Samani, “Reference Crop Evapotranspiration from Temperature”, *Appl. Eng. Agric.*, c. 1, sayı 2, ss. 96–99, 1985, doi: 10.13031/2013.26773.
- [42] C. Willmott ve K. Matsuura, “Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance”, *Clim. Res.*, c. 30, ss. 79–82, 2005, doi: 10.3354/cr030079.
- [43] H. V. Gupta, H. Kling, K. K. Yilmaz, ve G. F. Martinez, “Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling”, *J. Hydrol.*, c. 377, sayı 1–2, ss. 80–91, Eki. 2009, doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003.
- [44] J. Doherty, *Model-Independent Parameter Estimation(Part I)*, 6. baskı. Watermark Numerical Computing, 2016.
- [45] L. S. Matott, “OSTRICH: an Optimization Software Tool, Documentation and User’s Guide”. Ara. 17, 2004, Erişim: Ara. 28, 2020. [Çevrimiçi]. Available at: <https://github.com/usbr/ostrich>.
- [46] L. Shawn Matott, “OSTRICH: an Optimization Software Tool, Documentation and User’s Guide, Version 17.12.19.” University at Buffalo Center for Computational Research, Buffalo, s. 79, 2017, [Çevrimiçi]. Available at: <http://www.civil.uwaterloo.ca/envmodelling/Ostrich.html>.

- [47] M. T. Yılmaz *vd.*, “Comparison of prognostic and diagnostic surface flux modeling approaches over the Nile River basin”, *Water Resour. Res.*, c. 50, sayı 1, ss. 386–408, Oca. 2014, doi: 10.1002/2013WR014194.
- [48] M. Dembélé, N. Ceperley, S. J. Zwart, E. Salvatore, G. Mariethoz, ve B. Schaeffli, “Potential of satellite and reanalysis evaporation datasets for hydrological modelling under various model calibration strategies”, *Adv. Water Resour.*, c. 143, s. 103667, Eyl. 2020, doi: 10.1016/j.advwatres.2020.103667.
- [49] A. A. Sorman, E. Tas, ve Y. O. Dogan, “Comparison of hydrological models in upper Aras Basin”, *Pamukkale Univ. J. Eng. Sci.*, c. 26, sayı 6, ss. 1015–1022, 2020, doi: 10.5505/pajes.2019.98852.
- [50] G. Uysal, A. Şensoy, ve A. A. Şorman, “Improving daily streamflow forecasts in mountainous Upper Euphrates basin by multi-layer perceptron model with satellite snow products”, *J. Hydrol.*, c. 543, sayı October, ss. 630–650, Ara. 2016, doi: 10.1016/j.jhydrol.2016.10.037.
- [51] A. E. Tekeli, Z. Akyürek, A. Arda Şorman, A. Şensoy, ve A. Ünal Şorman, “Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey”, *Remote Sens. Environ.*, c. 97, sayı 2, ss. 216–230, Tem. 2005, doi: 10.1016/j.rse.2005.03.013.
- [52] A. Şensoy, A. A. Şorman, A. E. Tekeli, A. Ü. Şorman, ve D. C. Garen, “Point-scale energy and mass balance snowpack simulations in the upper Karasu basin, Turkey”, *Hydrol. Process.*, c. 20, sayı 4, ss. 899–922, Mar. 2006, doi: 10.1002/hyp.6120.
- [53] A. Şensoy ve G. Uysal, “The Value of Snow Depletion Forecasting Methods Towards Operational Snowmelt Runoff Estimation Using MODIS and Numerical Weather Prediction Data”, *Water Resour. Manag.*, c. 26, sayı 12, ss. 3415–3440, Eyl. 2012, doi: 10.1007/s11269-012-0079-0.
- [54] I. Yucel, A. Onen, K. K. Yilmaz, ve D. J. Gochis, “Calibration and evaluation of a flood forecasting system: Utility of numerical weather prediction model, data assimilation and satellite-based rainfall”, *J. Hydrol.*, c. 523, ss. 49–66, Nis. 2015, doi: 10.1016/j.jhydrol.2015.01.042.
- [55] M. Tarek, F. P. Brissette, ve R. Arsenault, “Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America”, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, c. 24, sayı 5, ss. 2527–2544, May. 2020, doi: 10.5194/hess-24-2527-2020.

TEKNIK NOT

İnşaat Projelerinde Kalite Performansını Etkileyen Faktörler: Türkiye’de Bir Alan Çalışması

Merve KURU ERDEM¹

Gülben ÇALIŞ²

ÖZ

Bu çalışma inşaat projelerinde kalite performansını etkileyen faktörleri ve profesyonellerin algılarına göre etki derecelerinin belirlenmesi amaçlamaktadır. Çalışmanın ilk aşamasında literatür taraması ve inşaat profesyonelleriyle yapılan görüşmeler aracılığıyla kalite performansını etkileyen 20 faktör belirlenmiştir. İkinci aşamada, faktörlerin kalite performansına etki derecelerinin belirlenmesi için bir anket tasarlanmış anket sonuçları tanımlayıcı istatistikler, güvenilirlik analizi ve Göreceli Önem İndeksi yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, kalite performansına etki eden en önemli beş faktörün sırasıyla “Başlangıçta projenin detaylıca düşünülmemesi”, “Çalışanların iş kalite bilgisi eksikliği ve/veya tam olarak uygulamaması”, “Taşeron firma seçimi”, “Sözleşme ve eklerine uygunluk” ve “Ekipler arası iş birliği ve koordinasyon” olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: İnşaat sektörü, kalite performansı, göreceli önem indeksi.

ABSTRACT

Factors Affecting Quality Performance in Construction Projects: A Field Study in Turkey

This study aims to determine the factors affecting quality performance in construction projects and the degree of impact based on the perceptions of professionals. In the first stage of the study, 20 factors affecting quality performance were determined via literature review and interviews with construction professionals. In the second stage, a questionnaire was designed to determine the degree of impact of the factors on the quality performance, and the results of the questionnaire were evaluated by descriptive statistics, reliability analysis and Relative Importance Index methods. The results show that the five most important factors affecting the quality performance are "Not considering the project in detail at the beginning",

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 28 Ekim 2021 günü ulaşmıştır. 17 Mayıs 2022 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Ocak 2023 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.1015939>

1 Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir
mervekuru25@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-2698-6491>

2 Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir
gulben.calis@ege.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-3056-4870>

"Lack of work quality information and/or not applying it fully", "Selection of the subcontractor", "Compliance with the contract and its annexes" and "Cooperation and coordination between teams".

Keywords: Construction industry, quality performance, relative importance index.

1. GİRİŞ

İnşaat sektörü, geniş bir yelpazeyi içeren ürün oluşturma ve bunu gerçekleştirmeye yönelik son derece karmaşık bir süreci kapsamaktadır. İnşaat projelerinde her zaman maliyet, zaman ve kalite arasında bir denge olması beklenmektedir. Kaliteli ve düşük maliyetli bir inşaat projesi ancak proje süresine etki ederek ya da tam tersine kaliteli ve hızlı bir projeye sahip olmak da maliyete etki ederek mümkün olabilmektedir. Yüksek kalite, müşteri için her zaman birincil amaç olmasa da başarılı bir proje için son derece önemlidir. Bu yüzden inşaat sektörünün başarısı, projelerde kalite performansının başarılı bir şekilde yürütülmesine bağlıdır.

Kalite, bir birimin kalite özelliklerini, elde edilen sonuçlar ile istenen sonuçlar arasındaki farklılıkları ölçer ve bu farklılıkları düzelterek kararlar verir. Kaliteyi kontrol etmenin bir yolu, bitmiş ürünlerin denetimine veya doğrulanmasına dayanmaktadır. İnşaat sektöründe kalite kavramı, ürün kalitesi, tasarım kalitesi ve uygunluk kalitesi gibi değişik boyutlarda ortaya çıkmaktadır [1]. İnşaat projelerinin kalitesi birçok faktöre bağlıdır. İnşaat sektöründe müşteri çoğu zaman tamamıyla hazır olan bir ürünün alıcısıdır. Bu da alacağı ürünü kendi beklentileri doğrultusunda seçeceğini gösterir. Buna göre inşaat sektöründeki kalite müşterilerin beklentilerinin ne oranda karşılandığı olarak tanımlanabilir. Yapılan bir araştırmaya göre ürün kalitesi, küçük ve orta boy inşaat işletmelerinin başarısını etkileyen en önemli beşinci faktördür [2]. Buna karşın inşaat sektöründe ürünün oluşturulması sırasında verilen hizmet dikkate alındığında, kalite tüm üretim aşamalarında aranılacak uygun bir seviye olarak tanımlanabilir. Bu kapsamda, bir yapının imalatı sırasında her aşamada çeşitli kontroller yapılır. Kalite standartlarına uymayan imalatlar belirlenir ve tedbir ya da düzenlemeler uygulanır. İmalat tamamlandığında gerekli muayeneler yapılır. Ürünün son durumu belirli özellikleri karşılıyor ve beklentilere cevap veriyorsa ürün teslim alınır [3]. Ancak, inşaat projelerinin disiplinler arası bir çalışmayla gerçekleştirilebilmesi, özgün olması, tek seferlik süreçlerden oluşması ve bunlara bağlı olarak farklı çalışanların kendi uygulama alanlarını gerçekleştirmesi gerekmektedir. Bütün bu özellikler, inşaatlarda kalite yönetiminin uygulanmasında bazı güçlükler neden olur. Yapılan bir araştırmada kalite yönetiminin, kamu-özel işbirliği aracılığıyla gerçekleştirilen yapı işlerinde en önemli üçüncü risk olduğu belirtilmektedir [4]. Günümüzde yaygınlaşan Yapı Bilgi Modelleme kullanımının ihale ve sözleşme aşamalarında kalite yönetimine olumlu etkileri olduğu belirtilse de [5]. Güner ve Giritli [6] inşaat sektöründe toplam kalite yönetimi uygulamalarının çoğunun başarısız olduğunu belirtmektedir. ABD’de yapılan bir çalışma [7] ise inşaat sektöründe kalite kontrolünden toplam kalite yönetimine geçişte yavaş bir değişim olduğunu göstermektedir. İnşaat sektöründe toplam kalite yönetiminin uygulanabilmesi için de kaliteyi etkileyen faktörler ve bunların önem sıralamasının iyi belirlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, inşaat projelerinde kalite performansını etkileyen faktörleri ve profesyonellerin algılarına göre etki derecelerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda inşaat projelerinde kalite performansını etkileyen faktörler belirlenmiş, bir anket

çalışması yapılarak bu faktörlerin etki derecelerinin istatistiksel analizler ile ortaya konulması hedeflenmiştir. Çalışmada sırasıyla literatür taraması, yöntem, bulgular, tartışma, sonuç ve öneriler sunulmaktadır.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde, inşaat sektöründe kalite performansını etkileyen faktörlerin sıklıkla incelendiği görülmektedir. Jha and Iyer [8] Hindistan inşaat projelerinde düşük kalite performansının nedenlerini bir anket çalışmasıyla incelemiştir. Öncelikle, literatür taraması ile projelerin kalite performansını etkileyen 55 faktör belirlenmiş ve yaklaşık 50 büyük ve orta ölçekli kuruluştan 112 inşaat sektörü profesyonelinin verdiği yanıtlar faktör analizi ve lojistik regresyon yöntemleri ile analiz edilmiştir. Sonuçlar, projenin kalite performanslarını olumsuz etkileyen faktörlerin proje katılımcıları arasındaki anlaşmazlık, düşmanca sosyoekonomik çevre, sert iklim koşulları, cehalet ve bilgi eksikliği, hatalı proje kavramsallaştırması, ve ihale sırasında agresif rekabet olduğunu ortaya koymaktadır. Geletu [9] ise Etiyopya, Addis Ababa'da seçilmiş inşaat projelerinde gerçekleştirdiği çalışmada bina inşaat projelerinin kalitesini etkileyen faktörleri araştırmıştır. Çalışma kapsamında öncelikle literatür taraması ile bir anket oluşturulmuş ve inşaat sektöründen 273 kişiye uygulanmıştır. Daha sonra elde edilen veriler kullanılarak bağımsız değişkenler (paydaş katılımı, proje finansmanı, inşaat malzemeleri ve proje yönetimi yeteneği) ve düzenleyici değişken (projeye özgü) bağımlı değişkene (inşaat projelerinin kalitesi) karşı Pearson korelasyonu ve regresyon analizi ile incelenmiştir. Sonuçlar, Etiyopya, Addis Ababa'daki bina inşaat projelerinin kalitesini etkileyen faktörleri belirleyen bağımlı değişken üzerinde hem bağımsız hem de düzenleyici bütün değişkenlerin pozitif ve anlamlı bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Prihartanto, Syarif and Utomo [10] Tarakan şehrinde inşaat sektöründeki kalitenin çalışan ustabaşlarının kalitesi ile doğrudan ilgisi olup olmadığını araştırmışlardır. Bu kapsamda, Karang Rejo bölgesindeki Gecekonduların Kalitesini Geliştirme Projesi'ndeki çalışanlarla Likert ölçekli bir anket kullanarak nicel bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Sonuçlara göre Tarakan şehrinde inşaat işlerinin kalitesini en çok etkileyen faktörlerin, ustabaşının çalışma resimlerini okuma ve anlama yeteneği, işini yapabilme becerisi, malzemeleri ve araçları iyi organize edebilme, sahada meydana gelen sorunları çözebilme yetenekleri olduğu tespit edilmiştir. Hijazi [11] Ürdün'de gerçekleştirdiği çalışmada inşaat projelerinde kalite performansı üzerinde olumsuz etkisi olan kritik faktörleri belirlemeyi, bunların göreceli önemini ele almayı ve inşaat projelerinde kaliteli performans elde etmenin yollarını önermeyi amaçlamıştır. Bu kapsamda öncelikle, literatür taraması ile inşaat projelerinde kalite performansının başarısızlık kriterleri belirlenmiş ve bir anket hazırlanmıştır. Daha sonra, inşaat sektörlerindeki uzman kişilere bu anketler uygulanmış ve elde edilen veriler faktör analizi ve uygunluk testleri ile analiz edilmiştir. Sonuçlar, inşaat projelerinde kalite performansını etkileyen en kritik faktörlerin yönetim faktörü, kültür ve çevre faktörü ve yüklenici faktörü olduğunu göstermiştir. Göreceli Önem İndeksi – Relative Importance Index (RII) kullanarak anket sonuçlarını değerlendiren bir çalışmada kaliteyi etkileyen ilk beş faktörün standartlara uygunluk, kalite dokümantasyonu, müşteri ihtiyaçlarının karşılanması, liderler tarafından bilgilerin güncellenmesi ve paylaşılması ile insan kaynaklarının planlanması ve yönetilmesi olduğu ortaya konulmuştur [12]. Tang et al. [13], Çin'deki Three Gorges Barajı ile ilgili bir vaka çalışmasına dayanarak, toplam kalite yönetimi uygulamasının temel faktörlerini Pearson ve Spearman korelasyonları ile analiz etmiştir. Sonuç olarak baraj

inşaatında kalite elde etmek için eğitimin en önemli faktör olduğu tespit edilmiştir. Chan et al. [14], Hong Kong'daki toplu konut projelerinin kalitesini etkileyen faktörleri bir anket çalışmasının sonuçlarını faktör analizi ve çoklu regresyon analizi ile değerlendirmişlerdir. Sonuçlar, proje yöneticisinin toplu konut projeleri yürütme deneyiminin kaliteyi etkileyen en önemli faktör olduğunu göstermiştir. Diğer önemli faktörler arasında proaktif bir kalite kültürü, doğrudan vasıflı işgücü kullanımının kapsamı, kapsamlı bir taşeron denetim sistemi, saha işçiliğinin yetkinliği ve müşterinin kalite, güvenlik ve çevreye verdiği önem sıralanmaktadır. Pakistan'da gerçekleştirilen bir anket çalışmasında [15] faktörler, RII ve ikinci sentetik gri ilişki analizi yöntemi kullanılarak sıralanmıştır. Sonuçlar, inşaat aşamasında uygun müteahhit seçiminin kaliteyi etkileyen en önemli faktör olduğu ortaya koymaktadır. Ayrıca, geri bildirim sisteminin varlığı ve taşerondan alınan imalat çizimlerinin kalitesi de önemli faktörler arasında yer almaktadır. Joy [16], müteahhitlerin ve danışmanların inşaat projelerinde kalite performansını etkileyen faktörlere karşı tutumunu araştırmak için bir anket çalışması gerçekleştirmiştir ve faktörlerin RII'larını hesaplamıştır. Sonuçlar, müteahhitler ve danışmanlar tarafından kabul edilen en önemli faktörlerin standartlara uygunluk, malzemeler, işçilikler ve mali sorunlar olduğunu göstermektedir. Güneşer ve Çerçi [17] katılımcı firmaların ankete verdikleri puanları toplayarak faktörlerin kaliteyi sağlamadaki önem derecelerini saptamışlardır. Sonuç olarak, tasarım süreci, üretim süreci etkenleri ile finansal faktörlerin her birinin kaliteyi sağlamada birbirinden ayırt edilmeksizin çok önemli bir yere sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, tasarım sürecinde kaliteye en fazla etkisi olan faktörün, kullanıcı profiline dayalı ihtiyaçların dikkate alınmaması iken üretim sürecinde, nitelikli ve eğitilmiş işgücü eksikliği olduğu tespit edilmiştir. Kaliteyi etkileyen en önemli finansal faktör ise ülke ekonomisinde dalgalanmaların olması olarak belirlenmiştir. Tasarım kalitesini etkileyen faktörleri belirlemek için RII kullanılan başka bir anket çalışmasının sonuçları, tasarım sürecinde toplam kalite yönetimini uygulamak için ana motivasyonun yönetim ve organizasyon kültürünü iyileştirmeye çalışmak olduğunu göstermektedir. Ayrıca, "proje tasarım ekibi liderinin kaliteye bağlılığı", "proje tasarım ekibi liderinin teknik becerileri", "tasarımcının kaliteye bağlılığı", "proje liderinin organizasyon becerileri" gibi faktörlerin tasarım kalitesini önemli derecede etkilediği belirlenmiştir [18].

Türkiye'de inşaat sektöründe toplam kalite yönetiminin uygulanmasına yönelik olarak Güneşer ve Çerçi [17] inşaat sektöründe kalite performansını belirlemek için Adana'da bir alan çalışması yapmışlardır. Bu kapsamda, literatür taramasının verileri doğrultusunda hazırladıkları anketi inşaat şirketlerinde çalışanlara uygulamışlardır. Sonuçlar, Adana kentindeki inşaat firmalarının, yapıların projelendirme ve uygulama süreçlerinde kalite yönetim sistemlerini uygulamadıklarını göstermektedir. Türkiye'de yapılan bir başka çalışmada [19], kalite uygulamalarının işletme performansı üzerindeki etkisi bir anket çalışmasıyla incelenmiş ve toplanan veriler güvenilirlik analizi, faktör analizi, korelasyon analizi ve çoklu regresyon analizi ile değerlendirilmiştir. Çalışmada, kalite uygulamaları, üst yönetim liderliği, müşteri odaklılık, kalite sistem prosedürleri, insan kaynakları uygulamaları, tedarikçi ilişkileri, süreç kontrol ve geliştirme olmak üzere 6 boyutta incelenmiştir. Sonuçlar, işletmelerin kalite uygulamalarının işletme performansını pozitif yönlü etkilediğini ortaya koymaktadır.

Bütün bu güçlüklerle rağmen inşaat sektöründe toplam kalite yönetiminin uygulanmasının birçok olumlu etkileri mevcuttur. Başarılı bir şekilde toplam kalite yönetiminin uygulanmasıyla yapının kalitesi, verimlilik, kâr payı piyasadaki rekabet gücü, çalışma hayatı

kalitesi ve müşteri memnuniyeti, çevresel kalite anlayışının gelişeceği belirtilmektedir [20]. Sonuç olarak, inşaat projelerinde kalite performansı iyileştirmelerinin büyük bir potansiyel yarattığı, müteahhitlerin kalite uygulamasının potansiyel faydalarını anladıkları ancak uygulamanın önünde birçok engel olduğu ifade edilebilir [21].

3. YÖNTEM

Bu çalışma, kalite performansını etkileyen faktörler ve kalite araştırma araçları gibi bazı temel kalite kavramları hakkında kapsamlı bir literatür taraması ile başlamıştır. Kalite performansını etkileyen potansiyel kalite özellikleri literatürden ve konusunda uzman kişiler ile görüşme yoluyla belirlenmiştir. Literatürün eleştirel bir incelemesine ve görüşmelerin sonuçlarına dayanarak, bu çalışmada inşaat kalitesini etkileyen faktörlerin önem derecelerinin belirlenmesi için bir araştırma anketi geliştirilmiştir. Daha sonra bu anket İzmir’de TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası üyeleri başta olmak üzere inşaat mühendisleri ve firma yöneticileri ile birebir görüşme yapılarak uygulanmıştır.

3.1. Anket Tasarımı

Çalışma kapsamında iki bölümden oluşan bir anket hazırlanmıştır. İlk bölüm, katılımcıların demografik yapıları ile ilgili olan iş tecrübesi, çalıştığı pozisyon, çalıştığı kurumdaki çalışan sayısı ve yurt dışı tecrübesine ilişkin soruları içermektedir. Anketin ikinci bölümü ise aşağıda listelenen inşaat projelerinde kalite performansını etkileme potansiyeli olan yirmi faktöre ilişkin soruları içermektedir.

1. Ekipler arası iş birliği ve koordinasyon
2. Proje yöneticisinin finansal kararlar alabilmesi
3. Proje yöneticisinin sahadaki taşeron firma yetkilileri ile iletişimi
4. Proje yöneticisinin planlama tekniklerini göz ardı etmesi
5. Çalışanların sorumluluklarını iyi anlamaması
6. Çalışanların memnuniyeti
7. Çalışanlar arasındaki çatışma
8. Çalışanların iş kalite bilgisi eksikliği ve/veya tam olarak uygulamaması
9. İşveren ya da temsilcisi tarafından zamanında karar verilmesi
10. İşverenin projenin zamanında bitirilmesine yönelik kurduğu baskı
11. İşveren ya da temsilcisi tarafından etkili gözlem ve geribildirim verilmesi
12. Başlangıçta projenin detaylıca düşünülmemesi
13. Proje boyutunun ve değerinin büyük olması
14. Projede yüksek teknik beceri ve bilgi isteyen faaliyetlerin benzersizliği
15. Önemli kararları erteleme

16. İnşaat kontrol toplantıları
17. Organizasyon kültürü
18. Taşeron firma seçimi
19. Sözleşme ve eklerine uygun imalat
20. Danışmanlık hizmet alımı

Her bir faktörün inşaat projelerinde kalite performansını etkileme potansiyeli 5 puanlık Likert ölçeği kullanılarak değerlendirilmiştir. 1 puan “çok az”, 2 puan “az”, 3 puan “ortalama”, 4 puan “yüksek” ve 5 puan “çok yüksek” etkiyi temsil etmektedir. Bu yaklaşım, inşaat profesyonellerinin inşaat projelerinde kaliteye yönelik algısının değerlendirilmesini sağlamaktadır.

3.2. Analiz Metodu

Anketlerden elde edilen veriler, tanımlayıcı istatistikler, güvenilirlik analizi ve Göreceli Önem İndeksi – Relative Importance Index (RII) kullanılarak MS Excel ve IBM SPSS programlarıyla analiz edilmiştir. Tanımlayıcı istatistikler, inşaat mühendislerinden toplanan ham verileri analiz etmek ve inşaat endüstrisindeki bu kilit kalite faktörlerine karşı tutumlarını incelemek için kullanılmıştır. Anketin ve seçilen ölçeğin güvenilirliğini test etmek için Cronbach’s α hesaplanarak güvenilirlik analizi gerçekleştirilmiştir. Göreceli önem indeksi analizi, niteliklerin katılımcılar tarafından algılanan göreceli önemlerine göre sıralanması için kullanılmıştır. RII analizi bir anketin doğası gereği öznel olan ölçümler içerdiğinde faktörlerin sıralanması için yaygın olarak kullanılan tekniklerden biridir [12, 22]. RII aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$RII = \frac{\sum w}{A \times N} \quad (1)$$

Yukarıdaki denklemde, w, yanıtlayanlar tarafından her bir faktöre verilen 1 ile 5 arasında değişen ağırlığı, A en yüksek ağırlığı (bu çalışmada 5) ve N toplam numune sayısını ifade etmektedir.

4. ANKET VERİLERİ

Anket çalışması ve birebir görüşmeler 2020 yılı Şubat ayı içerisinde gerçekleştirilmiştir. Katılımcılar, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası üyeleri başta olmak üzere toplam 68 inşaat mühendisinden oluşmaktadır. Birebir görüşmeler, anketlerin içeriğini açıklamak ve katılımcılar arasında farklı yorumlamalara dayalı tutarsızlıkları önlemek için gerçekleştirilmiştir.

Katılımcıların demografik yapısı, katılımcıların iş tecrübesi, çalıştığı pozisyon, çalıştığı kurumdaki çalışan sayısı ve yurt dışı tecrübesine ilişkin sorular ile analiz edilmiştir. Toplam 68 adet katılımcının %15,49’u ‘1 yıldan az’, %30,99’u ‘1-10 yıl arası’, %14,08’i ‘10-20 yıl arası’, %39,44’ü ‘20 yıldan fazla’ tecrübeye sahiptir. Katılımcıların %15,49’u yapı denetim firmalarında, %84,51’i ise hem ana yüklenici hem de taşeron firmalarda çalışma tecrübesine

sahiptir. Katılımcıların %27,41'i teknik ofiste, %21,48'i proje yönetiminde, %40'ı şantiyede, geri kalanlar ise inşaat sektöründe bu üçü dışında kalan pozisyonlarda çalışmaktadır. Katılımcıların, %32,39'u 0-10 kişi arası, %28,17'si 10-50 kişi arası, %18,31'i 50-250 kişi arası, %2,82'si 250-500 kişi arası, geri kalanlar ise 500 kişiden fazla çalışanın olduğu şirketlerde çalışmaktadır. Ayrıca, katılımcıların %22,54'ü daha önce yurtdışında çalışmıştır.

5. BULGULAR

5.1. Tanımlayıcı İstatistikler

Katılımcıların inşaat projelerinde kalite performansını etkileyen faktörler için verdikleri cevapların dağılımı Çizelge 1'de sunulmaktadır. Sonuçlar, "çok fazla etkiler" oyunu en çok alan faktörün "Başlangıçta projenin detaylıca düşünülmemesi" olduğunu göstermektedir. Buna karşın, "hiç etkilemez" oyunu en fazla alan faktör "Proje boyutunun ve değerinin büyük olması"dır. Ayrıca, "orta etkiler" oyunu en çok alan faktör "çalışanların memnuniyeti"dir.

Çizelge 1 - Katılımcıların cevaplarının dağılımı

Faktör	hiç etkilemez (1)	az etkiler (2)	orta etkiler (3)	çok etkiler (4)	çok fazla etkiler (5)
Ekipler arası iş birliği ve koordinasyon	0 %0	2 %3	33 %49	20 %29	13 %19
Proje yöneticisinin finansal kararlar alabilmesi	0 %0	2 %3	39 %57	14 %21	13 %19
Proje yöneticisinin sahadaki taşeron firma yetkilileri ile iletişimi	1 %1	1 %1	41 %61	15 %22	10 %15
Proje yöneticisinin planlama tekniklerini göz ardı etmesi	0 %0	2 %3	37 %54	15 %22	14 %21
Çalışanların sorumluluklarını iyi anlamaması	0 %0	2 %3	35 %52	20 %29	11 %16
Çalışanların memnuniyeti	0 %0	2 %3	44 %65	12 %17	10 %15
Çalışanlar arasındaki çatışma	0 %0	1 %1	39 %57	14 %21	14 %21
Çalışanların iş kalite bilgisi eksikliği ve/veya tam olarak uygulamaması	0 %0	1 %1	28 %42	24 %35	15 %22

Çizelge 1 - Katılımcıların cevaplarının dağılımı (devam)

Faktör	hiç etkilemez (1)	az etkiler (2)	orta etkiler (3)	çok etkiler (4)	çok fazla etkiler (5)
İşveren ya da temsilcisi tarafından zamanında karar verilmesi	0 %0	2 %3	37 %54	17 %26	12 %17
İşverenin projenin zamanında bitirilmesine yönelik kurduğu baskı	0 %0	4 %6	32 %47	19 %28	13 %19
İşveren ya da temsilcisi tarafından etkili gözlem ve geribildirim verilmesi	1 %1	3 %5	35 %51	21 %31	8 %12
Başlangıçta projenin detaylıca düşünülmemesi	0 %0	1 %1	24 %35	18 %27	25 %37
Proje boyutunun ve değerinin büyük olması	3 %5	4 %6	36 %52	11 %16	14 %21
Projede yüksek teknik beceri ve bilgi isteyen faaliyetlerin benzersizliği	1 %1	2 %3	30 %45	23 %34	12 %17
Önemli kararları erteleme	0 %0	3 %5	33 %49	20 %29	12 %17
İnşaat kontrol toplantıları	1 %1	9 %14	38 %56	15 %22	5 %7
Organizasyon kültürü	1 %1	5 %7	37 %54	16 %24	9 %14
Taşeron firma seçimi	0 %0	1 %1	31 %46	21 %31	15 %22
Sözleşme ve eklerine uygunluk	1 %1	1 %1	28 %42	23 %34	15 %22
Danışmanlık hizmet alımı	2 %3	12 %17	36 %52	10 %15	8 %13

5.2. Güvenirlilik Analizi Sonuçları

İnşaat projelerinin kalitesini etkileyen faktörlerin ölçeklerinin güvenilirliğini kontrol etmek için SPSS programı kullanılmıştır. Güvenirlilik analizi için Cronbach's α hesaplanmıştır. Hesaplanan Cronbach's α 0,994 olup 0,7'den büyüktür. Bu sonuç, çalışmada kullanılan anket ölçeğinin güvenilir olduğunu ispatlamaktadır.

5.3. Göreceli Önem İndeksi Analiz Sonuçları

Her faktörün RII'si ve ana kategorisi ile birlikte sıralaması Çizelge 2'de gösterilmektedir. Sıralama sonuçları “Başlangıçta projenin detaylıca düşünülmemesi”, “Çalışanların iş kalite bilgisi eksikliği ve/veya tam olarak uygulamaması”, “Taşeron firma seçimi”, “Sözleşme ve eklerine uygunluk” ve “Ekipler arası iş birliği ve koordinasyon” faktörlerinin kaliteyi en çok etkilediğini göstermektedir. Sıralamada en az etkileyen faktörün “Danışmanlık hizmet alımı” olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 2 - Faktörlerin göreceli önem sıralaması

Faktör	RII	Sıra
Ekipler arası iş birliği ve koordinasyon	0,729412	5
Proje yöneticisinin finansal kararlar alabilmesi	0,711765	13
Proje yöneticisinin sahadaki taşeron firma yetkilileri ile iletişimi	0,694118	14
Proje yöneticisinin planlama tekniklerini göz ardı etmesi	0,720588	7
Çalışanların sorumluluklarını iyi anlaması	0,717647	11
Çalışanların memnuniyeti	0,688235	16
Çalışanlar arasındaki çatışma	0,720588	8
Çalışanların iş kalite bilgisi eksikliği ve/veya tam olarak uygulamaması	0,755882	2
İşveren ya da temsilcisi tarafından zamanında karar verilmesi	0,714706	12
İşverenin projenin zamanında bitirilmesine yönelik kurduğu baskı	0,720588	9
İşveren ya da temsilcisi tarafından etkili gözlem ve geribildirim verilmesi	0,694118	15
Başlangıçta projenin detaylıca düşünülmemesi	0,797059	1
Proje boyutunun ve değerinin büyük olması	0,685294	17
Projede yüksek teknik beceri ve bilgi isteyen faaliyetlerin benzersizliği	0,726471	6
Önemli kararları erteleme	0,720588	10
İnşaat kontrol toplantıları	0,641176	19
Organizasyon kültürü	0,679412	18
Taşeron firma seçimi	0,747059	3
Sözleşme ve eklerine uygunluk	0,747059	4
Danışmanlık hizmet alımı	0,629412	20

6. TARTIŞMA

Yapılan analizler sonucunda inşaat projelerinde kalite performansını etkileyen ilk beş faktörün sırasıyla “Başlangıçta projenin detaylı düşünülmemesi”, “Çalışanların iş kalite bilgisi eksikliği ve/veya tam olarak uygulamaması”, “Taşeron firma seçimi”, “Sözleşme ve eklerine uygunluk” ve “Ekipler arası iş birliği ve koordinasyon” olduğu ortaya konulmuştur. İnşaat sektöründe genel olarak tasarım aşaması ve yapım aşaması birbirinden ayrılmaktadır. Müşterilerin ihtiyaçlarına uygun tasarımın hızlı bir şekilde teslim edilmesini talep etmeleri, tasarımcının tasarımı gözden geçirmek ve hatalar oluştuğunda düzeltmek için yeterli zamanı olmamasına neden olmaktadır. Bu durum, yapım teknikleri ile ilgili ayrıntıların yapım aşamasında çözülmesine de yol açabilmektedir. Ayrıca, yeterince detaylandırılmamış projeler, tasarım aşamasında yer almayan ve sadece yapım aşamasında devreye giren yüklenicilerin de kaliteyi sağlamasını zorlaştırmaktadır. Yüklenicilerin kaliteyi güvence altına alabilmeleri için ilgili tasarım ayrıntılarını incelemeleri ve bazı koşulları yerinde görmek için saha ziyaretleri gerçekleştirmeleri gerekmektedir. Yapılabilirlik incelemesinde, yerel inşaat piyasasındaki beceri düzeyi ve tedarik olanığı ile malzemenin beklenen tedarik koşulları da dikkate alınmalıdır. Ancak zaman kısıtı altında çalışan tasarım ve yükleniciler, tasarımdan önce ve tasarım sırasında değil, sadece yapım aşamasında fikir alışverişi yapmaya fırsat bulabilmektedirler. Ayrıca, tasarım aşamasında iyi detaylandırılmamış projelerin yapım aşamalarında sıklıkla proje değişikliklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu değişiklikler, süre ve maliyetin yanında kaliteyi de önemli derecede etkilemektedir. İnşaat projelerinde karşılaşılan bu durumlar, “Başlangıçta projenin detaylı düşünülmemesi” faktörünü, kaliteyi etkileyen en önemli faktör olarak karşımıza çıkarmaktadır.

İnşaat projelerinin tasarımı ve yapım işi, konusunda uzman, sorumluluk bilinciyle düşünen ve çalışan personele bağımlıdır. Kaliteli ve zamanında üretim ise, iyi koordinasyon, kaliteli çalışma ve nitelikli personelle sağlanacaktır. Ancak, proje düzeyinde geçici organizasyonlar kurulması sonucu proje ekibinin farklılaşması ve kısa sürede sonuç alma isteği, şirketlerin açık ve anlaşılır bir biçimde sınıflandırılmış ve kademelendirilmiş, çalışanların kalıcı görevlerini anlayabileceği bir organizasyon yapısını kurmasına engel olabilmektedir. Kısa sürede sonuç alma isteği, işi daha iyiye götürmek için düşünmeye zaman kalmaması ve olumsuzlukların uygulama esnasında gelişigüzel yapımlarla giderilmeye çalışılması da kaliteyi düşürmektedir. Bunun yanında, inşaat sektöründe kurum kültürü kavramının ve bu kavramın kalite yönetiminin başarısına etkisinin tam kavranmadığı, kültürel değişim için gereken alt yapının (eğitim, motivasyon, iletişim, teknik bilgi vb.) oluşturulmadığı, inşaat sektöründe talebin belirsiz olması ve özellikle proje düzeyinde geçici organizasyonların kurulmasının çalışanlara eğitim verilmesini engellemesi gibi hususlarında kalite yönetimini zorlaştırdığı belirtilmektedir [1]. Çelebi ve Kuruoğlu [23], Türkiye’de inşaat firmalarında kalite yönetiminin personel niteliğine göre değerlendirildiğinde, yüklenici firma ile alt yüklenici firmada işi yönetebilecek sayıda personelin olması, personelin dikkatli ve detaycı olması, personelin teknik bilgi birikiminin önemli olduğunu; buna karşın personelin akademik eğitim seviyesinin, kültürel yapısı ve kişisel karakterlerinin önemli olmadığını belirtmektedir. Özellikle inşaat işçiliği eğitimi eksikliği ve dolayısıyla işçi kalitesinde standardizasyon eksikliği de dikkat çekmektedir. Bunlara bağlı olarak “Çalışanların iş kalite bilgisi eksikliği ve/veya tam olarak uygulamaması” sıralamada en önemli ikinci faktör olarak karşımıza çıkmaktadır.

İnşaat sektöründe bazı işlerin taşeron firma eliyle yaptırılması yaygın bir uygulamadır. Taşeron firma seçiminde genellikle önceki iş deneyimleri, mevcut iş birlikleri ve kalite performansına ilişkin kriterler dikkate alınmalıdır [24]. Ancak, yaygın olarak uygulanan en ucuz teklif veren firma ile sözleşme imzalanması prensibi; teknik açıdan ilgili deneyime sahip personel, sahip olduğu ekipman, mali durum ve iş yükü ön yeterlilik kriterlerinin dikkate alınmamasına yol açabilmektedir. Ancak, inşaat projeleri kalite performansında yapım işini üstlenecek firma seçimi ABD inşaat sektöründe en önemli beşinci faktör [25], Pakistan’da ise birinci önemli faktör olarak tespit edilmiştir [15]. Benzer şekilde bu çalışmanın sonuçları “Taşeron firma seçimi” faktörünün inşaat projelerinde kalite performansını etkileyen en önemli üçüncü faktör olduğunu göstermektedir.

Yükleniciler, inşaat projelerini sözleşme ve eklerine göre yapmak ile yükümlüdürler. Sözleşme eki olarak verilen çizimler ve şartnameler, inşa edilen yapının performansı, malzemeleri ve kalite gereksinimleri hakkında teknik bilgi sağlar. Şartnameler, bir inşaat projesinin nihai ürününün gerekli kalitesini belirlemek için çok önemlidir. İnşaat projeleri tipik olarak hem projeye özel hem de tip şartnamelerinden oluşan büyük miktarda dokümanlar içerir. Bu şartnamelerde kimi zaman birbirlerine çapraz başvuru yapılması karmaşık bağımlılıklara neden olmaktadır [26]. Bu durum inşaat şartnameleriyle çalışmayı hataya açık hale getirir. Ayrıca, kimi zaman çizimler ve teknik özellikler birbiriyle çelişebilmektedir. Bu nedenle, çizimlerin ve şartnamelerin tek tip, kısa ve net olması çok önemlidir. Yapılan bir çalışmanın bulguları, tasarımcıdan alınan çizim ve şartnamelerin kalitesinin, tasarım ve yapım aşamalarındaki kaliteyi ve dolayısıyla yapının kalitesini etkilediğini göstermektedir [15]. Benzer şekilde, bu çalışmanın sonuçları da “Sözleşme ve eklerine uygunluk” faktörünün en önemli dördüncü faktör olduğunu göstermektedir.

İnşaat projelerinde ekipler arası iş birliği ve koordinasyonun sağlanması önem taşımaktadır. Arditi ve Gunaydin [25] ekip çalışmasının hem tasarım hem de yapım aşamalarında oldukça önemli olduğunu belirtmektedir. Tasarım aşamasında ekip çalışması, profesyoneller için açıkça bir önceliktir. Tasarımcılar arasındaki iletişim ve iş birliği, kaliteli tasarım için hayati önem taşır. Tasarım aşamasında iş birliği eksikliği, daha sonra yapım süreci boyunca ekstra zaman ve maliyete neden olabilecek yeterli detay düzeyine sahip olmayan kalitesiz tasarımlar ile sonuçlanabilir. Yapım aşamasında ise ekipler arası yetersiz koordinasyon, örtüşen faaliyetler, malzeme sıkıntısı, verimsiz kaynak tahsisi vb. gibi büyük çatışmalara yol açabilir. Bu nedenlerden dolayı ekipler arası koordinasyon inşaat kalitesi için çok önemlidir. Ekipler arası koordinasyon, Pakistan’da dördüncü [15] ve ABD’de altıncı kritik faktör olarak bulunmuştur [25]. Bu çalışmanın sonuçları ise “ekipler arası iş birliği ve koordinasyon” faktörünün inşaat kalitesinde beşinci en önemli faktör olduğunu göstermektedir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada inşaat projelerinde kalite performansını etkileyen faktörleri ve profesyonellerin algılarına göre etki derecelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. İlk olarak, literatür taraması ve inşaat profesyonelleriyle yapılan görüşmeler aracılığıyla kalite performansını etkileyen 20 faktör belirlenmiştir. İkinci aşamada, faktörlerin inşaat projelerinde kalite performansına etki derecelerinin belirlenmesi için bir anket tasarlanmış ve anket sonuçları tanımlayıcı istatistikler, güvenilirlik analizi ve Göreceli Önem İndeksi yöntemleri ile değerlendirilmiştir.

Sonuçlar, inşaat projelerinde kalite performansına etki eden en önemli faktörün “Başlangıçta projenin detaylıca düşünülmemesi” olduğunu göstermektedir. Bu faktör ile ilgili olarak tasarım aşamasında farklı ekiplerin koordineli çalışmasının ve çakışma analizlerinin gerçekleştirilebildiği yapı bilgi modellemesinin kullanımının etkili olacağı düşünülmektedir. Yapım aşamasında gerekli olacak revizyonların da bu platformlarda yapılması bu analizlerin gerçekleştirilmesini kolaylaştırmaktadır.

İnşaat projelerinde kalite performansına etki eden ikinci en önemli faktör ise “Çalışanların iş kalite bilgisi eksikliği ve/veya tam olarak uygulamaması” olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu faktörde başarıya ulaşmanın anahtarı işinin uzmanı ve kalite prensiplerini benimseyen personeldir. İnşaat sektöründe sıklıkla karşılaşılan işçi kalitesi, mesleki eğitimler ve hayat boyu öğrenme prensiplerinin şirket bazında benimsenmesi ile arttırılabilir. Özellikle mesleki eğitimlerin belirli aralıklarla tekrarlanması, uluslararası sertifikasyon sistemlerinin oluşturulması ve periyodik olarak kontrollerin gerçekleştirilmesi üretimde kaliteyi arttıracaktır. Bu kapsamda inşaat sektöründe kalite sisteminin işlerlik kazanması da önem taşımaktadır. Başarılı bir kalite sisteminin oluşturulabilmesi için amaca uygun kontrol listeleri ve diğer yöntem talimatları kalite performansında sorumluluk taşıyan bütün çalışanlarca hazırlanmalıdır. Kurulacak kalite sisteminde sadece kontrol işlemini üstlenen kişilerce değil mimar, mühendis, tekniker, kontrollük, usta, kalfa hatta işçilerin katılımının da sağlanması da sağlanmalıdır.

İnşaat projelerinde kalite performansına etki eden üçüncü en önemli faktör ise “Taşeron firma seçimi” olarak karşımıza çıkmaktadır. Müteahhit seçiminde rol oynayan uzmanlık, mali durumu, teknik kadrosu, ekipman sahipliği, itibarı ve iş yükü proje kalitesini hemen etkileyebilir. Müteahhit seçiminde kullanılan ön yeterlik analizinin taşeron firmaların seçiminde de dikkate alınması önerilmektedir.

İnşaat projelerinde kalite performansına etki eden dördüncü en önemli faktör “Sözleşme ve eklerine uygunluk” olarak bulunmuştur. Bu faktör ile ilgili olarak inşaat projelerinde kalite planlarının oluşturulması önem taşımaktadır. Bu planlar, kaliteli malzemelerin doğru seçimini, tasarımın bir parçası olarak dahil edilecek uygun inşaat yöntemlerini ve proje tasarımının sözleşme belgelerinde belirtilen tüm geçerli şartname ve yönetmeliklere uygun olmasını sağlamayı içermelidir. Ayrıca, ISO sertifikası, inşaat sektöründe kalite performansının iyileştirilmesine yardımcı olur. Bu uluslararası standardizasyon kuruluşu, prosedürleri ve süreçleri belgeler şeklinde ortaya koyarak kalite standartlarını belirler. İnşaat sektöründe kalite standartları, tasarım ve yapım aşamalarının prosedürlerle uyumlu sistematik bir yaklaşım ile gerçekleştirilmesini sağlayabilir.

İnşaat projelerinde kalite performansına etki eden beşinci en önemli faktör “Ekipler arası iş birliği ve koordinasyon” olarak bulunmuştur. İnşaat sektöründe ekiplerin organizasyonu ve yapısı her bir iş özelinde tanımlanmaktadır. Bu ekipler arasındaki verimliliği ve koordinasyonu geliştirmek yönetimin görevidir. Bu kapsamda organizasyonunun odak noktasında kalite ekiplerini gören bir yaklaşım mevcuttur [27]. Kalite ekipleri, ekip yapısının oluşturulmasından, uygulama süreci ve ekip oluşumu için politika ve prosedürlerin geliştirilmesinden sorumludurlar. Bu ekipler, şirketlere bir kalite iyileştirme sürecini başarıyla uygulamak ve sürekli uygulamak için gerekli yapılandırılmış ortamı sağlar. İyi planlanmış bir ekip yapısı ile kalite eğitimleri yürütülebilir ve sürekli iyileştirme süreci yürütülebilir. Ekip yaklaşımının nihai amacı, kaliteyi iyileştirme sürecine herkesi dahil etmektir. Deming'e [28] göre ekipler, fikirlerini ifade etmelerine izin verilirse sürecin

kalitesini iyileştirebilir. Bunlar dikkate alındığında, inşaat şirketlerinde kalite ekiplerinin daha etkin olması önerilmektedir. Ekipler, inşaat tekniklerini ve üretkenliği iyileştirebilir ve buna bağlı olarak iş tekrarını ve maliyetleri azaltabilir. Ayrıca, organizasyon yapısında dikey ve yatay ekipler, iletişimi ve dolayısıyla sürecin kalitesini kolaylıkla iyileştirebilir. Bilgi teknolojisinin kullanımı, yüklenicinin personeli arasındaki iletişim ve koordinasyon seviyesini artırabilir. Daha iyi iş birliği ve koordinasyon aracılığıyla malzeme sıkıntısı, çakışan faaliyetler, yetersiz kaynak tahsisi vb. çatışmalar engellenebilir.

İnşaat projelerinde zaman ve maliyet kısıtları altında kalite performansının sağlanması oldukça zorlu bir çabayı gerekli kılmaktadır. Bu nedenle, kalite performansını etkileyen faktörlerin, sektöründe deneyimli profesyoneller tarafından belirlenmesi yol gösterici olacaktır. Bu çalışmanın çıktılarının, inşaat projelerinde kalite performansı etkileyen en önemli faktörlerin ortaya konulması ve bu faktörlere ilişkin öneriler sunması ile sektörde çalışan tüm paydaşlara fayda sağlayacağı düşünülmektedir. Gelecekteki araştırmalar, ortak girişim, konsorsiyum gibi yapım yöntemleri ile gerçekleşen inşaat projelerinde kaliteyi etkileyen faktörleri araştırabilir. Ayrıca, inşaat projelerinde kaliteyi etkileyen faktörleri belirlemeye ve bunları proje yaşam döngüsünün farklı aşamalarına göre sınıflandırmaya yönelik çalışmalar yapılabilir.

Kaynaklar

- [1] Aydın, M. K., İnşaat Projelerinde Kalite Yönetimi Uygulamaları, http://www.mustafakemalaydin.com/wp-content/uploads/2014/08/Insaat_Projelerinde_Kalite_Yonetimi_Uygulamalari.pdf, 1-13, 2014.
- [2] Okudan, O., Budayan, C., Arayıcı, Y., Identification and Prioritization of Key Performance Indicators for the Construction Small and Medium Enterprises, *Teknik Dergi*, 33, 5, 1-27, 2022.
- [3] Arditi, D., Günaydın, H. M., İnşaat Sektöründe Toplam Kalite Yönetimi, *Teknik Dergi*, 8, 36, 1997.
- [4] Aladağ, H., Işık, Z., Multi Agent System Based Risk Allocation Model for Public-Private-Partnership Type Projects (RAMP3), *Teknik Dergi*, 33, 4, 1-24, 2022.
- [5] Gurgun, A.P., Koc, K., Atabay, Ş., Yapı Bilgi Modellemesi Kullanımının Sürdürülebilir Yeşil Bina Projeleri Üzerine Etkileri, *Teknik Dergi*, 33, 3, 1-30, 2022.
- [6] Güner, A. F., Giritli, H., İnşaat Sektöründe Toplam Kalite Yönetimi ve Türkiye'deki Uygulamalar, *İtü Dergisi/a Mimarlık, Planlama, Tasarım*, 3, 1, 19-30, 2004.
- [7] Harrington, H. J., Voehl, F., Wiggin, H., Applying TQM to the Construction Industry, *The TQM Journal*, 24, 4, 352-362, 2012.
- [8] Jha, K. N., Iyer, K. C., Critical Factors Affecting Quality Performance in Construction Projects, *Total Quality Management*, 17, 9, 115-1170, 2006.
- [9] Geletu, N., Factors Affecting Quality Of Construction Projects: In The Case Of Selected Building Construction Industries In Addis Ababa, Ethiopia, St. Mary's University Institutional Repository Thesis and Dissertation Masters Program, 2020.

- [10] Prihartanto, E., Syarif, I.A., Utomo, E., Analysis of The Effect of Foreword Performance on The Quality of Construction Projects in Tarakan City, Gatot Kaca Journal, 2, 2, 2021.
- [11] Hijazi, R., Factors Hindering Quality Performance in Construction Projects: An Empirical Study, Review of Applied Socio-Economic Research, 21, 1, 47-57, 2021.
- [12] Shanmugapriya, S., Subramanian, K., Ranking of Key Quality Factors in the Indian Construction Industry, International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2, 7, 907-913, 2015.
- [13] [Tang, W., Qiang, M., Duffield, C.F., Young, D.M., Lu, Y., Enhancing Total Quality Management by Partnering in Construction, Journal of Professional Issues in Engineering Education and Practice, 135, 4, 129-141, 2009.
- [14] Chan, A. P. C., Wong, F. K. W., Lam, P. T. I., Assessing quality relationships in public housing An empirical study, International Journal of Quality & Reliability Management, 23, 8, 909-927, 2006.
- [15] Sheikh, A. H. A., Ikram, M., Ahmad, R. M., Qadeer, H., Nawaz, M., Evaluation of Key Factors Influencing Process Quality During Construction Projects in Pakistan, Grey Systems: Theory and Application, 9, 3, 321-335, 2019.
- [16] Joy, T., A Study on Factors Influencing Quality of Construction Projects, International Journal of Innovative Researc & Development, 3, 5, 384-387, 2014.
- [17] Güneşer, C., Çerçi, S., İnşaat Kalitesini Etkileyen Faktörlerin Değerlendirilmesi Üzerine Bir Araştırma, Ç.Ü Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 38, 1, 12-21, 2019.
- [18] Zeng, S.X., Tian, P. Tam, C.M., Quality Assurance in Design Organisations: A Case Study in China, Managerial Auditing Journal, 20, 7, 679-690, 2005.
- [19] Özer, E., Karabulut, T., Kalite Uygulamalarının İşletme Performansı Üzerindeki Etkisi: İnşaat Sektöründe Bir Uygulama, İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 16, 31, 329-346, 2017.
- [20] Soin, S.S., Total Quality Control Essentials, New York. McGraw-Hill, 1992.
- [21] Hoonakker, P., Carayon, P., Loushine, T., Barriers and Benefits Of Quality Management in the Construction Industry: An Empirical Study, Total Quality Management, 21, 9, 953 –969, 2010.
- [22] Kazaz, A., Manisali, E., Ulubeyli, S., Effect of Basic Motivational Factors on Construction Workforce Productivity in Turkey, Journal of Civil Engineering and Management, 14, 2, 95-106, 2008.
- [23] Çelebi, D., Kuruoğlu, M., İnşaat İmalat Sürecinde, İmalat Kalitesi Değişkenliğinin, Yüklenici ve Alt Yüklenici Personelin Niteliğine Göre Değerlendirilmesi, Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7, 1, 1-12, 2014.
- [24] Karaman, A.E., Sandal, K., Effect of Sub-Contractor Selection on Construction Project Success in Turkey, Teknik Dergi, 33, 4, 1-14, 2022.

- [25] Arditi, D., Gunaydin, H.M., Factors that affect process quality in the life cycle of building projects, *Journal of Construction Engineering and Management*, 124, 3, 194-203, 1998.
- [26] Boukamp, F., Modeling of and Reasoning about Construction Specifications to support Automated Defect Detection, Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Carnegie Mellon University, 2006.
- [27] Burati, J. L., Matthews, M. E, and Kalindindi, S. N., Quality Management Organizations And Techniques, *Journal of Construction Engineering and Management - ASCE*, 118, 1, 112-128, 1992.
- [28] Deming, W. E., *Out of the crisis*, Cambridge, Mass. MIT CABS, 1986.

TMMOB İNŞAAT MÜHENDİSLERİ ODASI

TEKNİK DERGİ YAZIM KURALLARI

1. Yazı tümüyle (metin, çizelgeler, denklemler, çizimler) bilgisayarda düzenlenmeli ve baskıya hazır biçimde teslim edilmelidir. Yazı, A4 (210 x 297 mm) boyutlu kağıda, Word ortamında, 10 punto (ana başlık 15 punto) Times New Roman font kullanılarak, bir aralıkla yazılmalı, kağıdın sol ve sağ yanında 40 mm, üst ve alt yanlarında 52.5 mm boşluk bırakılmalıdır.
2. Çizimler ve çizelgelerle birlikte, makaleler 25 sayfadan, teknik notlar 10 sayfadan daha uzun olmamalıdır.
3. Yazı, DergiPark sistemi üzerinden gönderilmelidir. (<http://dergipark.gov.tr/tekderg>)
4. Metin yalnız bir dil ve anlatımla yazılmalı, Türkçe yazım kurallarına uygun olmalı, üçüncü tekil şahıs ve edilgen fiiller kullanılmalı, devrik cümleler içermemelidir.
5. Başlık kısa (en çok 10 kelime) ve açık olmalı, içeriği yansıtabilmelidir.
6. Bölümler (i) öz ve anahtar kelimeler, (ii) diğer dilde başlık, öz ve anahtar kelimeler, (iii) ana metin, (iv) semboller, (v) teşekkür (gerekliyse) ve (vi) kaynaklar sırası içinde düzenlenmelidir.
7. İki dildeki öz çalışmanın amacını, kapsamını, yöntemini ve ulaşılan sonuçları kısaca tanımlamalı ve 100 kelimeyi aşmamalıdır. Gerekli görüldüğünde, öz(ler) yazara sorulmadan yeniden yazılabilir. En az üç tane anahtar kelime verilmelidir. İki dildeki başlık ve öz ve anahtar kelimeler birinci sayfaya sığdırılmalı, birinci sayfanın altında on satır boş bırakılmalı ve ana metin ikinci sayfadan başlatılmalıdır.
8. Bölüm ve alt bölüm başlıkları numaralanmalıdır (TS1212).
9. Semboller uluslararası kullanıma uygun seçilmeli; her bir sembol ilk kullanıldığı yerde tanımlanmalı, ayrıca metnin sonunda (Kaynaklardan önce) tüm semboller alfabetik sıra ile (önce Latin, sonra Yunan alfabesi) listelenmelidir.
10. Denklemler numaralanmalı ve bu numaralar satır sonunda parantez içinde gösterilmelidir.
11. Çizelgeler, çizimler ve fotoğraflar metin içine yerleştirilmeli, herbirine numara ve başlık verilmeli ve başlıklar çizim ve fotoğrafların altına, çizelgelerin üstüne yazılmalıdır.
12. Yazılarda yalnızca SI birimleri kullanılmalıdır.
13. Etik kuralları gereğince, alıntılar tırnak içinde verilmeli ve bir referans numarası ile kaynak belirtilmelidir.
14. Teşekkür olabildiğince kısa olmalı, çalışmaya katkısı ve desteği bulunan kişi ve kuruluşlar belirtilmelidir.
15. Kaynaklar metinde köşeli parantez içinde numaralanmalı ve kaynaklar listesinde metin içinde veriliş sırasına uygun biçimde belirtilmelidir. Kaynaklarda şu bilgiler verilmelidir:
Kaynak makale ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, makalenin tam başlığı, derginin adı, cilt, sayı, başlama ve bitiş sayfaları, yıl.
Örnek : Naghdi, P. M., Kalnins, A., On Vibrations of Elastic Spherical Shells. J. Appl. Mech., 29, 65-72, 1962.
Kaynak kitap ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, kitabın adı, cilt numarası, varsa editörü, yayınlandığı yer, yayınlandığı yıl.
Örnek : Kraus. H., Thin Elastic Shells, New York. Wiley, 1967.
Kaynak bildiri ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, bildirinin adı, konferansın adı, yapıldığı yer, yıl.
Kaynak tez ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, tezin adı, derecesi, sunulduğu üniversite, yıl.
Kaynak rapor ise: Yazarın soyadı, adının baş harfi, diğer yazarlar, raporun adı, türü, numarası, kuruluşun adı, yayınlandığı yer, yıl.
16. Teknik Dergi’de yayımlanmış bir yazı ile ilgili tartışma yazıları, en fazla iki sayfa olmalı, değinilen noktaları somut ve kısa biçimde ifade etmeli, yazarı değil içeriği eleştirmeli ve nezaket kurallarına uygun bir dille yazılmalıdır. Yazar yanıtları da yukarıda belirtilen ilkelere uygun olmalıdır.
17. Aynı bir sayfada düzenlenmiş bir bilgi notu yazı ile birlikte gönderilmelidir. Bilgi notunda, (i) yazar adları, iş ve ev adresleri ile telefon numaraları, (ii) yazarların kısa birer özgeçmişleri ve (iii) tüm yazarlarca imzalanmış olan “Bu yazının tümüyle özgün bir çalışmanın ürünü olduğunu ve daha önce, bu veya buna benzer bir biçimiyle, hiçbir yerde yayımlanmadığını, dürüstlük içinde bildiririm.” notu bulunmalıdır.
18. Sorumlu yazar tarafından imzalanmış telif hakkı devir formu da yazı ile birlikte gönderilmelidir.

İÇİNDEKİLER

Ayrılan Editörün Önsözü

Teknik Dergi'ye Umut Işığı Yeni Editör

Önsöz

Kurucu Editörümüze Teşekkürler Teknik Dergi İçin Kilometre Taşları ve Hedefler

ARAŞTIRMA MAKALESİ

Doğu Akdeniz'deki Tsunamijenik Depremlerin Sosyal Risklerinin Monte Carlo Yöntemi Değerlendirmesi..... 12741

Cüneyt YAVUZ, Elçin KENTEL

Gömülü Betonarme Boruların Analitik ve Sayısal Yöntemler ile Tasarımı 12761

Onur DEMİRCİ, Havvanur KILIÇ, Gökhan YAZICI

Türkiye'de Çıkan Endüstriyel Yan Ürünlerin Dolgu Özellikleri Üzerine Deneysel Bir İnceleme 12789

Irem Zeynep YILDIRIM

İnşaat Sektöründeki İş Kazalarının Hata Ağacı Analizi ile Değerlendirilmesi..... 12817

Şerife AK, İsmail ZORLUER

Taşkın ve Rüşubat Kontrolünde Yeni Öneri: Gemiburnu Tip Geçirgen Bent..... 12847

Emre AKÇALI

Çok Amaçlı Ardışık Baraj Haznelerinin İşletmesinin HEC-ResSim ile Simülasyonu..... 12863

Seda SEVER, Recep YURTAL

Doğu Karadeniz Havzası Lokal Meteorolojik Değişkenleri İçin Bir Ölçek İndirgeme Uygulaması ve Senaryo Esaslı Öngörüler 12877

Sinan NACAR, Murat KANKAL, Umut OKKAN

Kentiçi Toplu Taşıma Sistemlerinde Performansa Dayalı Ödeme Modelinin Geliştirilmesi 12913

Sezgin TEKİN, Halim CEYLAN, Sevil KÖFTECİ

İnşaat Sürecinin İş Çizelgelemesi, Yönetimi ve Optimizasyonu 12945

Önder Halis BETTEMİR, Ömer Faruk BULAK

Kozmik Işın Nötron Sayacı ile Ölçülen Toprak Neminin Hidrolojik Modellerde Kullanımı..... 12987

Mustafa Berk DUYGU, Zuhal AKYÜREK

Hidrolojik Model Kalibrasyonunda Uydu Tabanlı Aylık Buharlaşma ve LAI Verilerinin Kullanılması..... 13013

Muhammet Bahattin AVCUOĞLU, Mehmet Cüneyd DEMİREL

TEKNİK NOT

İnşaat Projelerinde Kalite Performansını Etkileyen Faktörler: Türkiye'de Bir Alan Çalışması..... 13037

Merve KURU ERDEM, Gülben ÇALIŞ