



TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Teknik Dergi

Cilt 32 Sayı 3 Mayıs 2021

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 32 Number 3 May 2021*

Cilt 32 Sayı 3 Mayıs 2021



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 32 - Sayı 3 - Mayıs 2021

İki ayda bir yayınlanır, yerel süreli yayın.

Baskı tarihi: 1 Mayıs 2021 / 1.000 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
- TÜBİTAK / ULAKBİM

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.

Baskı

Boyut Tanıtım Matbaa Basım Yayın San. Tic. Ltd. Şti.

İvedik Organize Sanayi 1354. Cad. Fora İşmerkezi No: 138/18 - Yenimahalle /Ankara

Tel: 0.312.385 72 12 - Faks: 0.312.385 72 13

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Teknik Dergi

Editör:

Tuğrul TANKUT

Yardımcı Editörler:

İsmail AYDIN

Özer ÇİNİCİOĞLU

Metin GER

Gürkan Emre GÜRCANLI

Alper İLKİ

Kutay ORAKÇAL

İsmail ŞAHİN

Özkan ŞENGÜL

Emine Beyhan YEĞEN

Yayın Sekreteri:

Cemal ÇİMEN

Danışma Kurulu:

Prof. S. Akman, Türkiye

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.

Stüleyman ADANUR	Kutay ÇELEBİOĞLU	BÜYÜKKAYIÇI	Mehmet Hakkı	Egemen TEOMETE
Ali Mardani	Tevfik Kutay	Melike GÜREL	OMURTAG	Serdal TERZİ
AGHABAGLOU	ÇELEBİOĞLU	İbrahim GÜRER	Engin ORAKDÖĞEN	Berrak TEYMUR
Ayda Şafak AĞAR	Ahmet Ozan ÇELİK	Aslı Pelin GÜRGÜN	Şeref ORUÇ	H. Onur TEZCAN
ÖZBEK	Oğuz Cem ÇELİK	Gürşans GÜVEN İŞİN	Akın ÖNALP	Hüseyin Onur TEZCAN
Perviz AHMEDZADE	Osman Nuri ÇELİK	İman	Halil ÖNDER	Mesut TİĞDEMİR
Ragıp AKBAŞ	Semet ÇELİK	HAJİRASOULİHA	Jülide ÖNER	Şahnaz TİĞREK
Sami Oğuzhan AKBAŞ	Hilmi Berk	Soner HALDENBİLEN	Bihrat ÖNÖZ	Salih TİLEYLİOĞLU
Şeref Doğuşcan AKBAŞ	ÇELİKÖĞLU	Murat HAMDERİ	Mustafa ÖZAKÇA	Vedat TOĞAN
Rıfat AKBIYIKLI	Mecit ÇETİN	Ufuk HANCILAR	Bergüzar ÖZBAHÇECİ	Onur Behzat
Özge AKBOĞA KALE	Gökhan ÇEVİKBILEN	Ingo A. HANSEN	Ceyhun ÖZÇELİK	TOKDEMİR
Hüseyin AKBULUT	Mesut ÇİMEN	Mustafa HATİPOĞLU	Gökhan ÖZDEMİR	Cengiz TOKLU
Burcu AKÇAY	Safiye FeYZa	Nejan HUVAJ	İlker ÖZDEMİR	Nuray TOKYAY
ALDANMAZ	ÇİNİCİOĞLU	SARIHAN	Osman Nuri ÖZDEMİR	Ali TOPAL
Cihan Taylan AKDAĞ	Erdal ÇOKÇA	Metin HÜSEM	Halit ÖZEN	İlker Bekir TOPÇU
Adem AKPINAR	Şevket ÇOKGÖR	Zeynep İŞİK	Murat ÖZEN	Cem TOPKAYA
Muhammet Vefa	İsa ÇÖMEZ	Hande İŞİK ÖZTÜRK	Pelin ÖZENER	Selçuk TOPRAK
AKPINAR	Atilla DAMCI	Sabriye Banu İKİZLER	Cem ÖZER	Kamile TOSUN
Atakan AKSOY	Yakup DARAMA	Ragıp İNCE	Hasan ÖZER	FELEKOĞLU
Hafzullah AKSOY	Osama M.F. DAWOUD	Eren İNCİ	Serkan ÖZGEN	Cengiz TOKLU
Hakan AKSU	Özgür DEĞERTEKİN	Pınar İNCİ KOÇAK	Eren Arman ÖZGÜVEN	Nursu TUNALIĞLU
Tülay AKSU ÖZKUL	Abdullah DEMİR	Sedat KABDAŞLI	Hakkı Oral ÖZHAN	Kağan TUNCAY
Büşra AKTÜRK	Cem DEMİR	Volkan KAHYA	Yener ÖZKAN	Gürsoy TURAN
Güzin AKYILDIZ	Uğur DEMİR	Mehmet Rifat	M. Hulusi ÖZKUL	Ö. Tuğrul TURAN
ALÇURA	Ender DEMİREL	KAHYAOĞLU	Gülen ÖZKULA	Cüneyt TÜZÜN
Zuhal AKYÜREK	Mehmet Cüneyd	Volkan KALPAKÇI	Turan ÖZTURAN	Latif Onur UĞUR
Uğurhan AKYÜZ	DEMİREL	Alper KANYILMAZ	Hasan Tahsin ÖZTÜRK	Mehmet Fevzi
Sadık ALASHAN	Fatih DİKBAŞ	Murat KARACASA	Mustafa ÖZUYUSAL	UGURYOL
Cenk ALHAN	Seyyit Ümit DİKMEN	Tanay KARADEMİR	Polat ÖZYİĞİT	Berna UNUTMAZ
Sinan ALTIN	İrem DİKMEN TOKER	Halil KARAHAN	Gülizar ÖZYURT	Volkan Emre UZ
Selim ALTUN	Ali Ersin DİNÇER	Ali KARAIPEKLİ	TARAKÇIOĞLU	Nihal UZCAN ERATLI
Adlen ALTUNBAŞ	Selim DÜNDAR	Cenk KARAKURT	Onur PEKCAN	İbrahim Mert UZUN
Ahmet Can ALTUNİŞİK	Nurhan ECEMİŞ	Mustafa KARASAĞIN	Elişan Filiz PİROĞLU	Deniz ÜLGEN
Yalçın ALVER	ZEREN	Zülküf KAYA	Cengiz POLAT	Mehmet ÜLKER
Egemen ARAS	Alper ELÇİ	Mustafa Kubilay	Selim PUL	Cüneyt VATANSEVER
Ergin ARIOĞLU	Şebnem ELÇİ	KELEŞOĞLU	Selçuk SAATÇI	Syed Tanvir WASTI
Yalçın ARISOY	Muhammet Emin	Mustafa Erol KESKİN	Selman SAĞLAM	Nazmiye YAHNİOĞLU
Musa Hakan ARSLAN	EMİROĞLU	Havvanur KILIÇ	Mehmet SALTAN	Cem YALÇIN
Deniz ARTAN İLTER	Hakan ERDEM	İsmail Emrah KILIÇ	İlyas SARIBAŞ	Mehmet Cem YALÇIN
Şenay ATABAY	Sinan Turhan	Sami And KILIÇ	Afşin SARITAŞ	Aslı YALÇIN
Ali Osman ATAHAH	ERDOĞAN	Fahriye KILINÇKALE	Altuğ SAYGILI	DAYIOOĞLU
Hakan Nuri ATAHAH	Esin ERGEN	Ufuk KIRBAŞ	Serdar SELAMET	Ahmet Cevdet
Abdullah AVEY	PEHLEVAN	Veysel Şadan Özgür	Senem SEYİS	YALÇINER
Ersin AYDIN	Ayşen ERGİN	KIRCA	Alper SEZER	İsmail Özgür YAMAN
İsmail AYDIN	Gökmen ERGÜN	Güven KIYMAZ	Faiz Uddin Ahmed	Arcan YANIK
Mustafa Tamer AYVAZ	Ebru ERİŞ	Young Hoon KİM	SHAIKH	Mert Yücel YARDIMCI
Ela BABALIK	Bülent ERKMEN	Gökhan KIRKIL	Osman SİVRİKAYA	Ufuk YAZGAN
Can Elmar BALAS	Barış ERKUŞ	Salih KOÇAK	Behzad SOLTANBEİĞİ	Anıl YAZICI
Selim BARADAN	Esra Ece ESELLER	Niyazi Uğur KOÇKAL	Celal SOYARSLAN	Halit YAZICI
Türkay BARAN	BAYAT	Önder KOÇYİĞİT	Serdar SOYÖZ	Kasım YENİGÜN
Bekir Oğuz BARTIN	Tuğba ESKİŞAR TEFÇİ	Mehmet Melih	Tayfun Altuğ SÖYLEV	Seda YEŞİLMEN
Eyüp Ensar BAŞAKIN	Burak FELEKOĞLU	KOŞUCU	Aleksandar	İrem Zeynep YILDIRIM
Cemal BAŞARAN	Okan FİSTİKOĞLU	Baha Vural KÖK	STEVANOVİC	Mehmet
Özgür BAŞKAN	Abdullah GEDİKLİ	Metek KÖKEN	Erol ŞADOĞLU	YILDIRIMOĞLU
İdris BEDİRHANOĞLU	Ergun GEDİZLİOĞLU	Fuat KÖKSAL	Güvenç ŞAHİN	Osman YILDIZ
Niyazi Özgür BEZGİN	Mohammad Ali	Şerife Yurdagül	Remzi ŞAHİN	Cetin YILMAZ
Senem BİLİR	GHORBANİ	KUMCU	Yuşa ŞAHİN	Fatih YILMAZ
MAHÇİCEK	Ömer GIRAN	Murat KURUOĞLU	Mustafa ŞAHMARAN	Koray Kamil YILMAZ
Ahmet BİRİNCİ	Konuralp GİRGIN	Akif KUTLU	Nermin ŞARLAK	Mehmet YILMAZ
İlknur BOZBEY	Zehra Canan GİRGIN	Semih	Ömer Lütfi ŞEN	Murat YILMAZ
Zafer BOZKUŞ	İlgin GÖKAŞAR	KÜÇÜKARSLAN	Burak ŞENGÖZ	Mustafa Tuğrul
Atıl BULU	Çağlar GÖKSU	Abdullah KÜRKÇÜ	Aynur ŞENSOY	YILMAZ
Burcu BURAK BAKIR	Serdar GÖKTEPE	Hilmi LUŞ	ŞORMAN	Veysel YILMAZ
Halil İbrahim BURGAN	Fazlı Erol GÜLER	Kasım MERMERTAŞ	Okan ŞİRİN	Yüksel YILMAZ
Yusuf CALAYIR	Hakan GÜLER	Mehmet Murat	Ali Arda ŞORMAN	Fatih YONAR
Erdem CANBAY	İlgin GÜLER	MONKUL	Ali Ünal ŞORMAN	Recep YURTAL
Zekai CELEP	Gürkan GÜNAY	Hamid MORTEZAİE	Özcan TAN	İsmail YÜCEL
Cihan CENGİZ	Taylan GÜNAY	Yetiş Şazi MURAT	Gültim TANIRCAN	Ömer YÜKSEL
Halim CEYLAN	Abdurrahman GÜNER	Sepanta NAIMİ	Kürşat TANRIÖVEN	Ercan YÜKSEL
Hüseyin CEYLAN	Samet GÜNER	Öcal NECMİOĞLU	Serhan TANYEL	Yeliz YÜKSELEN
Ömer CİVALEK	Ülker GÜNER	Sinan Melih NİĞDELI	Yüksel TAŞDEMİR	AKSOY
Özgür ÇAKIR	BACANLI	Elif OĞUZ	Kerem TAŞTAN	Ahmet Şahin
Melih ÇALAMAK	Oğuz GÜNEŞ	Didem OKTAY	Gökmen TAYFUR	ZAİMOĞLU
Gülben ÇALIŞ	Mehmet Şükrü GÜNEY	Derviş Volkan OKUR	İlker TEKİN	Abdullah Can
Erkan ÇELEBİ	Tuba GÜRBÜZ	Volkan OKUR	Beytullah TEMEL	ZÜLFİKAR

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Teknik Dergi

Cilt: 32 Sayı: 3 Mayıs 2021

İÇİNDEKİLER

- Kaynak Dengeleme Probleminin Arama Uzayını Paralel Programlama ile Tarayarak Kesin Çözümü.....10767
Tuğba ERZURUM, Önder Halis BETTEMİR
- Jeoid Değişimlerinin ICESat Altimetre Verisi ile Hesaplanan Su Seviyelerine Etkisi10807
Fatih SAKA, Ahmet Emre TEKELİ , Senayi DÖNMEZ
- İnceltilmiş Uçlu Önüretimli Aşık Kirişlerinin Yük Taşıma Kapasitelerinin Deneysel ve Numerik Olarak İrdelenmesi ve Çözüm Önerileri10823
Ceyhan AKSOYLU, Yasin Onuralp ÖZKILIÇ, Şakir YAZMAN, Lokman GEMİ, Musa Hakan ARSLAN
- Yaya Kazalarının Yaralanma Şiddetinin İncelenmesi: İkili Lojistik Regresyon Modeli Uygulaması.....10859
Murat ÖZEN
- Nanokil/Polimer/Bitüm Nanokompozit Hazırlama Yönteminin Asfalt Karışım Performansı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması10885
Erol İSKENDER, Atakan AKSOY
- Teknik Not**
Prefabrikte Yapıların Tasarım, Üretim, Depolama, Nakliye ve Yapım Süreçlerini Etkileyen Faktörler.....10907
İlhami AY, Gülден GÜMÜŞBURUN AYALP

Kaynak Dengeleme Probleminin Arama Uzayını Paralel Programlama ile Tarayarak Kesin Çözümü

Tuğba ERZURUM¹
Önder Halis BETTEMİR²

ÖZ

Kaynak dengeleme problemi (KDP) sezgisel, modern sezgisel ve matematiksel yöntemlerle çözülmektedir. Fakat belirtilen yöntemler özellikle büyük boyutlu problemler için kesin çözümü garanti edememektedir. Bu çalışmada KDP'nin aktiviteler arasındaki bağımlılık ilişkilerini ihlal etmeden ve proje süresinde uzamaya neden olmayacak şekilde bolluğu olan aktivitelerin ertelenmesi ile elde edilebilecek birbirinden farklı kaç iş programı oluşturulabileceği hesaplanmıştır. Arama uzayı olarak tanımlanan tüm uygulanabilir iş programlarının tamamının denemesi ile garantili biçimde KDP'nin en iyi çözümü elde edilerek mevcut yöntemlerden farklı biçimde KDP'nin çözülmesi sağlanmıştır. Aktivite sayısı ile arama uzayı arasında seri bağlı aktiviteler için üstel bağıntı formülü türetilerek büyük projelerin tek işlemci ile çözümünün makul sürede gerçekleştirilemeyeceği belirlenmiştir. Problemin paralel programlama ile tüm işlemciler eşit sayıda şebeke çözümü düşecek şekilde paylaşılması sağlanmıştır. Bu çalışmada en büyüğü 36 aktiviteli olan 4 KDP arama uzayının tamamı taranıp makul sürede çözümlenerek geliştirilen yöntemin uygulanabilir olduğu kanıtlanmıştır. Bu yöntem ile daha küçük parçalara ayırmak sureti ile daha büyük kaynak dengeleme problemlerinin kesin çözümü elde edilebilecektir.

Anahtar Kelimeler: Kaynak dengeleme problemi, optimizasyon, kritik yol yöntemi, paralel programlama.

ABSTRACT

Exact Solution of Resource Leveling Problem by Exhaustive Enumeration with Parallel Programming

Resource Leveling Problem (RLP) is solved by heuristic, meta-heuristic, and mathematical methods. However, the aforementioned methods cannot guarantee the exact solution for large

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 22 Temmuz 2019 günü ulaşmıştır. 23 Mayıs 2020 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2021 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.595238>

1 İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya - tugbaerzrm@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0003-4788-6999>

2 İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Malatya - onder.bettemir@inonu.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0002-5692-7708>

size problems. In this study, number of feasible schedules which can be obtained by delaying the non-critical activities without violating the precedence relationships and elongating the project completion time are computed. All of the feasible schedules which can be defined as the search domain are enumerated and the guaranteed optimum solution for the RLP is obtained by a different method from the existing methods. Exponential equation between the search domain and the number of activities on serial path is derived and the insolvability of large RLP in a reasonable time by one central processing unit is verified. Partitioning of the problem into equal sizes is provided by parallel programming so that each particle contains the same number of enumeration. In this study, four RLP in which the largest problem has 36 activities are solved by exhaustive enumeration within reasonable solution time and it is proved that the proposed method is applicable. Exact solutions of larger problems can also be obtained by the proposed method if the problem is partitioned into smaller sizes.

Keywords: Resource leveling problem, optimization, critical path method, parallel programming.

1. GİRİŞ

Kaynak dengeleme, bir projenin hedeflenen tamamlanma süresi uzatılmadan proje süresince oluşan kaynak kullanımındaki dalgalanmaları ve en yüksek günlük kaynak talebini düşürmeyi amaçlar. En yüksek günlük kaynak talebindeki düşüş, kaynak ihtiyacının çok yoğun olduğu dönemlerde bolluğu olan aktivitelerin geciktirilerek daha az kaynak talebinin görüldüğü günlerde yapılmasının sağlanması ile elde edilir. Kaynak kullanımının çok yoğun günlerden az yoğun günlere kaydırılması ile inşaatın kaynak dengelemesi yapılmamış iş programına göre daha düşük en yüksek kaynak talebi ile gerçekleştirilmesi mümkün olacaktır. Bunun sonucunda personel ihtiyacının fazla olduğu dönemlerde ilave personelin işe alınma ve personel talebinin azaldığı dönemlerde işten çıkarılması gerekliliği azalacaktır. Benzer şekilde kısa süreli iş makinesi kiralama ve iade etme ihtiyacı azaltılacaktır. Kısa süre içinde oluşan kaynak kullanımındaki dalgalanmalar azaltılacağı için proje süresince kaynakların atıl kaldığı süreler de düşürülecektir. Bu sayede inşaat projelerinin maliyetlerinde önemli tasarruflar elde edilebilecektir. Direk yararın yanı sıra personel hareketliliğinin azalması sonucu çalışanların öğrenme eğrisi ve iş alışkanlıkları süreklilik gösterecek ve proje yönetimi kolaylaşacaktır. Kötü proje yönetimi inşaat işlerinde süre ve maliyet aşımına yol açmaktadır [1]. Belirtilen doğrudan katkılara ek olarak kaynak dengelemenin oluşturacağı iş sürekliliği proje yönetimi konusunda sağlayacağı dolaylı katkı olacaktır.

1.1. KDP'nin Özellikleri

KDP'nin literatürde birkaç türü bulunmaktadır. Aktivitelerin ertelenmesinde bolluk sürelerine ek olarak minimum ve maksimum erteleme kısıtları konularak kaynak dengeleme problemi çözülebilir [2]. Erteleme üzerindeki kısıtların sektördeki karşılığına sıra işi tamamlandığında boyanın başlayabilmesi için sıvanın kuruması gerekliliği örnek olarak gösterilebilir. Minimum erteleme süre kısıtı sıvanın boya yapılabilir düzeyde prizini alıp kuruması olarak tanımlanabilir. Maksimum erteleme kısıtına ise donatı işinin tamamlanmasından sonra beton dökümünün başlaması için konulabilecek maksimum zaman

aralığı örnek verilebilir. Beton dökümünün başlama zamanı çok geciktirilirse donatı paslanabilir veya rüzgâr vb. çevresel etkilerden dolayı kolon donatıları şakul doğrusundan sapıp yana eğilebilir. Benzer sorunları önlemek için aktiviteler arasında maksimum erteleme süre kısıtı tanımlanabilir.

KDP aktivite sürelerinin rastgele değişken olarak tanımlanıp stokastik optimizasyon problemi olarak da çözülmüştür [3]. Ayrıca aktivitelere birden fazla tamamlanma sürelerinin atanabildiği çok modlu KDP de incelenmiştir [4,5]. Abadi vd. KDP'yi paranın zaman değerini dikkate alarak çözmüştür [6]. Kaynak dengelemenin başka bir türünde ise aktivitelerin yürütülmesi sırasında aktiviteler durdurulup bir süre sonra tekrar başlanabilir [7] ve buna ek olarak farklı tamamlanma sürelerine göre kaynak dengelemesi yapılabilir. İnşaat işlerinde ve endüstride genellikle aktivitelerin yarıda kesilip bir süre sonra devam edilmesi çok tercih edilir bir işleyiş değildir. Bu nedenle bu çalışmanın kapsamı kaynak dengeleme probleminin elde edilen ilk proje tamamlama süresini aşmadan ve aktivitelerin yarıda kesilmeden kaynak dalgalanmasını en aza indirme hali ile sınırlı tutulmuştur.

1.2. KDP'nin Çözümünde Uygulanan Yöntemler

Kaynak dengeleme probleminin çözümü için sezgisel, modern sezgisel ve matematiksel yöntemler uygulanmaktadır. Harris, kaynak dengeleme probleminin çözümü için 'pack metodu' adını verdiği sezgisel bir yöntem geliştirmiştir [8]. Bu yöntemde aktivitelerin günlük kaynak taleplerinin fazlalığına göre her aktiviteye öncelik atanmaktadır. Kaynak kullanımın fazla olduğu günlerde önceliği en düşük olan aktiviteden başlayarak aktiviteleri sırayla geciktirerek günlük kaynak histogramının karelerinin toplamını en aza indirmeyi amaçlamıştır. Hiyassat (2001), minimum moment kaynak dengeleme ölçeğini revize ederek modifiye edilmiş minimum moment ölçeğini geliştirmiştir [9]. Bu ölçeği kullanarak birden fazla kaynağı dengeleyen yöntem geliştirmiştir. Karşılaştırma amacıyla, örnek problemi iyileştirilmiş minimum moment ve geleneksel minimum moment yöntemiyle çözümlenmiştir. Harris ve Hiyassat tarafından önerilen yöntemler 11 aktiviteden oluşan küçük projeler üzerinde denenmiştir. Yöntemler daha büyük projelerde en iyi sonuçtan çok uzak sonuçlara yakınsamaktadır. Sezgisel yöntemler sadece küçük projelerde iyi sonuçlar vermekte, büyük projelerde modern sezgisel ve matematiksel yöntemlere göre yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle sezgisel yaklaşımlar inşaat maliyetlerini düşürmek için uygun yöntemler değildir.

KDP NP-zor sınıfı bir problem türü olduğu için [10, 11] aktivite sayısı artınca problemin zorluk derecesi üstel biçimde artmakta ve sabit kurallar çözüm üretmez duruma gelmektedir. Sezgisel yöntemler yetersiz kaldığı için modern sezgisel yöntemler de kaynak dengeleme probleminin çözümünde uygulanmaktadır. Hegazy (1999) KDP için Genetik Algoritma (GA) tabanlı bir optimizasyon aracı geliştirmiştir [12]. Son ve Skibniewski (1999) Tavlama Benzetimi algoritması ile KDP'yi çözmüştür [13]. Çalışmasında 11 ve 13 aktiviteli bir projenin tam çözümünü elde etmiştir. Leu vd. (2000) çok kaynaklı KDP'nin çözümü için GA uygulamıştır [14]. GA, ayrıca KDP'nin çözümü için Zheng vd. (2003), El-Rayes ve Jun (2009), Christodoulou vd. (2009), Ponz-Tienda vd. (2013) ve Li vd. (2017) tarafından da kullanılmıştır [15-19]. Parçacık Sürü Optimizasyonu KDP'nin çözümü için Qi vd. (2007) tarafından uygulanmıştır [20]. Li vd. (2010) ve Geng vd. (2011) Karınca Koloni Algoritmasını KDP'nin çözümü için uygulamışlardır [21, 22]. Tran ve Hoang (2014) Diferansiyel Evrim algoritmasını 44 aktiviteli bir KDP'nin çözümünde kullanmıştır [23]. Xu

vd. yapay arı kolonisi algoritmasını, Prayogo ve Kusuma ile Prayogo vd. simbiyotik organizma arama yöntemini kullanarak KDP'yi çözmüştür [24-26]. Modern sezgisel yöntemlerle KDP çözümünde tam sonucu elde edilen en büyük proje 44 aktivitelidir ve Tran ve Hoang tarafından elde edilmiştir.

KDP'de aktivite sayısı arttıkça problemin arama uzayı üstel biçimde arttığı örnek problemler üzerinde gösterilmiştir [27]. Bu nedenle büyük projelerin kaynak dengeleme probleminin modern sezgisel yöntemlerle çözümünde popülasyon boyutunun yüksek tutulması ve yenileme sayısının artırılması gerekmektedir. Bu sorunu çözmek için öğretme-öğrenme tabanlı optimizasyon yaklaşımı ile popülasyon oluşturulması yoluna gidilmiştir [28]. Modern sezgisel yöntemlerde tekrar sayısı ve popülasyon sayısının artması bellek kullanımı açısından bir sorun oluşturmazken hesaplama süresini çok hızlı artırmaktadır. Bu nedenle büyük projelerin çözümünde belirli süre hesap yapıldıktan sonra yakınsama olmamasına rağmen hesaplamalar durdurulmaktadır. Ayrıca modern sezgisel yöntemlerle gerçekleştirilen optimizasyonda küresel optimuma erişilip erişilmediği kesin olarak bilinmemektedir.

Sezgisel ve modern sezgisel yöntemlerin tam sonucu garantileyememeleri nedeniyle KDP'nin çözümü için matematiksel programlamaya dayalı kesin çözüm elde edebilen algoritmalar geliştirilmiştir. Karaa ve Nasr (1986) en az iş makinesi kira bedelinin elde edilmesini sağlayacak şekilde doğrusal programlama ile kaynak dengeleme problemini formülleştirilmiştir [29]. Takamoto vd. (1995) kuadratik programlama ile KDP'yi çözmüştür [30]. Easa (1989), Hariga ve El-Sayegh (2010) tamsayı-doğrusal programlamayı uygulamışlardır [31, 32]. Karışık tamsayı programlama ise Gather vd. (2011) ile Rieck ve Zimmermann (2015) ile Mattila ve Abraham (1998) tarafından uygulanmıştır [33-35]. Matematiksel yöntemlerin ortak özelliği kesin çözümü sunabilmeleridir. Fakat aktivite sayısı arttıkça denklemdaki bilinmeyen sayısı çok hızlı artmaktadır. Bu durum problemin çözüm süresini çok hızlı artırmakta ve hesaplamalar kesin sonuç alınmadan durdurulmaktadır. Bu nedenle büyük KDP'nin çözümünde matematiksel yöntemler tam sonuç verememektedir. Çözülen şebekenin karmaşıklığına da bağlı olmakla birlikte kesin yöntemlerle çözülebilen en büyük proje 50 aktivitelidir [34].

1.3. Motivasyon

Kaynak dengeleme probleminin çözümü için uygulanan sezgisel, modern sezgisel ve matematiksel programlama yöntemleri büyük boyutlu problemlerin kesin çözümü için elverişli değildir. Bu çalışmada mevcut yöntemlere eklemeler yaparak performanslarının artırılması yerine kaynak dengeleme probleminin uygulanabilir çözümlerinin tamamını deneyerek en iyi çözümü elde etme yaklaşımı geliştirilmiştir.

Kaynak dengeleme probleminde uygulanabilir çözümler bolluğu olan aktivitelerin aktiviteler arasındaki öncelik ilişkilerini ve bolluk sürelerini ihlal etmeden geciktirilmesi ile sağlanır. Toplam bolluk süresi aktivitenin ertelenebileceği toplam süreyi, serbest bolluk ise aktiviteden sonra başlayacak olan aktivitelerin başlangıç zamanlarını etkilemeden gerçekleştirilebilecek erteleme süresini tarif eder. Elde edilen tüm uygulanabilir çözümler arama uzayını oluşturur. Kaynak dengeleme probleminin tüm arama uzayının taranması, uygulanabilir çözümlerin tamamının denenmesini kesinleştireceği için garantili biçimde en iyi çözümün elde edilmesini sağlar.

Arama uzayının hesaplanabilmesi için kritik yol yöntemi ile şebekenin çözülerek kritik ve kritik olmayan aktiviteler belirlenir. Arama uzayının belirlenmesi birbirleri ile paralel olan hatların bolluk sürelerine sıfır gün erteleme dâhil edilerek bolluk sürelerinin bir fazlası ile çarpılması, birbirlerine seri olan hat üzerindeki aktivitelerin ise önce başlayan aktivitelerin kendinden sonra başlayan aktivitenin erteleme aşmayacak şekilde kaç farklı biçimde geciktirilebileceğinin hesaplanması ile gerçekleştirilir. Şebekedeki bağımlılık ilişkilerini ihlal etmeden ve proje süresini uzatmadan kritik olmayan aktivitelerin kaç farklı şekilde ertelenebileceği hesaplanarak arama uzayının büyüklüğü belirlenir [27].

Bu çalışmanın öncesinde arama uzayını belirleyip tamamını tarayarak KDP çözümü 13-aktiviteye kadar projeler için Erzurum ve Bettemir (2018) ve Bettemir ve Erzurum (2019) tarafından gerçekleştirilmiştir [36, 37]. Ayrıca KDP'nin arama uzayının hesaplanması ve çözülmesi Erzurum (2019) tarafından detaylı biçimde incelenmiştir [38]. Problemin NP-zor olmasından dolayı büyük projelerin çözümünde tüm arama uzayının tek işlemci ile taranması oldukça zaman alacaktır. İhtiyaç duyulan hesaplamaların birden fazla işlemciye dağıtılarak gerçekleştirilmesi ile hesaplama sürelerinde önemli kısaltmalar elde edilebilmektedir. Fakat paralelleştirme yapabilmek için problemin paralel programlamaya uygun olması gereklidir [39].

Parallelleştirme ince tanecikli, orta tanecikli ve iri tanecikli olarak üç sınıfa ayrılabilir. İnce taneli paralelleştirmede problem çok sayıda küçük alt probleme bölünür ve hesaplama çok sayıda işlemciye dağıtılarak gerçekleştirilir. İnce tanecikli paralelleştirmede işlemcilere düşen yük az olur ve iş miktarları birbirine yakın boyuta getirilebilir. Fakat işlemci sayısı çok artınca işlemciler arasında veri akışı ihtiyacı çok yükselebilir ve senkronizasyon sorunları ortaya çıkabilir. Kaba taneli paralelleştirmede problem daha az sayıda parçaya bölünür. Problemin az sayıda parçaya bölünmesi her parçanın birbirine yakın hesap yükü içerecek şekilde paylaşılmasını garantileyemeyebilir. Bu nedenle bazı işlemciler hesaplamayı erken tamamlayıp boşa kalabilir. Kaba taneli paralelleştirmenin avantajı ise işlemciler arası veri alışveriş ihtiyacının az olmasıdır [40]. Tüm arama uzayının taranması ile gerçekleştirilen KDP çözümünde işlemciler arası veri akışı ihtiyacı sıfır olduğu ve problem eşit hesap yüküne sahip çok sayıda parçaya bölünebildiği için yüksek verimli biçimde ince taneli paralelleştirme yapılabilmesine elverişlidir.

Paralel programlama optimizasyon sürecinde yaygın olarak kullanılmaktadır, özellikle modern-sezgisel yöntemler paralel programlama ile çözülmeye yatkındırlar. Popülasyon tabanlı yöntemler oldukları için paralelleştirme bireylerin çözümü üzerinden gerçekleştirilir ve hesaplamalar birey sayısı kadar işlemciye dağıtılabilir. Bu sayede hesaplama süresinde önemli tasarruflar elde edilebilmektedir [41,42]. Kandil ve El-Rayes zaman-maliyet ödünleşim (*trade-off*) problemini Genetik Algoritma (GA) ile optimize etmiştir [43, 44]. 720 aktiviteli proje analiz edilirken hesaplamalar 50 işlemciye dağıtılmış ve hesaplama süresi sekizde bire düşürülmüştür. Modern sezgisel yöntemlerde yenilemenin tamamlanabilmesi için tüm bireylerin çözülmüş olması gerekir. Bu nedenle her yenilemenin tamamlanma hızı en yavaş bireyin hızına eşit olmaktadır. Bu durum hesaplama süresinden elde edilebilecek tasarrufu düşürmektedir. Kandil vd., (2010) GA ile çözdüğü optimizasyon probleminde kaba taneli (*coarse grained*) paralelleştirme yapmış ve 50 işlemci kullanarak gerçekleştirilen paralelleştirmede global paralelleştirmeye göre hesap süresini üçte bir oranında kısaltmıştır [44]. Hesaplama süresinin istenilen ölçüde kısaltmamasının nedeni optimizasyon sürecinin her yenilemesinde en yavaş işlemcinin beklenmesi zorunluluğudur. İşlemcilere dağıtılan

hesap yükü tek şebeke çözümünün yapılmasıdır. Her yenilemede tüm işlemcilerin hesaplamasını tamamlaması beklenmekte ve en yavaş işlemci çözüm süresini belirlemektedir.

Kaynak dengeleme probleminin doğrusal programlama veya dal-sınır algoritmaları ile çözümü verimli biçimde paralelleştirmeye çok elverişli değildir. Denklemler probleme bağlı olduğu için çözümü sistematik biçimde verimli olarak parçalanamamaktadır. Parallelleştirme ağırlıklı olarak matris tersinin alınması veya pivotlama sırasında yapılmaktadır. Bunun dışındaki süreçte seri hesaplama yapılmakta ve paralelleştirme düşük verimde olduğu için hesaplama süresinde kayda değer bir tasarruf sağlanamamaktadır.

Yapım yönetimi alanında paralel programlama kullanarak gerçekleştirilen optimizasyon çalışmaları ile ilgili literatür oldukça sınırlıdır. Kaynak dengeleme problemi genel olarak modern sezgisel yöntemlerle gerçekleştirilmekte ve orta büyüklükteki projelerde yakın-optimum sonuçlar elde edilmektedir. Problemin zorluk düzeyi arttıkça yakın-optimum'dan daha da uzaklaşmaktadır. Günümüzde yaygınlaşan çok çekirdekli işlemciler ele alındığında yakın-optimum sonuçlarla yetinmek ve inşaat maliyetlerini yeteri kadar düşürememek önemli bir eksikliktir. Bu nedenle tüm arama uzayını paralel-programlama ile tarayarak garantili biçimde KDP'nin en iyi çözümünü elde eden bir yöntem önerilmiştir. Makalenin 2. bölümünde arama uzayının nasıl belirlendiği ve tarandığı açıklanmakta, 3. bölümünde ise literatürden derlenen 3 hipotetik çalışma ile 2 katlı bina inşaatı projesinin paralel programlama ile çözümü ve elde edilen değerler sunulmakta, 4. bölümde yöntemin avantajı ve eksiklikleri tartışılmakta ve ileride yapılabilecek çalışmalara değinilmekte, 5. bölümde sonuç bölümü sunulmaktadır.

2. YÖNTEM

Bu çalışmada kaynak dengeleme probleminin kesin optimum sonucunun elde edilmesi için geliştirilen yöntem; kaynak dengeleme probleminin arama uzayının belirlenmesi, paralelleştirmenin yapılması ve arama uzayının taranması işlem adımlarından oluşmaktadır. Belirtilen işlem adımlarının detayları bu bölümde açıklanmıştır.

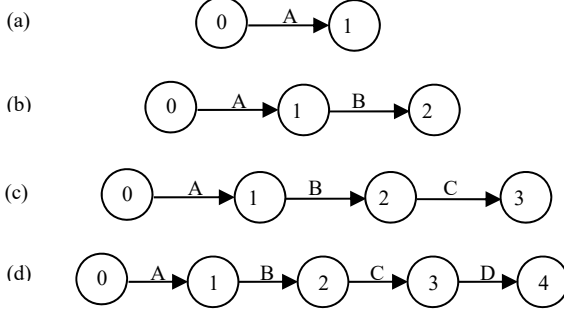
2.1. Arama Uzayının Belirlenmesi

Kaynak dengeleme probleminin tam sonucu tüm alternatifler denenerek elde edileceği için şebekenin bolluğa sahip aktivitelerinin geciktirilerek birbirinden farklı kaç iş programı oluşturulabileceğinin belirlenmesi gerekmektedir. Aktivitelere atanabilecek erteleme süresi kendinden önce ve sonra gerçekleşen aktivitelere atanan erteleme sürelerine de bağlı olduğu için toplam bolluk ve serbest bolluk hesabının daha sistematik biçimde yapılabildiği ok diyagramı ile şebeke analizleri gerçekleştirilmiştir. Bolluğu olan aktivitelerin kaç farklı şekilde ertelenebileceği kombinasyon hesabı ile belirlenir.

Şebekenin ok diyagramı ile oluşturulmasının ardından kritik yol yöntemi ile tüm aktivitelerin toplam bolluk ve serbest bolluk süreleri belirlenir. Bolluğu sıfır olan aktivitelerin oluşturduğu kritik hat dışında kalan hatlar üzerinde erteleme yapılacağı için şebekedeki tüm kritik olmayan hatlar belirlenir. Arama uzayının büyüklüğü aynı hat üzerinde yer alan birbirine seri aktiviteler ile paralel hatların kombinasyon sayılarının çarpılması ile hesaplanır.

2.1.1. Seri aktiviteler

Birbirine seri olan aktiviteler başlayınca biter türü ilişkinin tanımlanması ile oluşur. Öncel olan aktivitenin tamamlanması ile ardıl aktivite başlayabilir. Seri bağlı aktivitelere örnek Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1 - Seri bağlı aktivite örnekleri

Tek aktiviteden oluşan hat Şekil 1.a'da gösterilmiştir. Tek aktiviteli hattın olması durumunda aktivitenin n gün toplam bolluğu olduğunda aktivite 0 gün erteleme dâhil olmak üzere n güne kadar ertelenebilecek ve toplamda $n+1$ adet erteleme durumu gerçekleşebilecektir. Birbirine seri bağlı iki aktivitenin n gün toplam bolluklarının olması durumunda gerçekleşebilecek erteleme sayısı öncel aktivitenin gecikme süresi göz önüne alınarak hesaplanır (Şekil 1.b). A aktivitesi öncel aktivite olduğu için kendinden sonra başlayacak olan aktivitelerin ertelenme süreleri mutlaka A aktivitesinin ertelenmesine eşit veya daha fazla olmalıdır. Bu nedenle aktivite bolluklarının kaç farklı şekilde gerçekleşebileceğinin hesaplanması sırasında öncel aktivitelerin ertelenme süreleri dikkate alınmalıdır. Öncel aktivitenin sıfır gün ertelenmesi durumunda ardıl aktivite 0 günden n güne kadar toplam $n+1$ adet farklı biçimde ertelenebilir. Öncel aktivitenin 1 gün ertelenmesi durumunda ise ardıl aktivite 1 günden n güne toplam n adet farklı biçimde ertelenebilir. Bu şekilde birbirine seri bağlı iki aktiviteden üretilebilecek erteleme seçenekleri Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1 - Seri bağlı 2 aktivitenin ertelenme seçenekleri

A ertelenmesi	B ertelenme seçenek sayısı	B ertelenme seçenekleri
0	$n+1$	$0,1,\dots,n$
1	n	$1,2,\dots,n$
2	$n-1$	$2,3,\dots,n$
3	$n-2$	$3,4,\dots,n$
\vdots	\vdots	\vdots
$n-2$	3	$n-2,n-1,n$
$n-1$	2	$n-1,n$
n	1	n

Çizelge 1'in ikinci sütunundaki değerler toplandığında tüm erteleme seçeneklerinin toplam sayısı elde edilecektir. Toplam rakam, 1'den $n+1$ 'e kadar ardışık $n+1$ adet sayının toplamı olan $\frac{(n+1)(n+2)}{2}$ değerine eşit olacaktır.

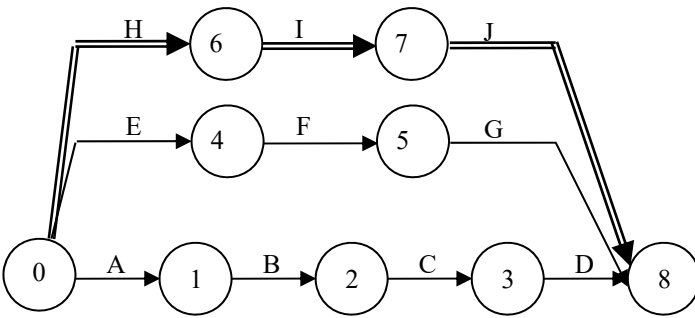
Birbirine seri bağlı aktivite sayısının 3 olması durumu Şekil 1.c'de gösterilmiştir. Aktivitelerin toplam bolluk süresi n gün olursa A aktivitesinin gecikmesi kademeli olarak 0 günden n güne arttırılırsa B ve C aktivitelerinin geciktirilmesi ile elde edilebilecek farklı iş programı sayısı EK-1'de gösterildiği gibi olacaktır. Seri bağlı 4 aktivite Şekil 1.d'de gösterilmiştir. İncelenen hattın n gün toplam bolluk süresine sahip olması durumu için A aktivitesinin gecikmesi kademeli olarak 0 günden n güne arttırıldığında B, C ve D aktivitelerinin geciktirilmesi ile elde edilebilecek farklı iş programı sayısı EK-2'de gösterildiği gibi olacaktır.

Seri hat üzerindeki aktivite sayısı arttıkça gerçekleştirilebilecek uygulanabilir erteleme sayısı sistematik bir şekilde artmaktadır. Birbirine seri bağlı m aktiviteden oluşan bir hat üzerinde toplam bolluğun n gün olduğu durumda şebekede tanımlanan bağımlılık ilişkilerini ihlal etmeden oluşturulabilecek erteleme sayısı Eşitlik 1'de genel haliyle ifade edilmiştir.

$$\frac{1}{m!} \prod_{i=1}^m (n+i) \quad (1)$$

2.1.2. Paralel Aktiviteler

Birbirine paralel olan aktivitelerin aynı anda yürütülmesinde şebeke kısıtları bir engel oluşturmaz. Bir aktivitenin başlayabilmesi için bir diğerinin tamamlanma zorunluluğu yoksa incelenen aktiviteler paralel olarak değerlendirilebilir. Şekil 2'de birbirine paralel olarak yürütülebilecek 3 hat gösterilmektedir.



Şekil 2 - Paralel hat örneği

Şekil 2'de gösterilen şebekede H-I-J, E-F-G ve A-B-C-D olmak üzere 3 paralel hat bulunmaktadır. H-I-J hattının kritik hat olduğu varsayılarak çift çizgi ile temsil edilmiştir. Kritik hattın bolluk süresi 0 olduğu için bu hattın tüm aktiviteleri 0 gün bollukla ertelenebilecektir. Bu nedenle H-I-J hattı kombinasyon hesaplamalarına dâhil edilmeyecek, kombinasyon hesabı kalan 2 hat üzerinden gerçekleştirilecektir. Birbirine paralel hatlar üzerinde bulunan E, F ve G aktiviteleri ile A, B, C ve D aktiviteleri birbirlerine seri bağlıdır. E-F-G hattı ile A-B-C-D hattının kaç farklı şekilde ertelenebilecekleri Eşitlik 1 kullanılarak hesaplanır. Hat1 (E-F-G) ile Hat2 (A-B-C-D) için hesaplanan erteleme seçenekleri birbirini etkilememektedir. Hat1 için tayin edilen ertelemeden bağımsız biçimde Hat2 için erteleme süresi tayin edilebilmektedir. Bu nedenle Hat1 ve Hat2 birlikte düşünüldüğünde elde edilebilecek farklı erteleme seçeneği sayısı Hat1 ve Hat2 için elde edilen erteleme seçeneklerinin çarpımına eşit olacaktır. Paralel hatlardan elde edilebilecek erteleme sayısı, hatların erteleme sayılarının çarpımlarına eşit olacaktır.

2.1.3. Seri ve Paralel Hatların Birlikte Olduğu Şebekeler

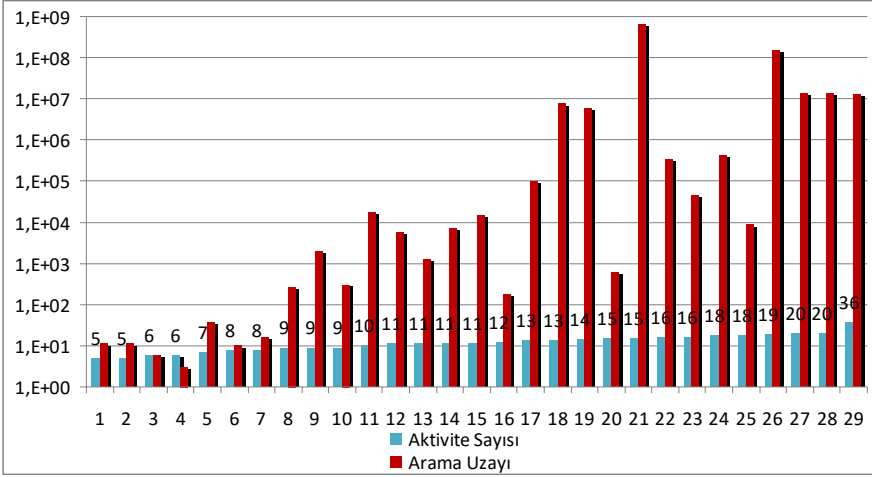
Aktiviteler arasındaki başlama ve tamamlama ilişkileri şebekede yer alan aktivite sayısı arttıkça karmaşılaşmaktadır. Bu durumda seri ve paralel hatlar iç içe geçeceği için erteleme sayısının hesaplanmasında sadece seri ve sadece paralel hatlar için geliştirilen hesaplama yöntemi yetersiz kalacaktır. Bu nedenle seri ve paralel hatların yer aldığı şebekede toplam bolluk ve serbest bolluk süreleri göz önüne alınarak şebeke analiz edilir.

Karmaşık şebekelerde erteleme sayısının hesaplaması için öncelikle şebekede yer alan hatların belirlenmesi gereklidir. Kritik hatlar göz ardı edilir ve sadece bolluğu olan hatlar incelenir. Hatların kendi aralarındaki karmaşıklık düzeyine göre öncel aktivitelerin erteleme süreleri seri ve paralel hatların erteleme sürelerini etkileyebilmektedir. Bu durumda öncel aktivitelere tayin edilen erteleme süreleri için ayrı çözüm yapılması ve elde edilen erteleme sürelerinin toplanarak tüm şebekenin ertelenme süresinin hesaplanması gerekecektir.

2.2. Paralel Hesaplamanın Yapılması

KDP'nin arama uzayı belirlendikten sonra tüm arama uzayının taranması ile en iyi çözüm elde edilecektir. Literatürden derlenen 29 örnek problem için KDP'nin arama uzayı büyüklükleri Şekil 3'te yarı logaritmik çubuk diyagram biçiminde gösterilmektedir [38].

Şekil 3'te mavi çubuklar problemdeki aktivite sayısını, kırmızı çubuklar ise aktiviteler arasındaki öncelik ilişkilerini ve proje süresini ihlal etmeden elde edilebilecek farklı iş programı sayısını belirtmektedir. Grafiğin y ekseninin logaritmik ölçekte olmasına rağmen aktivite sayısı artınca arama uzayı büyüklüğünün hızlı biçimde arttığı görülmektedir. Aktivite sayısı dışında, arama uzayı aktivitelerin bolluk süreleri ve şebekenin karmaşıklığına da bağlıdır. En büyük arama uzayına sahip projede arama uzayı büyüklüğünün 1 milyara yaklaştığı görülmektedir. Kesin çözümün elde edilebilmesi için tüm uygulanabilir çözümlerin denemesi, 1 milyara yakın şebeke analizinin yapılması gerekmektedir. Bu kadar çok sayıda analizin tek işlemciyle gerçekleştirilmesi çok uzun süreceği için şebeke analizleri paralel programlama ile küçük parçalara ayrılıp birden fazla işlemciye dağıtılarak hesaplama süresi kısaltılmıştır.

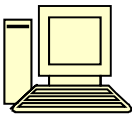


Şekil 3 - Aktivite sayısı arama uzayı arasındaki ilişki

Arama uzayının tamamının taranması paralelleştirmeye yatkın bir problem türüdür. Birbirine paralel olan hatlar üzerinden problem küçük parçalara ayrılabilirdiği için hesaplama sırasında işlemcilerin diğer hesaplamaların sonucunu beklemesine gerek kalmamaktadır. Bu sayede hesaplamalar kesintisiz biçimde yürütülebilmekte ve hesaplama süresinde önemli tasarruflar elde edilebilmektedir.

Tek bilgisayarda hesaplama

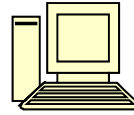
$p \cdot r$ adet
hesaplama



Optimum Çözüm

p adet bilgisayarda hesaplama

Bilgisayar 1



r adet hesaplama
Çözüm r_1

Bilgisayar 2



r adet hesaplama
Çözüm r_2

⋮

⋮

Bilgisayar p



r adet hesaplama
Çözüm r_p

Optimum Çözüm

Şekil 4 - Paralel hesaplama akış şeması

Şekil 2'de sunulan şebekede bolluğu olan 2 hat bulunmaktadır. Bu hatlar birbirinden bağımsız olduğu için Hat1 üzerinde tayin edilen erteleme süreleri Hat2'yi etkilememektedir. Hat1'in p adet, Hat2'nin ise r adet farklı erteleme seçeneğinin bulunduğu durumda Hat1 için tanımlanan i 'ninci ($i = 0, 1, \dots, p$) erteleme seçeneği tüm Hat2 erteleme kombinasyonları için i 'ninci bilgisayara (işlemciye) çözdürülerek problem p eşit parçaya bölünebilmektedir. Tüm işlemcilere Hat2 erteleme kombinasyonu sayısı kadar şebeke analizi yaptırılacağı için tek işlemciyle çözümden işlemci başına $p * r$ adet çözüm yapılacaktır, p adet bilgisayarda çözüm yaptırılarak her işlemciye r adet çözüm yaptırılarak daha kısa sürede çözüm elde edilecektir. Parallellendirme akış şeması Şekil 4'te gösterilmiştir. Şemada p eşit parçaya bölünebilecek bir hat olduğu varsayılarak paralellendirme yapılmıştır. Hattın p parçaya bölünememesi durumunda p 'den daha küçük olan ve eşit olarak parçalanabileceği en büyük sayıya bölünecek ve paralellendirme bölünen sayı üzerinden yapılacaktır.

2.3. Arama Uzayının Taranması

KDP'nin tüm arama uzayının taranması hesapçetveli uygulaması üzerinde çalışan bir makro ile gerçekleştirilmiştir. Problemin ardıl ilişkileri, aktivite süreleri ve kaynak talepleri kullanıcı tarafından hesapçetveli uygulamasına girilmektedir. Veri girişinin ardından aktivitelerin toplam ve serbest bolluk süreleri hesaplanmakta ve proje süresi belirlenmektedir. Başlangıç değeri olarak tüm aktivitelere 0 günlük erteleme süresi tayin edilmektedir. Aktivitelerin bolluk süresi sırayla arttırılacak şekilde döngüler oluşturulur. Atanan bolluk süresi dikkate alınarak tüm aktivitelerin başlangıç ve bitiş zamanları hesaplanıp kaynak talepleri dikkate alınarak proje süresince gerçekleşen günlük kaynak kullanım çizelgesi oluşturulur. Kaynak kullanım eğrisinin dalgalanması ve uygunluğu Eşitlik 2'de sunulan minimum moment (MM) olarak adlandırılan kaynak dağılım ölçüğü kullanılarak hesaplanmaktadır [8].

$$MM = \sum_{i=1}^S r_i^2 \quad (2)$$

Eşitlik 2'de S proje süresini, r_i i 'ninci günde ihtiyaç duyulan kaynak sayısını ifade etmektedir. Hesapçetveli üzerine yazılan makro ile bolluğu olan aktiviteler sistematik biçimde ertelenme süreleri 0'dan başlayarak toplam bolluk süresine kadar arttırılır. Her bolluk artışında şebekede tanımlı olan ardıl ilişkiler kontrol edilerek bu ilişkileri ihlal eden bir iş programının oluşturulması engellenir. Şebekede yer alan aktivitelerin başlangıç ve bitiş süreleri yeniden hesaplanıp kaynak kullanım eğrisi oluşturulur ve Eşitlik 2 kullanılarak kaynak dağılımının analizi yapılır. Elde edilen kaynak dağılım değeri o ana kadar elde edilen kaynak dağılım değerinden daha düşük ise dağılım değeri güncellenir ve en iyi çözüm olarak kaydedilir. Bu işlemler tüm arama uzayı taranana kadar tekrar edilir.

Eşitlik 2'de sunulan ve günlük kaynak talep değerlerinin karelerinin toplamını minimum yapmayı hedefleyen ölçek atalet momenti hesaplamasına benzetilmektedir. Alanın sabit olduğu durumda atalet momentinin en düşük olabilmesi kaynak kullanımının inşaat süresince her gün eşit miktarda olması ile gerçekleşir. Atalet momentinin teorik olarak en yüksek olduğu durum ise tüm işlerin bir günde gerçekleşmesi ile elde edilebilir. KDP'de projenin büyüklüğü ve karmaşıklığına bağlı olarak çok fazla yerel minimum noktası bulunabilir, hatta birden

fazla farklı iş programı en düşük moment değerini sunabilir. Bu durumda birbirinden farklı fakat birbirine denk çözümler elde edilmiş olur. Bu çalışmada problemin en iyi çözümü aranırken aktivitelerin erteleme süreleri sıfır günden başlayıp toplam bolluk süresine kadar ertelenmektedir. Arama yapılırken mevcut en iyi çözüme eş bir çözüm bulunursa mevcut çözüm güncellenmemektedir. Bunun nedeni denk çözümler arasından bolluğu olan aktivitelerin daha az ertelenmiş durumdaki hali ile oluşturulan iş programının seçilmesini sağlamak ve inşaat sırasında olası aksaklıklardan dolayı oluşabilecek süre uzamalarının proje süresinde en az gecikmeye yol açmasını sağlamaktır. Çünkü inşaat süresi boyunca dış etkenlerden dolayı ortaya çıkan çalışılmayan günler iş gecikmesinde önemli etkiye sahiptir [45].

Kaynak çeşidinin birden fazla olması durumunda problem çoklu kaynak dengeleme problemine dönüşmektedir. Bu durumda her kaynak çeşidi için günlük kaynak kullanım miktarlarının karelerinin toplamı hesaplanıp kaynak çeşidinin önemine göre bir ağırlıkla çarpılarak genel toplamı elde edilir. Belirtilen işlem Eşitlik 3'te tanımlanmıştır.

$$MM(\text{Çoklu kaynak}) = \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^k w_j r_{i,j}^2 \quad (3)$$

Eşitlik 3'te k , kaynak çeşidi sayısını, w_j ise j 'nci kaynak çeşidinin ağırlığını ifade etmektedir. Kaynak çeşitleri için tayin edilen ağırlıklar genellikle personel yevmiyesi veya kaynak iş makinesi ise günlük kira bedeli ile orantılı bir sayı olmaktadır. Kaynak maliyeti ne kadar fazla ise tayin edilen ağırlık da o kadar fazla olur. Bu sayede maliyeti yüksek kaynağa diğer kaynaklara göre daha fazla önem verilmiş olur. Çoklu kaynak dengeleme probleminin bir zorluğu bir kaynağı iyi bir şekilde dengelerken diğer kaynakların dağılımının önemli ölçüde bozulmasına neden olabilmesidir.

3. VAKA ANALİZLERİ

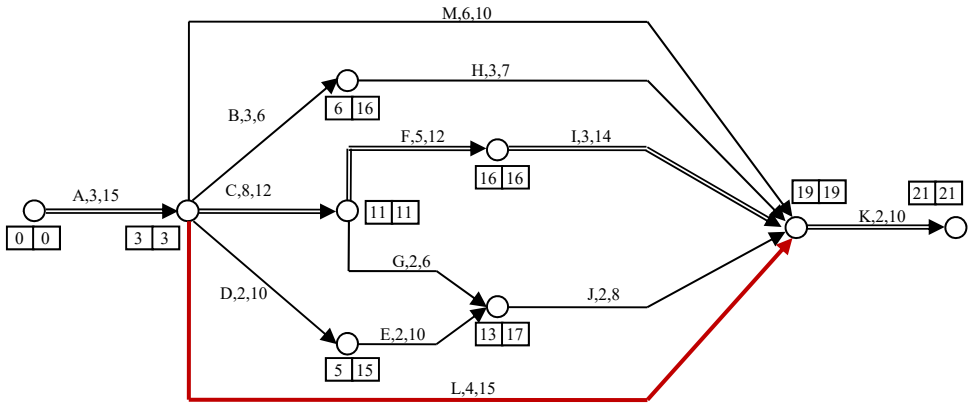
Bu çalışmada literatürden derlenen 3 proje ve yazarlar tarafından oluşturulan 2 katlı bir bina inşaatına ait 1 proje olmak üzere 4 orta büyüklükteki kaynak dengeleme probleminin optimum çözümü paralel programlama ile arama uzayının tamamı taranarak elde edilmiştir. Örnek problemlerin arama uzayı çok geniş olduğu için paralel programlama yapılarak hesaplama süresi düşürülmüştür. Hesaplamalar İnönü Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne ait bilgisayar laboratuvarında 3 GHz hızındaki Pentium D 925 model işlemciye sahip bilgisayarlar üzerinde yürütülmüştür. Geliştirilen yöntem hesapçetveli uygulaması üzerinde çalışan Visual Basic dilinde yazılan bir makro ile uygulanmıştır.

3.1. Problem 1

Örnek problem 1 Leu vd. (2000) tarafından oluşturulmuştur [14]. Şekil 5'te gösterildiği üzere proje 13 aktiviteden oluşmaktadır ve 5 aktivite kritiktir. Kritik hattın dışında şebekede birbirinden bağımsız 4 hat bulunmaktadır. Aktiviteler oklarla temsil edilmektedir. Okların üzerinde bulunan etiketteki ilk harf aktivite adını, ilk rakam aktivite süresini ve takip eden rakam aktivitenin yürütülmesi için gereken kaynak kullanımını belirtmektedir. Şebeke kritik

yol yöntemine göre çözümlenerek hesaplanan erken ve geç olay zamanları düğüm noktalarının üzerinde Şekil 5'te gösterildiği gibi belirtilmiştir.

Erken ve geç olay zamanları ile aktivite süreleri dikkate alınarak toplam bolluk ve serbest bolluk süreleri hesaplanır. Şebekede çift ok ile gösterilen A-C-F-I-K hattı kritik hat olduğu için bu hat üzerinde yer alan aktiviteler ertelenmediği için kritik hat arama uzayı hesabında yer alamaz. Arama uzayı M, B-H, J-D-E-G ve L hatlarının kaç farklı biçimde erteleneceği dikkate alınarak hesaplanır. M aktivitesinin toplam bolluk süresi 10 gündür. M aktivitesi için atanabilecek erteleme süreleri 0 gün ve 10 gün arasında olabileceği için toplam 11 farklı erteleme süresi tayin edilebilecektir. Benzer şekilde L aktivitesinin toplam bolluğu 12 gün olduğu için 13 farklı erteleme süresi tayin edilebilecektir.



Şekil 5 - Paralel programlama ile çözülen örnek problem-1 [14].

B-H hattı birbirine seri bağlı B ve H hatlarından oluşmaktadır. Bu hattın bolluk süresi 10 gündür. Hat üzerinde birbirine seri bağlı 2 aktivite olduğu için toplam farklı erteleme $\frac{(n+1)(n+2)}{2}$ adet olacaktır. Denklemde n yerine 10 girildiğinde 66 sonucu elde edilecektir.

J-D-E-G hattında aktivitelere atanabilecek erteleme süreleri G ve D-E dallarından dolayı tek formülle hesaplanamamaktadır. Bu nedenle oluşabilecek durumlar ayrı ayrı çözümlenerek uygulanabilir erteleme sayısı hesaplanacaktır. J aktivitesi hattın en sonunda yer aldığı için J aktivitesine atanan erteleme süresine göre çözüm yapılmıştır.

İlk durum analizinde 4 gün toplam bolluk süresine sahip olan J aktivitesinin ertelenme süresi 0 gün olarak tayin edilmiştir. Bu durumda G aktivitesinin ertelenme süresi 0 olmak zorundadır. Bununla birlikte D-E hattının 6 gün bolluğu vardır. İki aktiviteli bir hat olduğu için $n=6$, $m=2$ olacak ve $7*8/2 = 28$ adet birbirinden farklı erteleme seçeneği oluşacaktır.

İkinci durumda J aktivitesinin ertelenme süresinin 1 gün olarak tayin edilmesi incelenmiştir. Bu durumda G aktivitesinin ertelenmesi 0 veya 1 gün olabilirken D-E hattının bolluğu 7 gün olacaktır. D-E hattı üzerinde $n=7$, $m=2$ değerlerini alacak ve $8*9/2 = 36$ adet farklı erteleme oluşacaktır. G aktivitesi 0 ve 1 olmak üzere 2 farklı biçimde ertelenebilecektir. D-E ve G

üzerinde yapılan ertelemeler birbirinden bağımsız oldukları için J aktivitesinin 1 gün ertelendiği durum için $36*2 = 72$ farklı erteleme durumu oluşur.

Üçüncü durumda J aktivitesinin 2 gün ertelenmesi incelenmiştir. G aktivitesi için tayin edilebilecek erteleme süreleri 0, 1 ve 2 gün olurken D-E hattının bolluğu 8 gün olmuştur. İncelenen durum için birbirinden farklı erteleme sayısı $3*9*10/2 = 135$ olacaktır. J aktivitesinin ertelenmesi 1 gün artınca D-E ve G için tayin edilebilecek erteleme süreleri de 1 gün artmaktadır. J aktivitesinin 3 gün ertelenmesi durumunda oluşacak birbirinden farklı erteleme sayısı $4*10*11/2 = 220$, J aktivitesinin 4 gün ertelenmesi durumunda $5*11*12/2 = 330$ olacaktır. İncelenen tüm durumların toplamı $28+72+135+220+330 = 785$ yapmaktadır. Bu rakam D-E-G-J hattında birbirinden farklı ve şebeke kurallarını ihlal etmeyen kaç farklı erteleme yapılabileceğine eşittir.

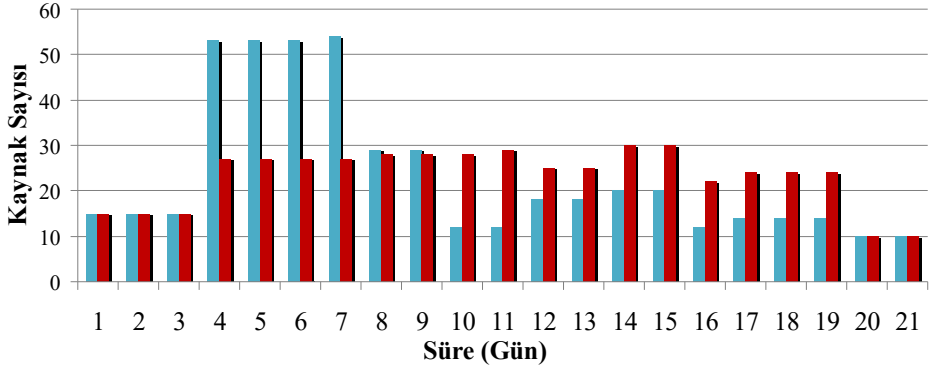
Çizelge 2 - Problem-1 için farklı erteleme sayısı hesaplaması

Hat	Ertelenme Sayısı
B-H	66
J-D-E-G	785
L	13
M	11
Arama Uzayı Büyüklüğü = $66*785*13*11 = 7.408.830$	

Projedeki birbirinden bağımsız kritik olmayan hatlar ve gerçekleştirilebilecek erteleme sayısı Çizelge 2'de gösterilmiştir. Hatlar birbirinden bağımsız olduğu için erteleme sayısı tüm hatların ertelenme sayılarının çarpımına eşit olacaktır. Örnek problem 1 için 7.408.830 adet birbirinden farklı erteleme yapılabileceği hesaplanmıştır. Bu proje için kaynak dengeleme probleminin en iyi çözümünü tüm arama uzayını tarayarak kesin olarak elde edebilmek için 7.408.830 adet iş programının çözülmesi gerekmektedir.

Bu kadar geniş bir arama uzayının tek işlemci ile çözülmesi çok zaman alacağı için problem parçalara ayrılarak çözülmüştür. L aktivitesi üzerinden 13 adet farklı erteleme gerçekleştirilebildiği için arama uzayının taranması L aktivitesi üzerinden 13 eşit parçaya bölünebilmektedir. Birinci parça L aktivitesine 0 gün, ikinci parça L aktivitesine 1 gün ve diğer parçalar içinde aynı kural uygulanarak son parça olan on üçüncü parça için L aktivitesinin sadece 12 gün ertelendiği durum çözdürülür. Diğer hatların tüm ertelemeleri çözdürüldüğünde 1 bilgisayarın çözmesi gereken iş programı sayısı $66*785*11 = 569.910$ olacaktır. Şekil 5'te paralelleştirmenin yapıldığı hat kırmızı ile işaretlenmiştir. Tek işlemci ile 15337 saniye süren çözüm, 13 bilgisayarda en uzununu 1195 saniyede elde edilmiştir. Hesaplama süresi yaklaşık 4 saat kısaltılarak 20 dakikada optimum çözüme garantili biçimde ulaşıldı. Maksimum günlük kaynak talebi 54'ten 30'a düşürülmüştür. Elde edilen kaynak dağılım grafiği Şekil 6'da sunulmuştur.

Problem1 Kaynak Histogramı



Şekil 6 - Problem 1'in başlangıç ve dengelenmiş kaynak kullanım grafiği

Çizelge 3 - Problem 1 için başlangıç ve optimum çözümlerin karşılaştırılması

Aktivite	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk	Erken Başlangıç Zamanında Başlanırsa aktivitelerin başlama-bitiş zamanları			Optimizasyon sonrası aktivitelerin başlama-bitiş zamanları		
			Gecikme	Başlama	Bitiş	Gecikme	Başlama	Bitiş
A	0	0	0	0	3	0	0	3
B	0	10	0	3	6	4	7	10
C	0	0	0	3	11	0	3	11
D	0	10	0	3	5	4	7	9
E	6	10	0	5	7	4	9	11
F	0	0	0	11	16	0	11	16
G	0	4	0	11	13	0	11	13
H	10	10	0	6	9	4	10	13
I	0	0	0	16	19	0	16	19
J	4	4	0	13	15	0	13	15
K	0	0	0	19	21	0	19	21
L	12	12	0	3	7	0	3	7
M	10	10	0	3	9	10	13	19

Şekil 6'da mavi çubuklar tüm aktivitelerin erken başlangıç zamanında başlatılması ile elde edilen günlük kaynak kullanım grafiğini vermektedir. Kırmızı çubuklar ise optimizasyon sonrası elde edilen en iyi iş programıdır. Karşılaştırmanın daha kolay yapılabilmesi için başlangıç durumu ile en iyi çözüm aynı grafikte verilmiştir. Başlangıç durumu elde edilirken tüm aktivitelere erteleme süresi olarak 0 gün girilmiştir. Başlangıç koşulu olarak erken başlangıç zamanlarının alınma nedeni kritik yol yöntemi ile yapılan ilk çözümde tüm aktivitelere sıfır gün erteleme süresi tayin edilmesidir. Denklem 2'de verilen kaynak dağılım ölçeğinin en düşük değeri optimize edilmiş kaynak kullanım grafiği ile elde edilir. Grafiğin x eksenini gün biriminden zamanı, y eksenini ise günlük kullanılan kaynak miktarını belirtmektedir. Problem 1, 13 bilgisayarda 1195 saniyede çözülmüştür.

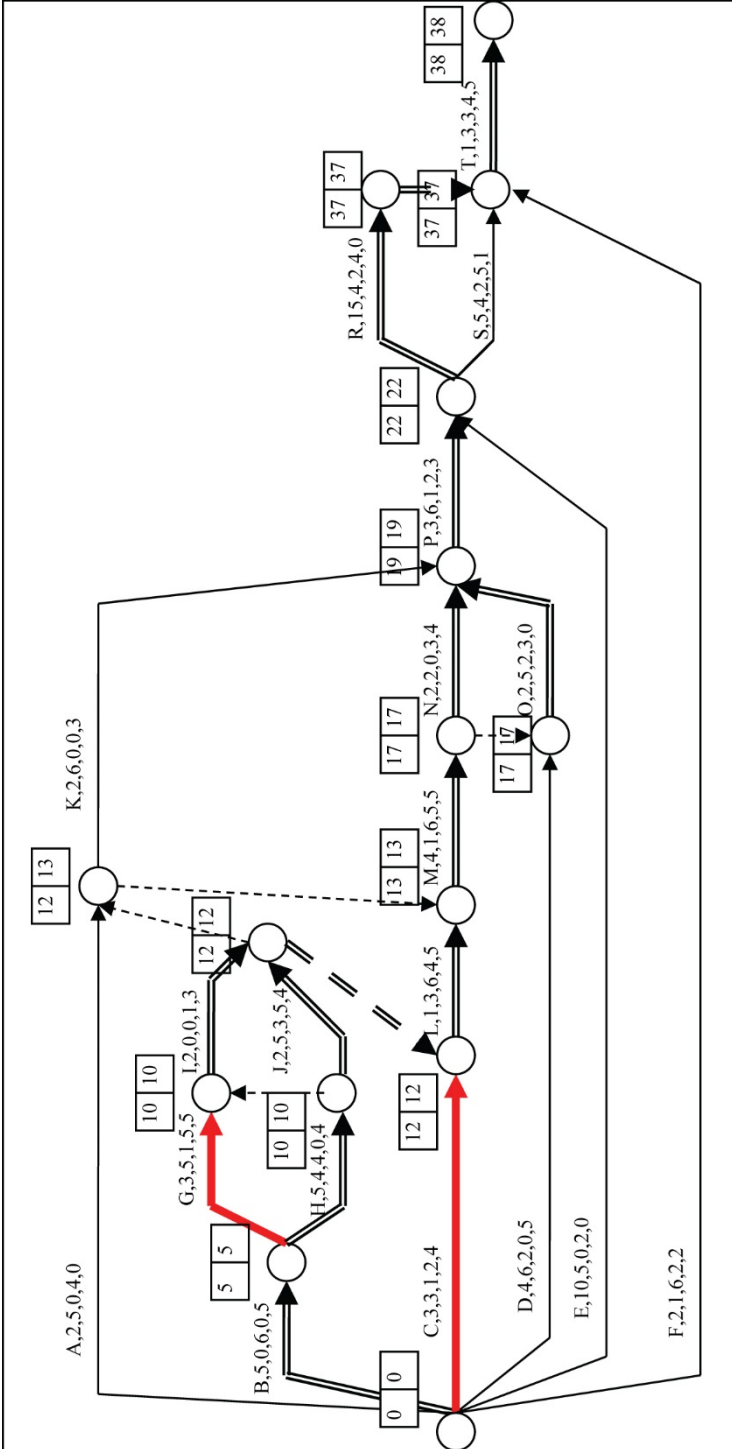
3.2. Problem 2

Literatürden elde edilen ikinci problem Stevens (1990) tarafından oluşturulmuştur [46]. Problem, 11'i kritik olmak üzere 19 aktiviteden oluşmaktadır. Problemin orijinal halinde aktivitelerin yürütülmesi için tek kaynak cinsi gereklidir. Bu problem Mutlu (2010) tarafından revize edilerek aktivitelerin gerçekleştirilebilmesi için her aktiviteye 4 farklı kaynak tayin ederek problemi çok-kaynaklı kaynak dengeleme problemine çevirmiştir [47]. Problemin şebeke diyagramı Şekil 7'de verilmiştir. Aktiviteler üzerinde yer alan etikette ilk harf aktivite adını, harfin ardından gelen ilk rakam gün biriminde aktivite süresini ve bu rakamı takip eden 4 rakam ise aktivitenin yürütülmesi için tayin edilmesi gereken kaynak miktarlarını belirtmektedir. Süreden sonra gelen ilk rakam ihtiyaç duyulan birinci kaynak miktarını, dördüncü rakam ise ihtiyaç duyulan dördüncü kaynak miktarını belirtmektedir.

A aktivitesinin 10 gün serbest, 11 gün toplam bolluğu bulunmaktadır. K aktivitesinin ise bolluk süresi A aktivitesi 10 güne kadar ertelendiğinde 5 gün, 11 gün ertelendiğinde ise 4 gündür. Sıfır günlük erteleme dikkate alındığında A aktivitesinin 10 güne kadar ertelenmesinde $11 \times 6 = 66$ farklı erteleme seçeneği ortaya çıkacaktır. A aktivitesinin 11 gün ertelendiği durumda ise oluşan 5 farklı erteleme eklendiğinde A-K hattı toplam 71 farklı erteleme seçeneğine sahip olur.

E aktivitesinin 12 gün bolluğu bulunmaktadır bu nedenle 13 farklı biçimde ertelenebilir. S aktivitesi 10 gün bolluğa, 11 farklı erteleme seçeneğine sahiptir. E ve S aktivitelerinin ertelemeleri birbirinden bağımsız olduğu için E-S hattı 143 farklı biçimde ertelenebilecektir. G, C, D ve F hatlarının ertelenme sayıları ise bolluk sürelerinin bir fazlasına eşit olacaktır. Projeyi oluşturan hatların erteleme sayıları Çizelge 4'te verilmiştir.

Problemin tüm arama uzayı taranarak tam çözümünün elde edilebilmesi için 153 milyondan daha fazla iş programının çözülmesi gerekmektedir. Hesaplama süresini kısaltmak için paralel hesaplama ile problem alt parçalara ayrılıp farklı bilgisayarlarda daha kısa sürede çözülmesi yoluna gidildi. Problem G hattı üzerinden parçalanırsa 3 parçaya, C hattı üzerinden parçalanırsa 10 parçaya ayrılabilir. Benzer şekilde D aktivitesi üzerinden 14 parçaya ayrılabilir. Bu şekilde yapılacak parçalamalar problemin yeterli kadar küçük parçaya ayrılmasını sağlamayacaktır. A-K hattı üzerinden yapılacak parçalama ise mevcut bilgisayar sayısından daha fazla olduğu için parçalama aşırı fazla sayıda olacaktır. En verimli biçimde parçalama yapabilmek için Şekil 7'de gösterildiği üzere G ve C hatları birleştirilerek problem 30 eşit parçaya ayrılmıştır.



Şekil 7 - Örnek problem 2 şebeke diyagramı [46, 47]

Çizelge 4 - Problem-2 için farklı ertelenme sayısı hesaplaması

Hat	Ertelenme Sayısı
A-K	71
E-S	143
G	3
C	10
D	14
F	36
Arama uzayı büyüklüğü: $71*143*3*10*14*36 = 153.513.360$	

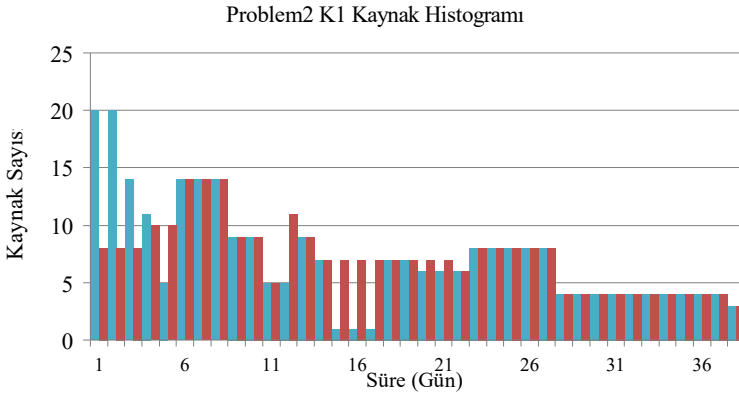
Çizelge 5 - Problem 2 için başlangıç ve optimum çözümlerin karşılaştırılması

Aktivite	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk	Erken başlangıç zamanı aktivitelerin başlama-bitiş zamanları			Optimizasyon sonrası aktivitelerin başlama-bitiş zamanları		
			Gecikme	Başlama	Bitiş	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk	Gecikme
A	0	11	0	0	2	3	3	5
B	0	0	0	0	5	0	0	5
C	9	9	0	0	3	0	0	3
D	13	13	0	0	4	11	11	15
E	12	12	0	0	10	0	0	10
F	35	35	0	0	2	19	19	21
G	2	2	0	5	8	0	5	8
H	0	0	0	5	10	0	5	10
I	0	0	0	10	12	0	10	12
J	0	0	0	10	12	0	10	12
K	5	5	0	12	14	3	15	17
L	0	0	0	12	13	0	12	13
M	0	0	0	13	17	0	13	17
N	0	0	0	17	19	0	17	19
O	0	0	0	17	19	0	17	19
P	0	0	0	19	22	0	19	22
R	0	0	0	22	37	0	22	37
S	10	10	0	22	27	0	22	27
T	0	0	0	37	38	0	37	38

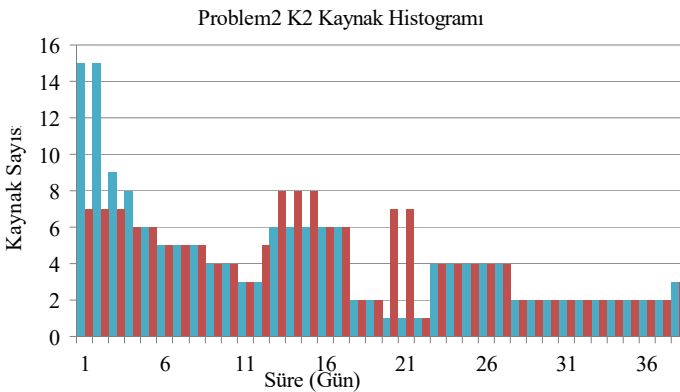
Parçalanmanın G ve C aktiviteleri üzerinden yapılabilmesi için C aktivitesinin ertelenmesi 0 gün iken G aktivitesinin 0, 1 ve 2 gün ertelemeleri sırası ile 1, 2 ve 3 numaralı bilgisayarlara çözdürülür. C aktivitesinin ertelenmesi 1 gün olarak sabit tutulduğu durum için G aktivitesinin 0, 1 ve 2 gün ertelemeleri sırası ile 4, 5 ve 6 numaralı bilgisayarlara çözdürülür. Bu şekilde paylaşırma yapıldığında C aktivitesinin ertelenmesi 9 gün olduğunda C aktivitesinin 0, 1 ve 2 gün olan ertelemeleri sırası ile 28, 29 ve 30 numaralı bilgisayarlara

çözdürülür. Böylece problem her bilgisayara 5.117.112 iş programı çözümü düşecek şekilde 30 eşit parçaya ayrıldı. Hesaplamalar 30 bilgisayarda paralel bir şekilde yürütüldü ve 3 saatlik (10387 saniye) hesaplama sonrasında çözüm elde edildi. Aktivitelerin başlangıç ve optimizasyon sonrası başlama ve bitiş süreleri Çizelge 5'te sunulmaktadır.

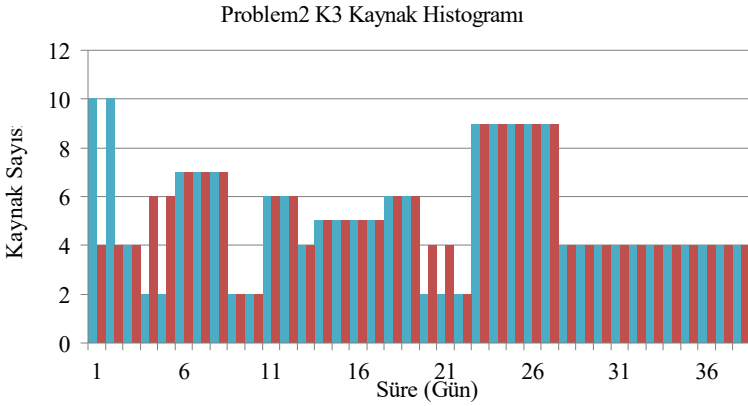
Çok kaynaklı kaynak dengeleme probleminin çözümünde eşitlik 3'te yer alan j indisi 1'den 4'e kadar saydırılarak amaç fonksiyonu tüm kaynak türleri için uygulanmış ve elde edilen değerlerin toplamının en düşüğü aranmıştır. Tüm kaynakların ağırlığı 1 alınmıştır. Kaynağın temin zorluğu veya temin maliyeti dikkate alınarak farklı ağırlıklar verilerek de problem çözülebilir. Elde edilen iş programı sonucu oluşan 4 farklı kaynağın günlük kullanım değerleri 1, 2, 3 ve 4 numaralı kaynaklar için sırası ile Şekil 8.a, 8.b, 8.c ve 8.d'de gösterilmiştir. Şekil 8'de mavi çubuklar tüm aktivitelerin 0 gün ertelendiği durumdaki iş programına göre, kırmızı çubuklar ise en iyi çözüme göre oluşan kaynak kullanım değerlerini vermektedir. Maksimum günlük kaynak talebi K1 kaynağı için 20'den 14'e, K2 kaynağı için 15'den 8'e, K3 kaynağı için 10'dan 9'a ve K4 kaynağı için 16'dan 12'ye düşürülmüştür.



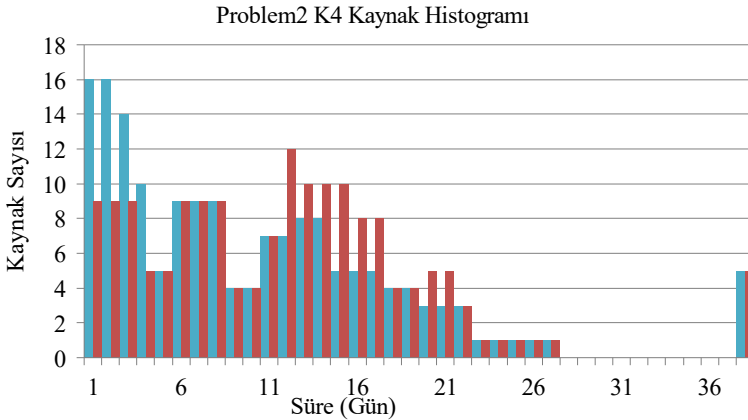
Şekil 8a - Örnek problem 2 Kaynak1 başlangıç ve dengelenmiş kaynak kullanım grafiği



Şekil 8b - Örnek problem 2 Kaynak2 başlangıç ve dengelenmiş kaynak kullanım grafiği



Şekil 8c - Örnek problem 2 Kaynak3 başlangıç ve dengelenmiş kaynak kullanım grafiği



Şekil 8d - Örnek problem 2 Kaynak4 başlangıç ve dengelenmiş kaynak kullanım grafiği

3.3. Problem 3

Örnek problem 3 Stevens (1990) tarafından tek kaynaklı olarak üretilmiştir [46]. Bu problem Mutlu (2010) tarafından dört kaynaklı olacak şekilde revize edilmiştir [47]. Bu çalışmada problemin daha zor olması ve daha güncel hali olduğu için dört kaynaklı hali kullanılmıştır. Problemin şebeke diyagramı Şekil 9'da gösterilmektedir.

Şekil 9'da okların üzerindeki etiketin ilk harfi aktivite adını, harften sonra gelen ilk sayı aktivite süresini ve sonraki sayılar sırası ile kaynak 1'den kaynak 4'e kadar aktivitenin yürütülmesi sırasında görevlendirilmesi gereken kaynak miktarını belirtmektedir. Kaynaklar için 1 numaralı kaynaktan 4 numaralı kaynağa kadar sırası ile K1, K2, K3 ve K4 olarak kısaltmalar kullanılmıştır. Arama uzayının büyüklüğünün hesaplanabilmesi için birbirlerinin ertelenme sürelerinden etkilenen aktivitelerin belirlenmesi gereklidir. Şebeke diyagramı ve

ertelenebilmektedir. J aktivitesinin 0 gün ertelenmesi ile oluşabilecek birbirinden farklı erteleme sayısı tablonun beşinci sütununun ilk satırında gösterilmiştir. Hesaplamalar J aktivitesinin 1 ve 2 gün ertelenmesi için tekrar edildiğinde Çizelge 7'nin 2 ve 3. satırlarında belirtilen değerler elde edilir. J aktivitesinin ertelendiği her gün için M, D ve K aktiviteleri 1 gün daha uzun süre ertelenebilmektedir. Çizelgenin 5. sütununda belirtilen değerler toplandığında 6734 değeri elde edilir.

Çizelge 6 - O-G-C-F hattının için farklı erteleme sayısı hesaplaması

O ertelenme	G ertelenme	C ertelenme	F ertelenme	Ertelenme Sayısı
0	0	0	$0 \leq F \leq 12$	13
1	0	0	$0 \leq F \leq 13$	14
	0	1	$0 \leq F \leq 13$	14
	1	1	$0 \leq F \leq 13$	14
	2	1	$0 \leq F \leq 13$	14
2	0	0	$0 \leq F \leq 14$	15
	0	1	$0 \leq F \leq 14$	15
	1	1	$0 \leq F \leq 14$	15
	0	2	$0 \leq F \leq 14$	15
	1	2	$0 \leq F \leq 14$	15
	2	2	$0 \leq F \leq 14$	15

Çizelge 7 - J-M-D-K hattı için farklı erteleme sayısı hesaplaması

J erteleme	M erteleme	D erteleme	K erteleme	Ertelenme Sayısı
0	$0 \leq M \leq 6$	$0 \leq D \leq 18$	$0 \leq K \leq 14$	$7*19*15 = 1995$
1	$0 \leq M \leq 6$	$0 \leq D \leq 19$	$0 \leq K \leq 15$	$8 * 20 * 16 = 2240$
2	$0 \leq M \leq 6$	$0 \leq D \leq 20$	$0 \leq K \leq 16$	$9*21*17 = 2499$

N-H hattının ertelenme sayısının hesaplanması N aktivitesinin ertelenme süresine bağlıdır. N aktivitesi 0 gün ile 6 gün arasında ertelendiğinde H aktivitesi 0 gün ile 7 gün arasında ertelenebilir. Bu durumda N aktivitesi 7, H aktivitesi ise 8 farklı biçimde ertelenebileceği için iki aktiviteden $7*8 = 56$ farklı biçimde ertelenebilir. N aktivitesinin 7 gün ve daha uzun süre ertelendiği her gün için H aktivitesinin ertelenebileceği gün sayısı 1 gün azalmaktadır. N aktivitesi 7 gün ertelendiğinde H aktivitesinin 7 farklı ertelenme seçeneği bulunurken N aktivitesinin ertelenme süresi 13 gün olduğunda H aktivitesinin ertelenme seçeneği sadece 13 gün olan 1'e düşmektedir. N-H aktivitelerinin 7-13 gün arası farklı ertelenme seçeneği $7*8/2 = 28$, tüm farklı ertelenme seçeneği toplam $56 + 28 = 84$ olacaktır.

Projede kritik hat dışında 4 ayrı kritik olmayan hat bulunmaktadır. Bu hatlar birbirinden bağımsızdır. Bir hattın ertelenme süresi diğer hatların ertelenme süresini etkilemediği için tüm şebekenin toplam ertelenebilirlik sayısı Çizelge 8'de verilen hatların erteleme kombinasyon sayılarının çarpımına eşittir.

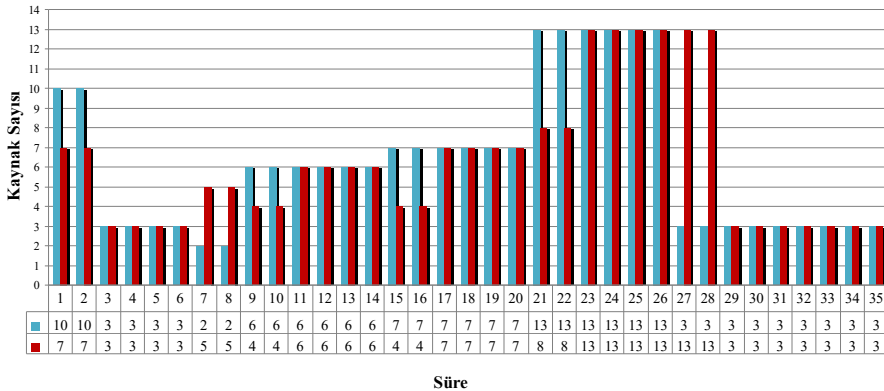
Çizelge 8 - Örnek proje 3'ün erteleme kombinasyon sayısı

Hat	Ertelme Sayısı
O-G-C-F	145
J-M-D-K	6734
N-H	84
B	7
Toplam	$145 * 6734 * 84 * 7 = 574.140.840$

Örnek problem 3'ün arama uzayı büyüklüğü 574.140.840 adet uygulanabilir iş programı olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada önerilen yöntem tüm arama uzayının tamamının taranması ile en iyi çözümün elde edilmesini sağlamaktadır. Hesaplanan arama uzayının tek işlemci veya bilgisayar ile taranması çok uzun sürede gerçekleştirilebileceği için yöntemin uygulanması pratik olmayacaktır. Çizelge 8'de verilen hatlar üzerinden problem daha küçük parçalara ayrılabilir ve her parça farklı bir bilgisayar veya işlemci üzerinde çözdürülebilir. Bu sayede hesaplama süresi önemli ölçüde kısaltılabilecektir. Problemin parçalara ayrılması B hattı üzerinden yapılırsa problem toplam 7 eşit parçaya ayrılacak ve B aktivitesinin ertelenme süresi her parça için 0 ile 6 arasında sabit tutularak O-G-C-F, J-M-D-K ve N-H hatlarından oluşacak erteleme kombinasyonları çözülecektir. Bu şekilde her parça $145 * 6734 * 84 = 82.020.120$ iş programı hesaplamasından oluşacaktır. Bu parçalama çözüm süresini kısaltmakla birlikte problem daha küçük parçalara ayrılabilirliği için tercih edilmemiştir.

Paralel hesaplama için kullanılabilir 35 bilgisayar bulunmaktadır. Fakat Çizelge 8'de belirtilen hatlar (B hariç) bu rakamdan yüksektir. Parça sayısının eldeki bilgisayar sayısına yakın olması için hattın içindeki ertelenmeler kümelenecek parçalandı. N-H hattı 84 farklı ertelenmeye sahiptir bu hattın 35'den küçük fakat 35'e en yakın parçalanabilme sayısı 28'dir. N-H hattındaki ertelenme kombinasyonları 3'erli biçimde kümelenecek diğer hatlarla birlikte çözümlerse problem 28 eşit parçaya bölünmüş olacaktır.

Problem 3 K1 Histogramı



Şekil 10a - Örnek problem 3 Kaynaklı başlangıç ve dengelenmiş kaynak kullanım grafiği

Mevcut bilgisayar sayısına en yakın olacak şekilde problem $145 * 6734 * 3 * 7 = 20.505.030$ hesaplama olmadan oluşan parçalara ayrılacaktır. Hesaplamalar 28 bilgisayarda 7,7 saatte (27735 saniye) tamamlanmıştır. Hesaplama sonucu elde edilen en iyi kaynak kullanımı ile başlangıç değerleri K1, K2, K3 ve K4 için sırası ile Şekil 10a, 10b, 10c ve 10d'de verilmiştir.

Bilgisayarlar aynı model olsa dahi problemi aynı hızda çözememekte, çözüm süresi rastgelelik göstermektedir. Çözüm en yavaş olan bilgisayarın hesaplamasını tamamlamasının ardından elde edileceği için çözüm süresi en yavaş bilgisayarın hesaplama süresine eşit olacaktır. Bu nedenle parçalama sonrası elde edilen süre tasarrufu tek işlemci kullanılarak çözümlenmesine göre doğrusal biçimde azalmamaktadır. Şekil 10'da sunulan 4 farklı kaynağın başlangıç durumu ve optimize edilmiş durumları göz önüne alındığında önemli ölçüde iyileştirmenin elde edildiği görülecektir. Maksimum günlük kaynak talebi K1 için 13 olarak sabit kalmış, K2 için 30'dan 14'e, K3 için 24'ten 11'e, K4 için 24'ten 10'a düşürülmüştür. Ayrıca proje süresince kaynak kullanımındaki iniş çıkışların azaldığı görülmektedir. Bu sayede proje boyunca atıl durumda kalan kaynak miktarında önemli azalmalar sağlanmıştır.

Çizelge 9 - Problem 3 için başlangıç ve optimum çözümlerin karşılaştırılması

Aktivite	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk	Başlangıç durumunda aktivite başlama-bitiş zamanları			Optimizasyon sonrası aktivite başlama-bitiş zamanları		
			Erteleme	Başlama	Bitiş	Erteleme	Başlama	Bitiş
A	0	0	0	20	28	0	20	28
B	6	6	0	0	2	0	0	2
C	0	2	0	6	14	0	6	14
D	18	20	0	0	2	0	0	2
E	0	0	0	28	35	0	28	35
F	12	14	0	0	2	14	14	16
G	0	2	0	0	6	2	2	8
H	7	7	0	8	13	0	8	13
I	0	0	0	8	20	0	8	20
J	2	2	0	20	26	2	22	28
K	14	16	0	0	6	16	16	22
L	0	0	0	0	8	0	0	8
M	0	6	0	8	14	2	10	16
N	6	13	0	0	2	8	8	10
O	2	2	0	14	26	2	16	28

3.4 Problem 4

Literatürden alınan örnek problemlerin genel yapısı birbirine paralel ilerleyebilen çok sayıda hattan oluşmalarıdır. Bu durum problemin çözümünü zorlaştırmakta ve optimizasyon yöntemlerinin daha iyi test edilmesini sağlamaktadır. Şekil 3'te gösterildiği gibi orta boy

problemlerde dahi arama uzayı 1 milyara yaklaşmaktadır. Fakat inşaat projelerinde paralel olarak yürütülebilecek aktivite sayısı örnek problemlerdeki kadar çok fazla değildir. Bu nedenle hipotetik projelerin çözümüne ek olarak 2 katlı bir inşaat projesi üzerinde kaynak dengeleme problemi çözülerek algoritmanın başarısı denetlenmiştir. Örnek problemin şebekesi Şekil 11'de, aktivitelerin tanımı ise Çizelge 11'de gösterilmiştir. Örnek problem 4'ün arama uzayı F, K-L-J, AG-AF-AH ve W-AB-AD-T-V-Z hatlarının kombinasyonundan oluşmaktadır. Bu hatların arama uzayı örnek projelerde gösterildiği gibi gerçekleştirilmektedir. Hatların erteleme sayıları Çizelge 10'da verilmiştir.

Çizelge 10 - Örnek Proje 4 arama uzayı hesaplaması

Hat	Erteleme Sayısı
K-L-J	84
F	7
AF-AG-AH	816
T-V-Z-W-AB-AD	10307
Arama Uzayı	4.945.381.056

Çizelge 11 - Örnek problem 4 (2 katlı inşaat)

İş Kalemi	Gösterim	Kaynak	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
Tesviye	A	2	0	0
Yerleşim	B	5	0	0
Temel Kazısı	C	3	0	0
Grobeton	D	3	0	0
Su Yalıtımı ve Yalıtım Betonu	E	7	0	0
Mekanik Ve Tesisat Bağlama	F	4	6	6
Kalıp-Donatı (Temel)	G	10	0	0
Beton Dökümü (Temel)	H	6	0	0
Kür (Temel)	I	1	0	0
Yağmur Drenajı	J	5	0	6
Atık Su Hattı Bağlama	K	5	0	6
Geri Dolgu	L	4	6	6
Kalıp-Donatı (Zemin)	M	10	0	0
Beton Dökümü (Zemin)	N	6	0	0
Kür (Zemin)	O	1	0	0
Kalıp-Donatı (Kat 1)	P	10	0	0
Beton Dökümü (Kat 1)	R	6	0	0
Kür (Kat 1)	S	1	0	0
Duvar (Zemin)	T	8	0	5
Duvar (Kat 1)	U	8	0	0
Tesisat (Zemin)	V	5	0	7
Tesisat (Kat 1)	Y	5	0	0

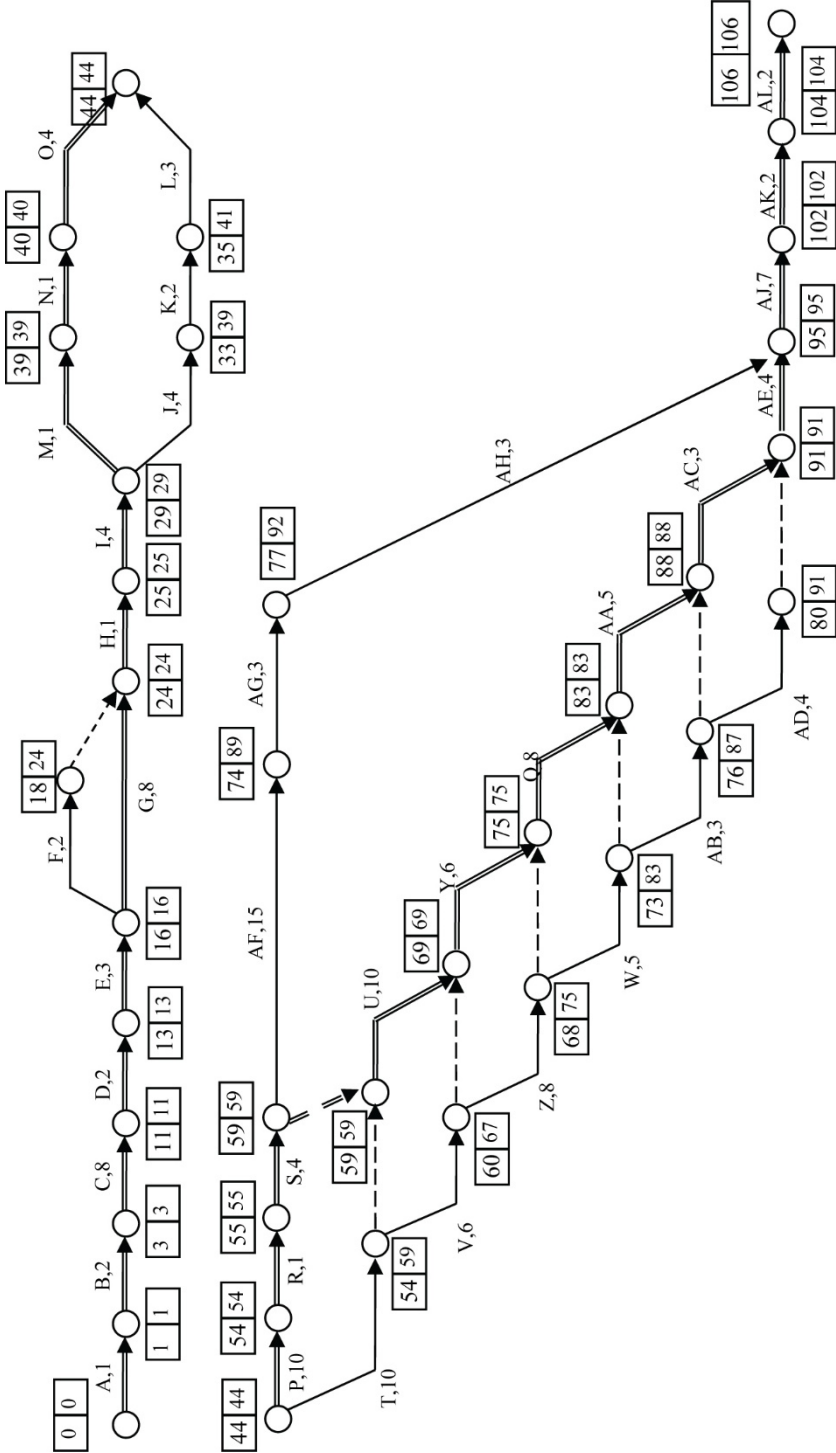
Çizelge 11 - Örnek problem 4 (2 katlı inşaat) (devam)

İş Kalemi	Gösterim	Kaynak	Serbest Bolluk	Toplam Bolluk
Sıva (Zemin)	Z	7	0	7
Sıva (Kat 1)	Q	7	0	0
Doğrama (Zemin)	W	4	0	10
Doğrama (Kat 1)	AA	4	0	0
Parke-Fayans (Zemin)	AB	5	0	11
Parke-Fayans (Kat 1)	AC	5	0	0
Boya (Zemin)	AD	4	11	11
Boya (Kat 1)	AE	4	0	0
Çatı	AF	9	0	15
Çatı İzolasyonu	AG	4	0	15
Yağmur Olukları	AH	3	15	15
Çevre Düzenleme	AJ	5	0	0
Kontrol ve Testler	AK	2	0	0
Temizlik	AL	5	0	0

Şebekeyi oluşturan kritik olmayan 4 hattın erteleme sayılarının çarpımı 5 milyara yakın bir arama uzayı büyüklüğünü ortaya çıkarmaktadır (Çizelge 10). Fakat Şekil 11'de sunulan şebeke diyagramı incelendiğinde F ve K-L-J hatlarının diğer hatlarla hiçbir şekilde etkileşim halinde olmadıkları görülmektedir. Bu nedenle belirtilen 2 hattın tek başına en iyi çözümü verdiği erteleme seçeneklerinin hesaplanıp diğer hatlar olan AF-AG-AH ile T-V-Z-W-AB-AD hatlarının erteleme seçenek sayılarına eklenmesi ile arama uzayının büyüklüğü hesaplanacaktır. Bu şekilde örnek problem 4'ün arama uzayı $816 * 10307 + 7 + 84 = 8.410.603$ erteleme seçeneğinden oluşmaktadır.

Belirtilen arama uzayı tek bilgisayarda çözdürülebileceği gibi paralel hesaplama ile çok sayıda küçük parçaya ayrılıp eş zamanlı biçimde farklı bilgisayarlarda da çözdürülebilir. Çözüm süresi tek bilgisayarda 7,1 saat olarak ölçülmüştür. Parallelleşme AF-AG-AH ve T-V-Z-W-AB-AD hatları üzerinden yapılabilmektedir. Üç aktiviteden oluştuğu için paralelleştirmesi daha kolay olan AF-AG-AH hattı tercih edilmiştir. Çizelge 10'da belirtildiği üzere bu hattın 816 erteleme seçeneği bulunmaktadır. Erteleme seçeneği 16'ya bölünebilmektedir böylece bu hat üzerinden her bilgisayara hattın 51 erteleme seçeneği çözdürülmek üzere 16 bilgisayara arama uzayı eşit biçimde taratılabilir. Arama uzayını 16 eşit parçaya ayırarak tarayan visual basic kodu Şekil 12'de gösterilmiştir. Optimizasyon öncesi ve sonrası aktivitelerin başlama ve bitiş zamanları çizelge 12'de sunulmuştur.

Şekil 12'de sunulan örnek kodlamada 1 numaralı bilgisayara dağıtım yapılmaktadır. Kodlamadaki 1 rakamı bilgisayar sayısı ile değiştirilerek tüm bilgisayarlar için genelleştirme yapılabilir. Paralel hesaplama ile bir bilgisayara $51 * 10307 = 525.657$ adet şebeke çözümü yaptırılmış ve örnek problem-4, 16 bilgisayar kullanılarak 27 dakikada çözülmüştür. 2 katlı bir binanın iş programı olan 36 aktiviteli projenin garanti edilmiş en iyi çözümü paralel programlama ile makul sürede elde edilebilmiştir. Örnek problem 4'ün optimizasyon öncesi ve sonrasındaki kaynak dağılımı Şekil 13'te sunulmuştur.



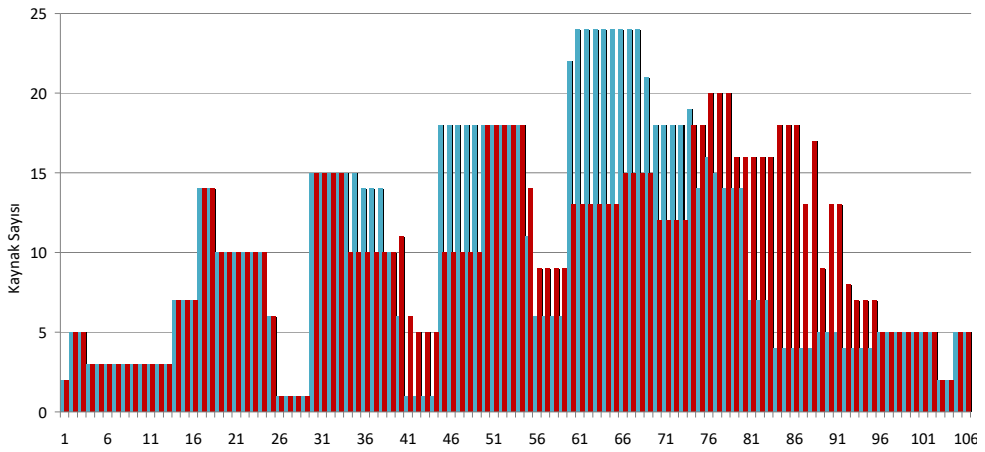
Şekil 11 - Örnek problem 4 şebeke diyagramı

```

For tGecikme = 0 To 5
For vGecikme = tGecikme To 7
For zGecikme = vGecikme To 7
For wGecikme = zGecikme To 10
For abGecikme = wGecikme To 11
For adGecikme = abGecikme To 11
paralelSayac = 0
For afGecikme = 0 To 15
For agGecikme = afGecikme To 15
For ahGecikme = agGecikme To 15
paralelSayac = paralelSayac + 1
bilgisayarNo = (paralelSayac - paralelSayac Mod 51) / 51 + 1
If bilgisayarNo = 1 Then

```

Şekil 12 - Örnek problem 4'ü alt parçalara ayıran kodlama



Şekil 13 - Problem 4 başlangıç ve dengelenmiş kaynak dağılımı

Çizelge 12 - Problem 3 için başlangıç ve optimum çözümlerin karşılaştırılması

	Serbest bolluk	Toplam bolluk	Başlangıç durumunda aktivitelerin başlama-tamamlanma zamanları			Optimizasyon sonrası aktivitelerin başlama-tamamlanma zamanları		
			Erteleme	Başlama	Bitiş	Erteleme	Başlama	Bitiş
A	0	0	0	0	1	0	0	1
B	0	0	0	1	3	0	1	3
C	0	0	0	3	11	0	3	11
D	0	0	0	11	13	0	11	13
E	0	0	0	13	16	0	13	16
F	6	6	0	16	18	0	16	18

Çizelge 12 - Problem 3 için başlangıç ve optimum çözümlerin karşılaştırılması (devam)

	Serbest bolluk	Toplam bolluk	Başlangıç durumunda aktivitelerin başlama-tamamlanma zamanları			Optimizasyon sonrası aktivitelerin başlama-tamamlanma zamanları		
			Erteleme	Başlama	Bitiş	Erteleme	Başlama	Bitiş
G	0	0	0	16	24	0	16	24
H	0	0	0	24	25	0	24	25
I	0	0	0	25	29	0	25	29
J	0	6	0	29	33	0	29	33
K	0	6	0	33	35	6	39	41
L	6	6	0	35	38	6	41	44
M	0	0	0	29	39	0	29	39
N	0	0	0	39	40	0	39	40
O	0	0	0	40	44	0	40	44
P	0	0	0	44	54	0	44	54
R	0	0	0	54	55	0	54	55
S	0	0	0	55	59	0	55	59
T	0	5	0	44	54	5	49	59
U	0	0	0	59	69	0	59	69
V	0	7	0	54	60	5	59	65
Y	0	0	0	69	75	0	69	75
Z	0	7	0	60	68	5	65	73
Q	0	0	0	75	83	0	75	83
W	0	10	0	68	73	5	73	78
AA	0	0	0	83	88	0	83	88
AB	0	11	0	73	76	10	83	86
AC	0	0	0	88	91	0	88	91
AD	11	11	0	76	80	11	87	91
AE	0	0	0	91	95	0	91	95
AF	0	15	0	59	74	14	73	88
AG	0	15	0	74	77	15	89	92
AH	15	15	0	77	80	15	92	95
AJ	0	0	0	95	102	0	95	102
AK	0	0	0	102	104	0	102	104
AL	0	0	0	104	106	0	104	106

Proje süresince ortaya çıkan günlük en yüksek kaynak kullanım miktarı 24'ten 20'ye düşürülmüştür. Ayrıca kaynak dağılımında proje süresince daha az dalgalanmanın olması sağlanmıştır. Proje süresinin 106 gün olduğu göz önüne alınırsa 27 dakika olan hesaplama süresinin makul olduğu değerlendirilebilir.

4. BULGULAR

Bu çalışmada inşaat sektörü için önemli bir araştırma alanı olan kaynak dengeleme probleminin tüm arama uzayını tarayarak kesin çözümünü elde eden yeni bir yöntem sunulmuştur. Bu yöntem aktiviteler arasındaki ardıl öncel ilişkisini ihlal etmeden bolluğu olan aktiviteler üzerinden elde edilebilecek tüm erteleme seçeneklerinin sistematik biçimde deneyerek en iyi çözümü elde etmektedir. Modern sezgisel yöntemlerin rastgelelik içeren arama biçimi nedeniyle aynı çözümün birkaç tekrardan sonra tekrar denenmesi mümkündür. Bu durum özellikle bireylerin mevcut en iyi çözüme yakınsamaları nedeniyle daha sık rastlanır hale gelmektedir. Tabu arama yöntemi geçmişte denenmiş ve iyi sonuç vermeyen çözümleri reddetmektedir. Benzeri yöntemler tekrar çözümlerin önüne geçebilir, fakat özellikle büyük problemlerde geçmiş denemelerin tutulması önemli bellek kullanımına ve karşılaştırma yapılmasına yol açar. Bu nedenle modern sezgisel yöntemlerde tekrar çözümlerin engellenmesi çok yüksek hesaplama maliyeti getirir. Küçük problemlerde ise rastgele arama nedeniyle tam sonucun elde edilmesi tüm arama uzayının taranmasından daha fazla hesap yükü gerektirmektedir. Büyük problemlerde ise modern sezgisel yöntemlere göre daha yüksek verimde paralel hesaplama yapılabilen arama uzayının taranması yöntemi bu avantajı ile daha fazla hesap yükü gerektirme sorununu gidermektedir.

Önerilen yöntem kaynak dengeleme probleminin çözümünde kullanılmakta olan modern sezgisel ve matematiksel yöntemlere göre daha kolay uygulanabilmektedir. Yöntemin uygulanabilmesi için optimizasyon üzerine kuramsal bilgiye ihtiyaç duyulmamaktadır. Sektörde çalışan bir inşaat mühendisi sadece hesapçetveli üzerinde makro yazarak kaynak dengeleme probleminin optimum çözümünü elde edebilir. Bu durumu sağlayabilmek için analizler hesaplama süresi C++ kodlamasına göre daha uzun olmasına rağmen hesapçetveli üzerinde yürütülmüş ve örnek kodlama makale içinde verilmiştir. Bu sayede kurumsal firmalara ek olarak küçük ve orta büyüklükteki tüm inşaat firmaları kaynak dengeleme yapısı önemli ölçüde maliyetlerini düşürebilmeleri amaçlanmıştır.

Geliştirilen yöntem 3'ü literatürden elde edilen 1'i ise 2 katlı bir inşaat işine ait olan 4 problemin kaynak dengeleme probleminin çözümünde uygulandı. Kaynak dengeleme problemi NP-Zor sınıfı bir problem olduğu için aktivite sayısının artması ile arama uzayı sayısı çok hızlı biçimde artmaktadır. Bu nedenle büyük problemlerde tüm arama uzayının tek işlemci ile taranması makul sürelerde olmadığı için paralel programlama ile problem eşit hesap yükü içeren küçük parçalara ayrılıp birden fazla bilgisayarda eş zamanlı çözdürülerek hesaplama süresi kısaltılmıştır.

Geliştirilen yöntem paralel programlamaya oldukça yatkındır. Problem kolaylıkla çok sayıda birbirine eşit alt parçalara ayrılabilir. Ayrıca hesaplama sırasında alt parçalar arasında veri alışverişine ihtiyaç duyulmamakta ve hesaplama süreci kesintisiz biçimde yürütülmektedir. Bu sayede paralelleştirme yüksek verimde gerçekleştirilerek hesaplama süresinde önemli tasarruflar sağlanmaktadır. Birinci problemde tek hat üzerinde paralelleştirme yapılmış, ikinci problemde birbirine paralel iki hat birleştirilerek oluşan

erteleme seçenekleri üzerinden paralelleştirme yapılmış, üçüncü örnek problemde ise seri hat üzerinden paralelleştirme yapılmıştır. Olabilecek tüm paralelleştirme senaryoları incelenerek makaleyi okuyan tüm araştırmacıların geliştirilen yöntemi uygulayabilmeleri amaçlanmıştır.

KDP'nin çözülmesi ile elde edilebilecek fayda ve tasarruflar Şekil 6'da sunulan örnek problem için başlangıç durumunda ve optimizasyon sonrası elde edilen kaynak kullanım eğrileri üzerinden örnekleyerek açıklanmıştır. Mavi ve kırmızı çubuklar sırası ile optimizasyon öncesi ve sonrası kaynak kullanımını göstermektedir. Kaynak dengelemesi yapılmıyorsa 50 ve üzeri personelin çalışması gereken sürelerde kısa süreli çalışacak işçiler istihdam edilecek ve bu işçilere iş güvenliği kuralları ve şantiye süreci öğretilip işe uyumları sağlanacak bir süre sonra bu işçilerin 20'si işten çıkarılacaktır. Bu durum önemli bir maliyet kaynağı ve emek israfıdır. Ayrıca 10 ve 11. zamanda kaynak dengelenmemiş durumda diğer günlere göre daha az personel çalışmaktadır. Bu süre zarfında personelin bir kısmına çalışmadığı halde ödeme yapılacak veya ücretli/ücretsiz izne çıkartılacaktır. Ücretsiz izne çıkartılması ise personelin iş verimini önemli ölçüde düşürecektir. Şantiyenin yerleşim merkezinden uzak bir konumda bulunduğu varsayıldığında kaynak dengelemesi yapılmadan önce 50 kişiye hizmet verebilecek yatakhane, yemekhane, lavabo-duş yerleri inşa etmek gerekirken kaynak dengeleme sonrası 30 kişilik tesis yeterli olacaktır.

Kaynak dengeleme problemi güncel çalışmalarda ağırlıklı olarak modern sezgisel yöntemlerle çözülmektedir. Belirtilen yöntemlerin en önemli sorunu yerel minima'ya yakınsaması ve popülasyonun baskın biçimde yerel minima'ya yakın bireylerden oluşmasıdır. Bu duruma gelen bir popülasyondan elde edilen yeni bireylerin daha önce denenmiş çözümlerle birebir aynı olma olasılığı çok yüksektir. Bu duruma örnek olarak Bettemir [48] tarafından çözülen 11 aktiviteye kadar olan KDP'de garantili biçimde kesin sonuca ulaşmak için yapılan deneme sayısı arama uzayından daha fazla olmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada önerilen tüm arama uzayının taranması yöntemi küçük problemler için modern sezgisel yöntemlerden daha az hesap yükü ile tam sonuca ulaşabilmektedir. Önerilen yöntemin dezavantajı arama uzayının aktivite sayısı ile üstsel olarak artması ve hesap süresinin çok uzamasıdır. Bu çalışmada arama uzayının paralel programlama ile alt parçalara ayrılarak eş zamanlı olarak birden fazla bilgisayarda aynı anda taranması hesap süresini önemli ölçüde kısaltarak belirtilen olumsuzluk azaltılmıştır. Daha büyük problemlerin çözülebilmesi için 4000 ve üzeri sayıda çekirdeğe sahip grafik işlemcileri kullanılarak problemin daha küçük alt parçalara ayrılabilmesini sağlayarak hesap süresini kısaltmak mümkün olacaktır.

Bazı iş kalemlerinin taşeronlara yaptırılması durumunda taşeronların çalışma takvimine bağlı olarak aktivitelerin bolluk süreleri serbestçe kullanılamayabilir. Taşeronun yürütmekte olduğu iş kalemlerinin tamamını belirli bir süre zarfında bitirmek zorunda olması durumunda anılan zaman zarfının içinde işlerin yürütülebilmesi için ilk yapılan işlerin geciktirilmesi, son yapılan işlerin ise belirli bir süreyi aşmadan geciktirilmesi gerekebilir. Problem 4'te Duvar işini yürüten taşeron T ve U aktivitelerini gerçekleştirecektir. Duvar işinin tamamı 44 ile 69. günler arasında yürütülebilmektedir. Taşeronun şantiyede en fazla 22 gün çalışma esnekliğinin bulunduğu varsayıldığında zemin kat duvar işi olan T aktivitesi en az 3 gün geciktirilerek 47. gün sonunda başlatılabilir. Bu sayede duvar işinin tamamı 22 gün içinde tamamlanıp bu sürenin sonunda taşeron başka işlerini yürütebilir. Belirtilen kısıt, önerilen yöntemde T aktivitesinin bolluğu 0'dan 5'e saydırılmak yerine 3'ten 5'e saydırılarak en iyi çözümün aranması ile belirtilen kısıt sağlanır. Bu durumda arama uzayı önemli ölçüde

azalacağı için hesaplama süresi kayda değer ölçüde kısılacaktır. Çok daha büyük inşaat projelerinde hesaplama süresini kısaltmak için planlama detayı düşürülerek ölçek olarak gün yerine hafta kullanılabilir. Bu sayede 14 gün olan bolluk süresi 2 hafta olacaktır. Bu şekilde arama uzayı büyük oranda küçültülebilir.

Örnek projelerin hesaplama süreleri sırası ile 20 dakika, 3 saat, 7,7 saat ve 27 dakika olarak gerçekleşmiştir. Hesaplamalar hesapcetveli üzerinde çalışan bir makro üzerinden yapıldığı için çalıştırılabilir dosyaya göre daha uzun sürmüştür. Günümüzde ekran kartlarının işlemcileri yüzlerce işlemciden oluşmaktadır. Ekran kartı üreticilerinin geliştirdikleri yazılımlarla kolaylıkla ekran kartlarına komut gönderilebilmekte ve hesaplamalar ana işlemci yerine ekran kartının işlemcileri üzerinden yürütülebilmektedir. İleri çalışma olarak paralel hesaplamaların ekran kartı üzerinden yürütülerek problemin binin üzerinde parçaya ayrılarak hesaplama süresi daha da kısaltılabilir.

Kaynak dengelemesi yapılırken iş güvenliği ve şantiye koşulları da mutlaka dikkate alınmalıdır. Örneğin kule vinç kullanımını gerektiren işler yürütülürken kule vincin yakınında başka işlerin yürütülmesini engelleyecek kısıtlar konulmalıdır. Aksi halde iş güvenliği tehlikeye girebilecektir [49].

5. SONUÇ

Arama uzayının büyüklüğü aktivite sayısına ek olarak aktivitelerin bolluğu ve şebekenin yapısı da arama uzayı büyüklüğünü etkilemektedir. Bu nedenle büyük problemler için tek işlemci ile gerçekleştirilecek çözümler makul sürenin çok üzerine çıkacaktır. Bu çalışmada literatürden derlenen 3 problem ile 2 katlı betonarme bir yapıya ait iş programının kaynak dengeleme probleminin optimum çözümü arama uzayları paralel hesaplama ile taranarak elde edilmiştir. Bu sayede 36 aktiviteye kadar olan projelerin kesin çözümleri elde edilerek yöntemin başarısı ortaya konmuştur. Arama uzayının tamamının taranması KDP'nin kesin çözümünün elde edilmesini garantilemektedir. Ayrıca yüksek verimli biçimde paralel programlamaya uygun olduğu için paralel hesaplama ile çözüm süresi önemli ölçüde kısaltılmaktadır.

Bu çalışmanın literatüre özgün katkısı kaynak dengeleme problemini arama uzayını tarayarak kesin çözümünü bulan bir yöntemin geliştirilmesi ve hesaplamaları eşit parçalara ayırarak paralel programlama yapılmasıdır. İnşaat sektörüne katkısı ise oldukça kolay biçimde uygulanabilecek bir optimizasyon yönteminin geliştirilmesidir. Bu sayede inşaat süresi boyunca boşta kalan personel ve iş makinesi süresi en aza indirilmektedir. Ayrıca inşaatın yürütülmesi için ihtiyaç duyulan en üst kaynak miktarı da azaltılarak maliyetlerin azaltılması sağlanmaktadır. Böylece tüm inşaat firmaları kaynak dengelemesi yaparak inşaatın yürütülmesi sırasında boşta kalacak personel ve iş makinesi sürelerini azaltarak kaynak maliyetlerini önemli ölçüde düşürebileceklerdir. Bu sayede rekabet avantajı kazanabileceklerdir.

Kaynaklar

- [1] Ahbab, C., Daneshvar, S., ve Celik, T. (2019). Cost and Time Management Efficiency Assessment for Large Road Projects Using Data Envelopment Analysis. *Teknik Dergi*, 30(2), 8937-8959.
- [2] Kolisch, R., ve Padman, R. (2001). "An integrated survey of deterministic project scheduling." *Omega*, 29(3), 249-272.
- [3] Li, H., ve Demeulemeester, E. (2016). A genetic algorithm for the robust resource leveling problem. *Journal of Scheduling*, 19(1), 43-60.
- [4] Tarasov, I., Haït, A., ve Battaïa, O. (2020). A Generalized MILP Formulation for the Period-Aggregated Resource Leveling Problem with Variable Job Duration. *Algorithms*, 13(1), 6.
- [5] Li, H., ve Dong, X. (2018). Multi-mode resource leveling in projects with mode-dependent generalized precedence relations. *Expert Systems with Applications*, 97, 193-204.
- [6] Abadi N.S., Bagheri N. ve Assadi M., (2018). Multiobjective model for solving resource-leveling problem with discounted cash flows. *International Transactions in Operational Research*, 25(6), 2009-2030.
- [7] Doulabi Hossein Hashemi, S., Seifi, A., ve Shariat, S. Y. (2011). "Efficient hybrid genetic algorithm for resource leveling via activity splitting". *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(2), 137-146.
- [8] Harris, R. B. (1990). Packing method for resource leveling (PACK). *Journal of Construction Engineering and Management*, 116(2), 331-350.
- [9] Hiyassat, M. A. S. (2001). Applying modified minimum moment method to multiple resource leveling. *Journal of Construction Engineering and Management*, 127(3), 192-198.
- [10] Rieck, J., Zimmermann, J., ve Gather, T. (2012). "Mixed-integer linear programming for resource leveling problems." *European Journal of Operational Research*, 221(1), 27-37.
- [11] Neumann, K., Schwindt, C., ve Zimmermann, J. (2012). "Project scheduling with time windows and scarce resources: temporal and resource-constrained project scheduling with regular and nonregular objective functions." Springer Science & Business Media.
- [12] Hegazy, T. (1999). Optimization of resource allocation and leveling using genetic algorithms. *Journal of construction engineering and management*, 125(3), 167-175.
- [13] Son, J., ve Skibniewski, M. J. (1999). "Multiheuristic approach for resource leveling problem in construction engineering: Hybrid approach." *J. Constr. Eng. Manage.*, 125(1), 23-31.
- [14] Leu, S. S., Yang, C. H., ve Huang, J. C. (2000). "Resource leveling in construction by genetic algorithm-based optimization and its decision support system application." *Autom. Constr.*, 10(1), 27-41.

- [15] Zheng, D. X., Ng, S. T., ve Kumaraswamy, M. M. (2003). "GA-based multiobjective technique for multi-resource leveling." *Bridges*, 10(40671), 29.
- [16] El-Rayes, K., ve Jun, D. H. (2009). "Optimizing resource leveling in construction projects." *J. Constr. Eng. Manage.*, 135(11), 1172-1180.
- [17] Christodoulou, S. E., Ellinas, G., ve Michaelidou-Kamenou, A. (2009). "Minimum moment method for resource leveling using entropy maximization." *J. Constr. Eng. Manage.*, 136(5), 518-527.
- [18] Ponz-Tienda, J. L., Yepes, V., Pellicer, E., ve Moreno-Flores, J. (2013). "The resource leveling problem with multiple resources using an adaptive genetic algorithm." *Automation in Construction*, 29, 161-172.
- [19] Li, H., Xiong, L., Liu, Y., ve Li, H. (2017). "An effective genetic algorithm for the resource levelling problem with generalised precedence relations." *International Journal of Production Research*, 1-22.
- [20] Qi, J. X., Wang, Q., and Guo, X. Z. (2007). "Improved particle swarm optimization for resource leveling problem." In *IEEE International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 2, 896-901.
- [21] Li, Z., Wuliang, P., and Zhongliang, Z. (2010). "An ant colony system for solving resource leveling problem." In *IEEE Int. Conf. Intell. Comp. Tech. and Autom. (ICICTA)*, 1, 489-492.
- [22] Geng, J. Q., Weng, L. P., and Liu, S. H. (2011). "An improved ant colony optimization algorithm for nonlinear resource-leveling problems." *Comput. Math. Appl.*, 61(8), 2300-2305.
- [23] Tran, H. H., and Hoang, N. D. (2014). "A novel resource-leveling approach for construction project based on differential evolution." *J. Constr. Eng.*, <http://dx.doi.org/10.1155/2014/648938>.
- [24] Xu, X., Hao, J., ve Zheng, Y. (2020). Multi-objective artificial bee colony algorithm for multi-stage resource leveling problem in sharing logistics network. *Computers & Industrial Engineering*, 142, 106338.
- [25] Prayogo, D., ve Kusuma, C.T. (2019). Optimization of resource leveling problem under multiple objective criteria using a symbiotic organisms search. *Civil Engineering Dimension*, 21(1), 43-49.
- [26] Prayogo, D., Cheng, M. Y., Wong, F. T., Tjandra, D., ve Tran, D. H. (2018). Optimization model for construction project resource leveling using a novel modified symbiotic organisms search. *Asian Journal of Civil Engineering*, 19(5), 625-638.
- [27] Erzurum, T. ve Bettemir, Ö.H. "Kaynak Dengeleme Problemlerinin Arama Uzayının Belirlenmesi Determination of Search Domain of Resource Leveling Problem", Uluslararası Katılımlı 7. İnşaat Yönetimi Kongresi, pp. 437-453, 6-7 Ekim 2017 Samsun Türkiye.
- [28] Toğan, V., ve Eirgash, M. A. (2018). Time-Cost Trade-Off Optimization with a New Initial Population Approach. *Teknik Dergi*, 30(6).

- [29] Karaa, F. A., ve Nasr, A. Y. (1986). Resource management in construction. *Journal of construction engineering and management*, 112(3), 346-357.
- [30] Takamoto, M., Yamada, N., Kobayashi, Y., Nonaka, H., and Okoshi, S. (1995). "Zero-one quadratic programming algorithm for resource leveling of manufacturing process schedules." *Systems and Computers in Japan*, 26(10), 68-76.
- [31] Easa, S. M. (1989). "Resource leveling in construction by optimization." *J. Constr. Eng. Manage.*, 115(2), 302-316.
- [32] Hariga, M., and El-Sayegh, S. M. (2010). Cost optimization model for the multiresource leveling problem with allowed activity splitting. *Journal of Construction Engineering and Management*, 137(1), 56-64.
- [33] Gather, T., Zimmermann, J., and Bartels, J. H. (2011). "Exact methods for the resource levelling problem." *Journal of Scheduling*, 14(6), 557-569.
- [34] Rieck, J., ve Zimmermann, J. (2015). "Exact methods for resource leveling problems." In *Handbook on Project Management and Scheduling Vol. 1* (pp. 361-387). Springer International Publishing.
- [35] Mattila, K. G. ve Abraham, D. M. (1998). Resource leveling of linear schedules using integer linear programming. *Journal of Construction Engineering and Management*, 124(3), 232-244.
- [36] Erzurum T., ve Bettemir Ö.H. (2018). Optimum or Near-Optimum Resolution of Resource Leveling Problems with Spreadsheet Application. 5th International Project and Construction Management Conference (IPCMC 2018), pp. 1285-1299.
- [37] Bettemir, Ö.H., Erzurum T. (2019), "Comparison of resource distribution metrics on multi-resource projects", *Journal of Construction Engineering, Management & Innovation*, 2(2), pp. 93-102.
- [38] Erzurum T. (2019), "Kaynak Dengeleme Probleminin Optimum veya Yakın Optimum Çözülmesi", İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.
- [39] El-Rayes, K. ve Kandil, A. (2004). Distributed Computing for the Optimization of Large-Scale Construction Projects.
- [40] Kandil, A. ve El-Rayes, K. (2005). Parallel computing framework for optimizing construction planning in large-scale projects. *Journal of computing in civil engineering*, 19(3), 304-312.
- [41] Kandil, A. ve El-Rayes, K. (2006). Parallel genetic algorithms for optimizing resource utilization in large-scale construction projects. *Journal of Construction engineering and Management*, 132(5), 491-498.
- [42] Kandil, A., El-Rayes, K. ve El-Anwar, O. (2010). Optimization research: Enhancing the robustness of large-scale multiobjective optimization in construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(1), 17-25.
- [43] Sayar, A., ve Ergün, U. (2014). Fonksiyonel Programlama Dilleri ile Paralel Programlama. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(2), 1-17.

- [44] Gordon, M. I., Thies, W., ve Amarasinghe, S. (2006). Exploiting coarse-grained task, data, and pipeline parallelism in stream programs. *ACM SIGARCH Computer Architecture News*, 34(5), 151-162.
- [45] Sönmez, M., Dikmen, S. Ü., ve Akbıyıklı, R. (2020). Time-cost relationships for superstructure projects in Turkey. *Teknik Dergi*, 31(2).
- [46] Stevens, J. D. (1990). *Techniques for Construction Network Scheduling*, McGraw-Hill, New York.
- [47] Mutlu, M. Ç. (2010). A branch and bound algorithm for resource leveling problem, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bil. Ens., ODTÜ.
- [48] Bettemir, Ö. H. (2009). Optimization of time-cost-resource trade-off problems in project scheduling using meta-heuristic algorithms, Doktora Tezi, Fen bil. Ens., ODTÜ.
- [49] Oral, M., Bazaati, S., Aydinli, S., ve Oral E., (2018). Construction Site Layout Planning: Application of Multi-Objective Particle Swarm Optimization. *Teknik Dergi*, 29(6), 8691-8713.

EK-1 Seri bağı 3 aktiviteli hattın kombinasyon sayısı

$$Seri_3 = \frac{(n+1)(n+2)}{2} + \frac{n(n+1)}{2} + \frac{(n-1)n}{2} + \frac{(n-2)(n-1)}{2} + \dots + \frac{2*3}{2} + \frac{1*2}{2}$$

$$Seri_3 = \frac{1}{2} \left[(n+1)(n+2) + \underbrace{n(n+1) + (n-1)n + (n-2)(n-1) + \dots + 2*3 + 1*2}_{n \text{ terim}} \right]$$

$$Seri_3 = \frac{1}{2} \left[(n+1)(n+2) + \sum_{i=0}^n i(i+1) \right]$$

$$Seri_3 = \frac{1}{2} \left[(n+1)(n+2) + \sum_{i=0}^n (i^2 + i) \right]$$

$$\sum_{i=1}^n i^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}, \quad \sum_{i=1}^n i = \frac{n(n+1)}{2}$$

$$Seri_3 = \frac{1}{2} \left[(n+1)(n+2) + \frac{n(n+1)(2n+1)}{6} + \frac{n(n+1)}{2} \right]$$

$$Seri_3 = \frac{1}{2} \left[(n+1)(n+2) + \frac{n(n+1)}{6} [(2n+1)+3] \right]$$

$$Seri_3 = \frac{1}{2} \left[(n+1)(n+2) + \frac{n(n+1)}{6} [2n+4] \right]$$

$$Seri_3 = \frac{1}{2} \left[(n+1)(n+2) + \frac{n(n+1)(n+2)}{3} \right]$$

$$Seri_3 = \frac{1}{6} [3(n+1)(n+2) + n(n+1)(n+2)]$$

$$Seri_3 = \frac{1}{6} [(n+1)(n+2)(n+3)]$$

EK-2 4 aktiviteli seri hat.

$$Seri_4 = \frac{(n+1)(n+2)(n+3)}{6} + \frac{n(n+1)(n+2)}{6} + \frac{(n-1)n(n+1)}{6} + \frac{(n-2)(n-1)n}{6} + \dots + \frac{2*3*4}{6} + \frac{1*2*3}{6}$$

$$Seri_4 = \frac{1}{6} \left[(n+1)(n+2)(n+3) + \underbrace{n(n+1)(n+2) + (n-1)n(n+1) + (n-2)(n-1)n + \dots + 2*3*4 + 1*2*3}_{n \text{ terim}} \right]$$

$$Seri_4 = \frac{1}{6} \left[(n+1)(n+2)(n+3) + \sum_{i=1}^n i(i+1)(i+2) \right]$$

$$Seri_4 = \frac{1}{6} \left[(n+1)(n+2)(n+3) + \sum_{i=1}^n (i^3 + 3i^2 + 2i) \right]$$

$$\sum_{i=1}^n i^3 = \frac{n^2(n+1)^2}{4}, \quad \sum_{i=1}^n i^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}, \quad \sum_{i=1}^n i = \frac{n(n+1)}{2}$$

$$Seri_4 = \frac{1}{6} \left[(n+1)(n+2)(n+3) + \frac{n^2(n+1)^2}{4} + \frac{n(n+1)(2n+1)}{2} + n(n+1) \right]$$

$$Seri_4 = \frac{(n+1)(n+2)(n+3)}{6} + \frac{n(n+1)}{6} \left[\frac{n(n+1)}{4} + \frac{(2n+1)}{2} + 1 \right]$$

$$Seri_4 = \frac{(n+1)(n+2)(n+3)}{6} + \frac{n(n+1)}{24} [n^2 + n + 4n + 2 + 4]$$

$$Seri_4 = \frac{(n+1)(n+2)(n+3)}{6} + \frac{n(n+1)}{24} [n^2 + 5n + 6]$$

$$Seri_4 = \frac{(n+1)(n+2)(n+3)}{6} + \frac{n(n+1)(n+2)(n+3)}{24}$$

$$Seri_4 = \frac{(n+1)(n+2)(n+3)}{24} [4 + n]$$

$$Seri_4 = \frac{(n+1)(n+2)(n+3)(n+4)}{24}$$

Jeoid Değişimlerinin ICESat Altimetre Verisi ile Hesaplanan Su Seviyelerine Etkisi

Fatih SAKA¹

Ahmet Emre TEKELİ²

Senayi DÖNMEZ³

ÖZ

Çalışmada, ICESat uydusundaki GLAS altimetre verileriyle hesaplanan su seviye yüksekliklerine jeoid yüksekliklerinin etkileri Burdur Gölü (BG) üzerinde incelenmiştir. Su yüzeylerinin günlük olarak tespit edilebilmesi için MODIS uydusuna ait karla kaplı alan haritaları kullanılmıştır. ICESat verilerindeki Global EGM2008 jeoid ile hesaplanan ve BG yer gözlem ölçülerinin su seviye farkları -0.96m ile -0.60m aralığında olup hataların ortalama karekökü 0.73m dir. Güncellenen jeoid ile hesaplanan su seviyelerinin hataları -0.20m ile 0.16m aralığında olup hataların ortalama karekökü 0.12m'ye inmiştir. DSİ yer gözlem verileri ile yapılan karşılaştırmada R^2 0.98 olarak bulunmuştur. Birbirini takip eden kış ve yaz su seviye farkları 0.74m hesaplanıp maksimum 1.0m lik değişim içinde kalmıştır.

Anahtar Kelimeler: Burdur Gölü, jeoid, EGM2008, ICESat, GLA14, MODIS, lazer altimetresi.

ABSTRACT

Effect of Geoid Variations on ICESat Altimeter Based Water Surface Elevations

This study investigates the effects of geoid variations on GLAS altimeter onboard ICESat satellite based water surface elevations (WSE) over Burdur Lake (BL). MODIS snow-covered area maps are used to detect water surfaces daily. The differences between ground observations of BL WSE and those calculated using ICESat Global EGM2008 geoid varied between -0.96m and -0.60m with a root mean square error of 0.73m. The errors of re-calculated water levels with the updated geoid heights varied from -0.20m to 0.16m and the root mean square error decreased to 0.12m. Comparison with DSİ ground observations

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 17 Ekim 2019 günü ulaşmıştır. 26 Haziran 2020 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2021 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.634227>

1 Karabük Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karabük - sakafatih@karabuk.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0003-0956-8658>

2 Iğdır Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Iğdır - aemre.tekeli@igdir.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0001-9026-4373>

3 Iğdır Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Iğdır - senayi.donmez@igdir.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0002-8823-1131>

yielded R^2 as 0.98. Water level differences between the successive winter and summer is 0.74m and remained within the maximum change of 1.0m.

Keywords: Lake Burdur, Geoid, EGM2008, ICESat, GLA14; MODIS; laser altimeter.

1.GİRİŞ

Su ve sulak alanlar hem insanlar hem de sulak alanlara ihtiyaç duyan hayvanlar ve özel bitki türleri için çok önemlidir. Günümüzde artan nüfus ve ihtiyaçlara paralel olarak azalan su kaynakları, küresel su hacminin %2.5'inden az olan tatlı su kaynaklarının [1] ve sulak alanların sürdürülebilir yönetimini ve korunmasını çok daha önemli hale getirmiştir. Kısıtlı miktarda olan tatlı su kaynaklarının sürdürülebilir yönetimi için havzadaki depolanmış suyun, göller, sulak alanlar, nehirler ile rezervuarlar arasındaki su akılarının doğru bir şekilde hesaplanması gereklidir. Fakat havzaya olan girdilerin (yağmur, kar erimesi, nehir akımları) ve çıktılarının (buharlaşma, sızma, su çekilmesi) ölçümlerindeki belirsizlikler su hacimlerinin doğru hesaplanmasını zorlaştırmaktadır [2]. Operasyonel çalışmalarda, su hacimlerinin hesabı yerine, tatlı su kaynakları olan göller ve baraj rezervuarlarının su seviye ölçümleri ile göl/rezervuar batimetrik haritalarının ilişkilendirilmesi ile su hacimleri bulunur.

Göl ve sulak alanlardaki su seviye ölçümleri önemli bilgiler sağlasa da Türkiye'de olduğu gibi küresel olarak yer gözlem ölçüm istasyonlarının sayısında bir azalma yaşanmaktadır [3]. Geriye kalan az sayıdaki göl gözlem istasyonlarının da aktif çalışır halde tutulması, çalışan istasyonlardan seviye verilerinin (ki ulusal ve uluslararası hassas bir bilgidir) alınması, farklı devlet kurumları arasında paylaşımı gibi konularda problemler yaşanabilmektedir [2].

Uydu tabanlı radar ve/veya lazer altimetre verileri iç suların su seviyelerinin ölçümlerinde yeni imkânlar sunmakla beraber, radar altimetrelerine (birkaç km) nazaran daha dar ayak izlerine sahip lazer altimetrelerin (70m) iç suların seviye ölçümlerinde daha doğru bilgiler sağlaması beklenmektedir [2]. Bununla beraber altimetre verileri elipsoidal yüksekliği vermekte olup, mühendislik ve çevresel uygulamalarda daha çok tercih edilen ve suyun akışını tahmin edilmesine imkân veren ortometrik yüksekliğe, doğru bir jeoid model kullanılarak çevrilmesi gerekmektedir [4].

Uydu tabanlı ilk lazer altimetresi olan Ice, Cloud and Land Elevation Satellite (ICESat, Buz, Bulut ve Kara Yüksekliği Uydusu) üzerinde olan Geoscience Lazer Altimetre Sistemi (GLAS) aktif çalıştığı 2003-2009 yılları arasında yüzey yükseklik ve ortometrik yükseklik hesabına imkân veren jeoid bilgilerini (EGM2008) sağlamıştır [5].

Gerek ICESat verileri ile yapılan çalışmalarda [4] gerekse global EGM2008 jeoid verilerinin bölgesel jeoid değerleri ile karşılaştırılmalarında [6-8] doğru ortometrik yüksekliklerin elde edilebilmesi için global EGM2008 jeoid bilgilerinin güncelleme gereklilikleri belirtilmiştir.

Global olarak ICESat ile iç su yükseklik değerlerinin çalışılmış olduğu birçok yayın olsa da, Türkiye'de ICESat ile iç su yüksekliklerinin çalışıldığı bir yayın Tekeli [9] tarafından yayınlanmıştır. Adı geçen çalışmada Akşehir Gölü su seviyeleri ICESat ile hesaplanmış fakat göl seviyesi eşel seviyesinin altına düştüğü için hesaplanan su seviyeleri bire bir yer gözlem ölçümleri ile karşılaştırılamamıştır.

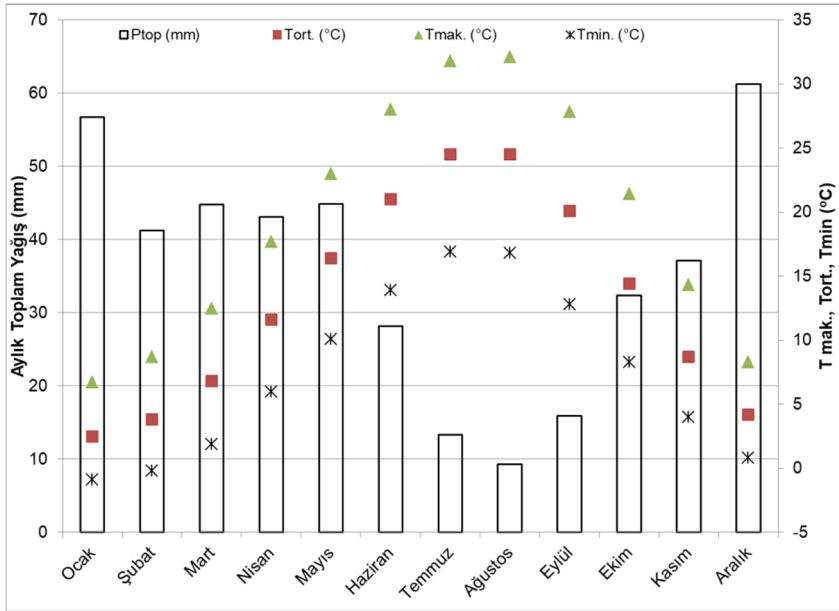
Bu çalışmada, Türkiye ve Dünya için önemli sulak alanlardan birini içeren, Burdur Gölü (BG) su seviyeleri ICESat üzerinde olan GLAS'dan elde edilen lazer altimetre verileri

kullanılarak hesaplanmış ve bulunan değerler yer gözlem değerleri ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, jeoid değişimlerinin ICESat altimetre tabanlı su seviye yüksekliklerine olan etkileri incelenmiştir.

2.ÇALIŞMA ALANI

Havza alanı 3264 km² olan BG havzası, kapalı havza bir havza olup, içerisinde 248 km² yüzey alanına sahip ve 37°49'15.53"- 37°38'58.22"K enlemleri ile 30°3'30.21"- 30°20'33.51"D boylamları arasında olan BG'ne sahiptir. BG, Türkiye'nin 14 Ramsar alanından (uluslararası öneme sahip sulak alan) biri olarak tescillenmiş olup aynı zamanda Yaban Hayatı Geliştirme Sahası statüsüne sahiptir [10,11]

Burdur Havzasının ikliminde Akdeniz iklimi ile Karasal iklim arasında geçiş özelliğinin egemen olduğu görülür. Buna göre, yaz mevsimi sıcak ve kurak, kış mevsimi ise oldukça soğuk geçmektedir [12]. 1932-2019 yılları arasında yıllık yağış toplamı ortalaması 428mm bulunmuştur [13]. Burdur ili meteorolojik değerlerinin 1932-2019 yılları arası için aylık ortalama değerleri Şekil 1 de gösterilmiştir.

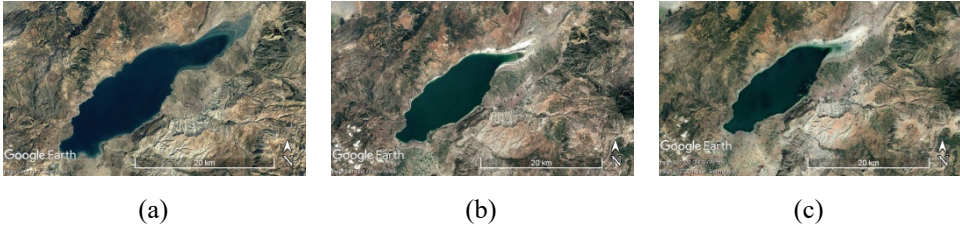


Şekil 1 - Burdur ili 1932-2019 arası aylık toplam yağış, ortalama sıcaklık (T) değerleri.

Göl sularının kışın donmaması, güneybatı ve kuzeydoğu uçlarında sığ kesimlerin olması çamur düzlükleri zengin besin varlığı ile kuşların beslenmesine yardımcı olmaktadır. BG'de iki endemik balık türü yaşamaktadır, ayrıca Türkiye kuş türlerinin %57'sini barındırmaktadır. BG'nin biyocoğrafik açıdan en büyük önemi, nesli dünya çapında tehlikede olan Dikkuyruk Ördek'in dünyadaki popülasyonunun yaklaşık %70'inin gölde bulunmasından gelmektedir [14].

Türkiye'nin göl büyüklüğü açısından yedinci büyük gölü olan [15] BG, Göller Bölgesi'nin en büyük gölleri arasında yer alan tektonik bir göldür. Güneybatı ve kuzeydoğu yönlerinde alüvyal birikim nedeniyle tuzlu bataklıklar bulunmaktadır. Gölün kıyı alanı dar ve hızlı derinleşmektedir. Gölün beslenmesinde, yağışın doğrudan oranı yaklaşık %40, akarsulardan gelen suyun oranı ise yaklaşık %55 olduğu belirlenmiştir. Havzaya düşen yağışlar BG çanağında toplanmaktadır. Göl güneybatı ve kuzeydoğusundaki yeraltı suları ve yağış suları ile beslenmekte, buharlaşma ile de su kaybetmektedir. Ancak bu dengenin bozulmasıyla göl küçülmektedir [16]. Özellikle kuşların konakladığı sığlık alanlarda su seviyelerinde azalma görülmektedir. Ayrıca su miktarının azalmasıyla, hem kirlilik etkileri hem de göldeki tuzluluk oranı artış göstermektedir. 1970-2002 yılları arasında su seviyesinin 857m den 845m ye 12 m'lik alçalması göldeki tuzluluğu yaklaşık iki kat artırdığı gözlenmiştir [17]. Ataol [16] tarafından yürütülen çalışmalarda ise, Eylül 2008'de göl seviyesinin 844 m olduğu belirlenmiştir.

Göller Bölgesi'ndeki birçok göl gibi BG'de de azalan su seviyeleri gözlenmektedir [15, 16, 18, 19]. Şekil 2'de, BG'nin yüzey alanının yıldan yıla değişimi, 1994(a), 2016(b) ve 2019(c) yıllarına ait Google Earth (GE) görüntülerinde görülmektedir. Gölün kuzeydoğu kısmındaki çekilme diğer taraflara nazaran daha açık olarak görülmektedir.



Şekil 2 - BG yüzey alanının 1994 Aralık (a), 2016 Aralık (b) ve 2019 Ağustos (c) aylarındaki Google Earth görüntüleri.

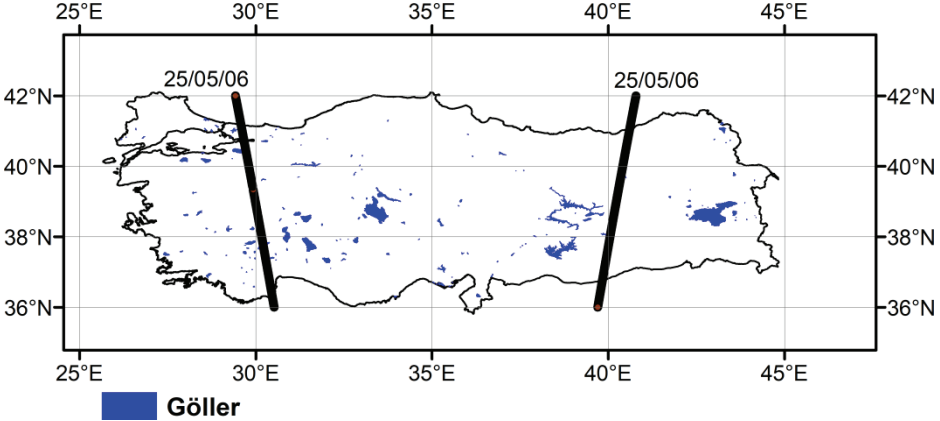
BG'den, içme-kullanma ve sulama amacıyla su çekilmemektedir. Fakat BG'yi besleyen alt havzalardaki su yapıları ile yıllık toplam 28.4 milyon m³ sulama suyu şebekelere verilmektedir [15]. Ataol [16] 2010 yılındaki çalışmasında, göl şartlarının devamı halinde 2080 yılındaki göl seviyesinin 25 metre daha alçaldıktan sonra derin bir çanakta, aşırı tuzlu ve kuşlar için gerekli sızlıkların oluşumuna uygun sığ kıyılarından yoksun, 80 km²'lik alana sahip bir su kütlesi olarak varlığını sürdüreceğini öngörmektedir. Yine Keskin vd. [15], 2015 yılında yaptıkları bir çalışmada, BG'de gerekli önlemler alınmazsa, 100 yıl sonra su seviyesindeki azalmanın 31.5 m'yi bulabileceği ve derinlik değerlerinin az olduğu yerlerde suların tamamen kuruyacağına vurgu yapılmıştır.

3. VERİ SETLERİ

3.1. ICESat GLA14

Zwally vd. [20] de belirtildiği gibi ICESat üzerinde bulundurmuş olduğu GLAS ile lazer altimetre verileri sağlayan ilk uydudur. ICESat, GLAS ile, karalar, su kütleleri, bitki, aerosol ve bulut yüksekliklerini ölçebilmiş özellikle de, buzulların ve deniz buzları ölçümlerinde

referans verileri oluşturabilecek bilgilerin elde edilmesine imkan sağlamıştır [5]. GLAS, 600km orbit yüksekliğinden, yeryüzü üzerinde her 172m'de 70 metre çaplı ayak izleri içerisinde ölçümler yapmaktadır. Şekil 3'de ICESat uydusunun 25 Mayıs 2006 tarihinde Türkiye üzerinden geçişi gösterilmiştir.



Şekil 3 - ICESat uydusu GLAS sensöründen elde edilen GLA14 verilerinin 25 Mayıs 2006 tarihinde Türkiye üzerindeki geçişleri.

Bu ölçümlerde yüzey altımetresi ve yoğun bulut tepeleri için 1064 nm pulse, ince bulut ve aerosollerin tabakalarının düşey dağılımı için 532 nm pulse kullanılmıştır [21]. GLAS, ilgili lazer pulse'nın uydudan çıkıp yer yüzeyinden yansıyarak tekrar uyduya dönmesi arasında geçen zamanı ölçerek, yer yüzeyi ile arasındaki aralık vektörünü hesaplar. GLAS yörünge parametrelerinden, hesaplanan aralık vektörünün çıkarılması ile yer yüzeyi yüksekliği bulunur. Bulunan yükseklik, bulut etkisi ve diğer bazı kalite kontrol testlerini geçebildiği durumlar için kullanıcılara sunulur. GLAS ile yapılan yükseklik hesaplamalarının fiziksel ve matematiksel detayları algoritmaların teorik dokümanlarından [22] elde edilebilir.

Deniz buzları ve göl seviyeleri gibi düz alanlar için ICESat GLAS ölçümlerinden elde edilen yüzey yükseklik ölçümlerinin yüksek doğruluğu (2 ~ 10cm olarak) literatürde belirtilmiştir [23-25]. Bu çalışmada, kara yüzeylerinde yükseklik ölçümlerini sağlayan GLAS / ICESat L2 Global Land Surface Altimetry Data (GLA14)'ün sürüm 33'ü kullanılmıştır. GLA14 V33 verileri National Snow and Ice Data Center (NSIDC) 'den elde edilmiştir.

3.2. Burdur Gölü Su Kaplı Alanların Belirlenmesi

ICESat altimetre verileri sağladığı ve görüntüleme sensörlerine sahip olmadığı için ICESat ayak izlerinin ne tür yeryüzü örtüsü üzerine düştüğünün tespiti amacıyla diğer uydu verilerine ihtiyaç duymaktadır. Çalışma konumuz su yüzeylerinin seviye tespiti olduğu için ICESat verilerinin su yüzeylerindeki ayak izlerinin bulunması gerekmektedir. Bunun için; Duan ve Bastiaanssen [2] Landsat TM/ETM+ uydu verilerini, Song vd. [26] Landsat uydu verilerini, Zhang vd. [27] MODIS uydusundan elde edilen MODIS karla kaplı alan haritalarını kullanmışlardır.

Her ne kadar Duan ve Bastiaanssen [2] Landsat verilerini kullanmış olsalar da, yazarlar çalışmalarında 16 günlük zamansal periyoda sahip Landsat verilerinin operasyonel çalışmalar için fazla uzun bir süre teşkil ettiğini bahis etmişlerdir. Ayrıca, Song vd. [26] çalışmalarında su yüzlerini kendileri çıkarmamışlar, bu bilgiyi daha önceki Song vd. [28] çalışmalarından elde etmişlerdir.

Terra uydusunda, Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), olarak adlandırılan ve 250 m ile 1000 m arasında değişen mekânsal çözünürlüklerle 0.4µm ile 14.4 µm aralığında 36 dar spektrum bandında Dünya gözlemlerine olanak tanıyan bir sensör vardır. 2330 km şerit genişliğine sahip olan MODIS sensörü ile 1 ile 2 gün içerisinde tüm Dünya taranabilmektedir. Bu taramalardan elde edilen verilerden, MODIS kar kaplı alan (KKA) haritaları, MODIS kalibre edilmiş radyans verilerini (MOD02HKM), jeolojasyon (MOD03) ve bulut maskesi ürünlerini (MOD35_L2) girdi olarak [29] kullanan ve [30] tarafından geliştirilen algoritma ile üretilmektedir.

Bu çalışmada ICESat altimetre verilerinin su üzerindeki ayak izlerinin tespiti için, çeşitli MODIS ürünleri arasından Zhang vd. [27] ile Tekeli [9]'a benzer şekilde, MODIS Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid (MOD10A1) verileri kullanılmıştır. Günlük olarak üretilen MODIS KKA haritalarında 500m yersel çözünürlüklü pikseller Tablo 1 de gösterilen sınıflarından birine atanır [29].

MODIS KKA haritalarının yüksek doğrulukta olduğu birçok çalışmada belirtilmiştir [31-33]. Bunlara ek olarak, MODIS KKA haritalarının Türkiye üzerinde kullanılabilirliği yapılan çalışmalarda [34-38] gösterilmiştir. Bu çalışmada MOD10A1 verilerinden sürüm 5 (V5) kullanılmıştır [39].

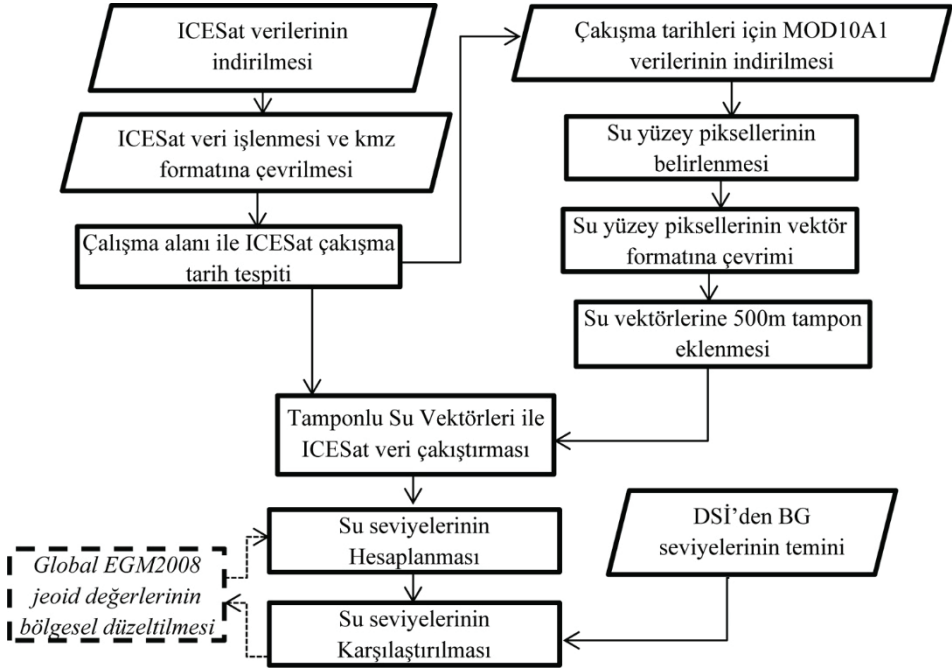
Tablo 1 - MODIS L3 Global 500m KKA haritalarındaki sınıflar.

Pikselin sayısal değeri	Sınıf	Pikselin sayısal değeri	Sınıf
0	Eksik veri	39	Okyanus
1	Karar verilemedi	50	Bulut
11	Gece	200	Kar
25	Kara	254	Doygun sensör
37	Göl	100	Göl buz

4. METODOLOJİ

Şekil 4'de verilen akış şeması kapsamında, NSIDC'dan elde edilen binary (ikili) formattaki dosyalardaki veriler, Türkiye sınırları için kesilmiş, GE'de gösterimine imkân kılan kmz formatına çevrilmiştir. Kmz formatına çevrilen ICESat GLA34 V33 verileri, GE'de açılarak, BG üzerinden geçiş tarihleri belirlenmiştir. Tablo 2 ICESat verilerinin BG üzerinden geçtiği günleri özetlemektedir. Çalışma aralığı olan 2003-2009 yılları arasında BG üzerinden toplam 15 ICESat geçişi bulunmuştur. ICESat uydusunun 25 Mayıs 2006 tarihine ait BG üzerindeki geçişinin GE üzerinde gösterimi Şekil 5'de verilmiştir. Tekeli [9]'da, Akşehir Gölü su yüzeyi üzerine düşen ICESat ayak izlerinin tespiti için, ICESat'ın Akşehir Gölü üzerinden geçiş gününe ait MODIS KKA haritalarında göl olarak tanımlanan pikseller kullanılmıştır. Bu

çalışmada BG'nün sulu alanlarının tespiti için, Tekeli [9]'a benzer şekilde, ICESat'ın BG üzerinden geçiş tarihlerine ait günlük MOD10A1 KKA haritaları NSIDC'den indirilmiş, işlenmiş ve göl olarak tanımlanmış pikseller belirlenmiştir.



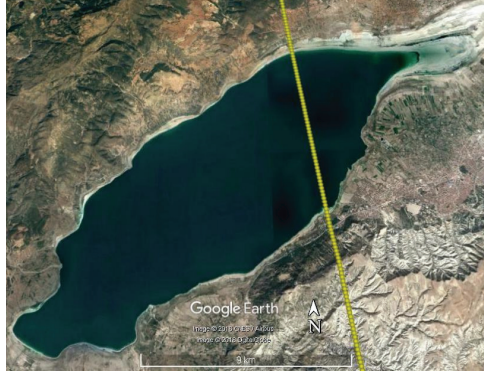
Şekil 4 - Uygulanan metodolojinin akış şeması.

Tablo 2 - ICESat GLA34 V33 verilerinin BG ile çakışma tarihleri ve BG üzerine düşen ICESat ayak izleri sayısı.

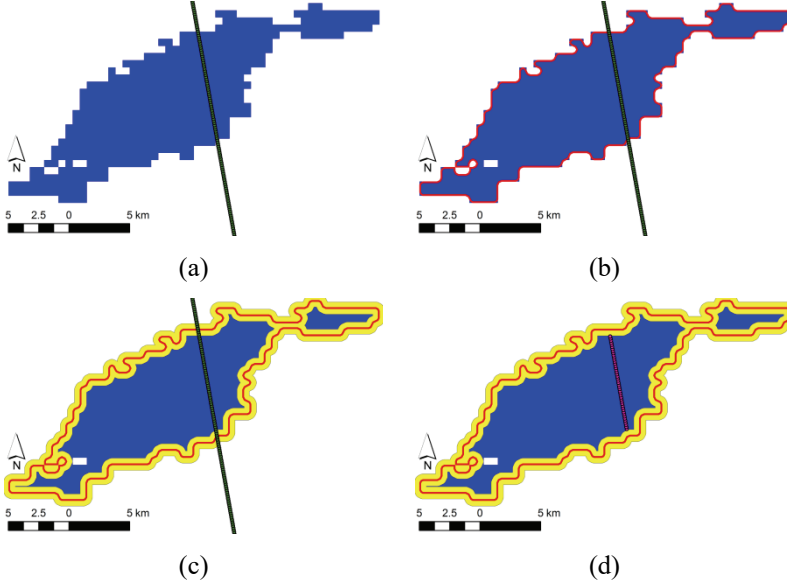
Tarih	Ölçüm Sayıları	Tarih	Ölçüm Sayıları
17/10/2003	11	25/05/2006	45
18/02/2004	*	26/10/2006	29
19/05/2004	*	13/03/2007	41
05/10/2004	19	03/10/2007	40
20/02/2005	*	18/02/2008	*
21/05/2005	*	05/10/2007	*
22/10/2005	37	01/10/2009	41
23/02/2006	47		

* Tablo 3'deki açıklamaya bakınız.

MODIS, KKA haritalarından su yüzeyleri olarak tanımlanan pikseller raster veri formatında çekilmiştir (Şekil 6a). Şekil 6a aynı zamanda ilgili gündeki ICESat verilerini göstermektedir (yeşil noktalar). Elde edilen raster verilerden çalışma alanlarına ait su yüzeyleri vektör formatına çevrilmiştir (Şekil 6b). Tekeli vd. [35] belirtilen karışık pikselleri engellemek için Tekeli [9]'da uygulanan 500m lik tamponlar elde edilen su yüzey vektör dosyalarına uygulanmıştır (Şekil 6c). Su yüzeylerinin yükseklik değerlerinin bulunmasında, MODIS KKA görüntülerindeki su yüzeyleri üzerinde (Şekil 6a) ve 500 m lik tamponun dışında kalan (Şekil 6c) ICESat ayak izleri (pembe noktalar) kullanılmıştır (Şekil 6d).



Şekil 5 - Google Earth ortamında Burdur Gölü üzerinden 25/05/2006 tarihli geçişteki ICESat ayak izlerinin gösterimi.



Şekil 6 - MODIS KKA haritalarından elde edilen raster su yüzeyleri ile ICESat ayak izleri (yeşil noktalar) (a), MODIS KKA haritalarından elde edilen su yüzeyi vektörü (b), Su yüzey vektörlerine uygulanan 500m lik tamponlar (c) 500 tampon bölgesinin dışında ve su yüzeyinde kalan ICESat ayak izleri (pembe noktalar)(d).

5. BULGULAR

Şekil 4’de verilen akış şemasında gösterilen (italik olmayan kısımlar) ve metodoloji kısmında açıklandığı şekilde ICESat GLAS GLA14 verilerinden elde edilen su yüzeyi yükseklik değerleri Tablo 3’de özetlenmiştir. Tablo 3’deki tarih kolonu, ICESat uydusunun ilgili su yüzeylerinden geçiş tarihini, DSİ kolonu ilgili tarihte ilgili su yüzeyi için Devlet Su İşleri (DSİ) Genel Müdürlüğü’nden elde edilen su yüzey seviyelerini göstermektedir. ICESat Global EGM2008 kolonu altındaki H (m) kolonu, GLA14 yükseklik ve Global EGM2008 verilerinden hesaplanan su seviye yüksekliklerinin medyan değerini, ss (m) kolonu ise hesaplanan su seviyelerindeki standart sapmayı belirtmektedir. ICESat GLA14’den elde edilen su seviye yükseklikleri denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Su Yüksekliği} = \text{Elipsoidal Yükseklik} - \text{Jeoid Yüksekliği} \quad (1)$$

Denklem 1’de Elipsoidal yükseklik; ICESat verisinden elde edilmiş yükseklik ve jeoid yüksekliği ise ICESat verileri ile sağlanmış global EGM2008 jeoid verilerin Topex/Poseidon elipsoidine göre sağlanmış değerleridir.

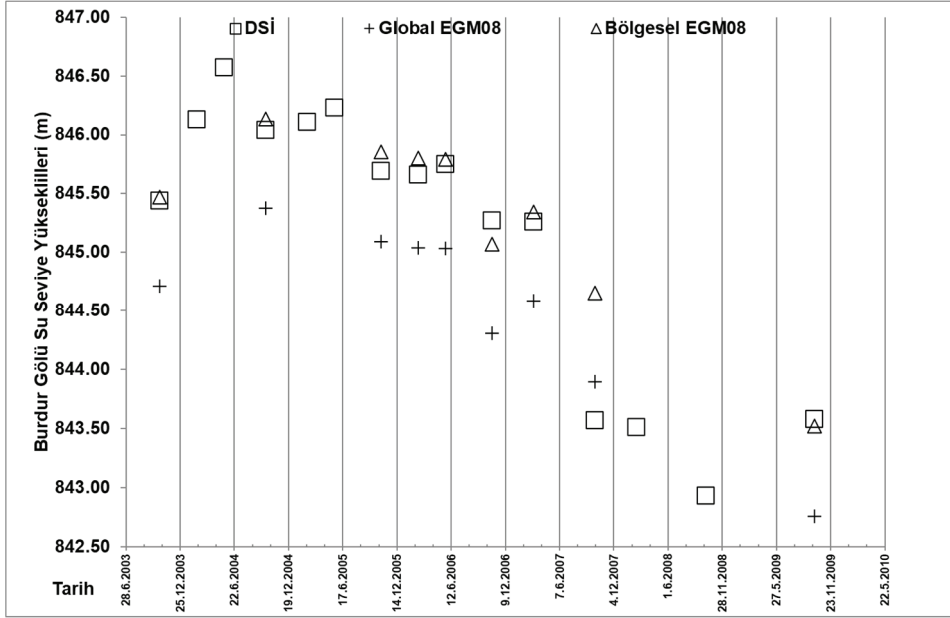
Tablo 3 - ICESat GLAS verilerinden elde edilen su yüzey yüksekliklerinin yer gözlemleri ile karşılaştırılması.

Tarih	DSİ	ICESat		Fark	ICESat		Fark
	(m)	Global EGM2008			Bölgesel EGM2008		
	(m)	H (m)	ss (m)	(m)	H (m)	ss (m)	(m)
17/10/03	845.44	844.71	0.14	-0.73	845.47	0.14	0.03
18/02/04	846.13	!	!	!	!	!	!
19/05/04	846.57	!	!	!	!	!	!
05/10/04	846.04	845.38	0.03	-0.66	846.14	0.03	0.10
20/02/05	846.11	!	!	!	!	!	!
21/05/05	846.23	#	#	#	#	#	#
22/10/05	845.69	845.09	0.66	-0.60	845.85	0.66	0.16
23/02/06	845.66	845.04	8.10	-0.62	845.80	8.10	0.14
25/05/06	845.75	845.03	0.86	-0.72	845.79	0.86	0.04
26/10/06	845.27	844.31	0.31	-0.96	845.07	0.31	-0.20
13/03/07	845.26	844.59	0.03	-0.67	845.35	0.03	0.09
03/10/07	843.57	843.90	0.85	0.33	844.66	0.85	1.09
18/02/08	843.51	!	!	!	!	!	!
05/10/08	842.93	!	!	!	!	!	!
01/10/09	843.58	842.76	0.11	-0.82	843.52	0.10	-0.06

! MODIS karla kaplı uydu görüntüsü bulut kaplı

Su yüzeyi üzerinde ICESat verisi yok

Tablo 3'deki Fark (m) kolonu ise, DSİ ile ICESat su seviye yükseklik farklarını vermektedir. Şekil 7 BG için ICESat ile DSİ'den elde edilen su seviye yükseklikleri göstermektedir. DSİ ve ICESat su seviyeleri aralarındaki en büyük ve en küçük farklar; -0.96m ve +0.33m olup hataların ortalama karekökü (HOKK) 0.70m dir.



Şekil 7 - Burdur Gölü için ICESat ve DSİ su seviye değerlerinin karşılaştırılması.

Tablo 4 farklı araştırmacılar tarafından ICESat verileri kullanılarak hesap edilmiş su seviyelerinin yer verileri ile karşılaştırma sonuçlarını özetlemektedir.

Rao vd. [6] 2012'de, Hindistan üzerinde farklı iki bölgede yapılan çalışmalarda ortometrik yüksekliklerde jeoid farklarından dolayı su seviyeleri arasındaki farkların -1.08m ile 1.42m arasında olabileceğini göstermiştir. Yapılan literatür taramasında çalışma bölgesindeki jeoid değerlerinin global EGM2008 jeoid değerlerinden 0.76m daha az olduğu belirtilmiştir [7,8]. Bu bilgi ışığında global EGM2008 değerlerinde 0.76m düşülerek ve denklem 1 kullanılarak yeniden BG su seviyeleri hesaplanmıştır. Bu işlemler Şekil 4'de verilen akış şemasında italik formatta ve kesik çizgili işlem adımları ile belirtilmiştir. Yeni hesaplanan su yükseklikleri, ss ve farklar Tablo 3'de italik olarak bölgesel EGM2008 kolonu altında verilmiş ve Şekil 7'de grafiksel olarak gösterilmiştir.

Yeni hesaplanan değerlere göre su seviyelerindeki hata (-0.20m, 1.09m) arasında değişiklik göstermiş ve HOKK 0.38m olmuştur (Tablo 4). Bu hata değeri literatürde ICESat [3] ile yapılmış su seviyelerinde bulunan 0.25-0.27m hata mertebesine yakındır. Tablo 3'de 3 Ekim 2007 tarihine ait 1.09m farkın dışındaki farklar [-0.20m, 0.16m] kabul edilebilir seviyede ve HOKK 0.12m olup literatürde belirtilen aralıklarda kalmaktadır (Tablo 4). Şekil 8, bölgesel EGM2008 değerleri ile hesaplanan su seviyeleri ile DSİ'den sağlanan yer gözlem ölçülerinin saçılma grafiğini göstermektedir.

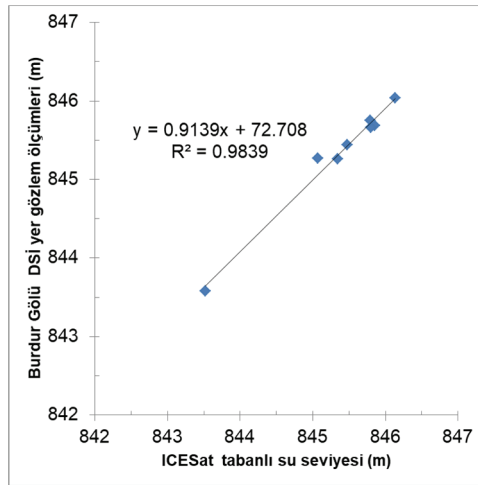
Tablo 4 - Literatürdeki farklı ICESat GLAS çalışmalarından derlenen su yüzey yüksekliklerinin yer gözlemleri ile karşılaştırılması.

FARK		Hataların ortalama kare kökü (HOKK, cm)	R ²	Araştırmacı
En küçük (cm)	En Büyük (cm)			
--	--	35	0.99	
--	--	10.5	0.97	Duan ve Bastiaanssen [2]
--	--	87	0.06	
2	21	8	0.90	Zhang vd. [3]*
--	--	7	--	Jiang vd. [4]**
-96	33***	70	0.84	Bu çalışma Global EGM2008
-96	-60	73	0.98	
-20	109***	38	0.84	Bu çalışma Bölgesel EGM2008
-20	16	12	0.98	

* 30 cm den fazla standart sapmaya neden olan veriler atılmıştır

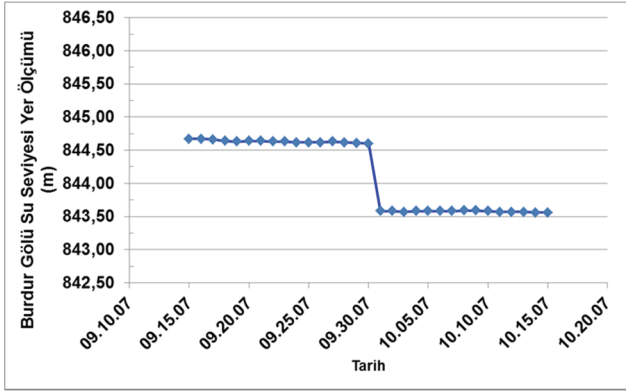
** Medyan değerinin $\pm 2.965x$ (medyandan sapmaların mutlak değerlerinin medyanı) aralığındaki değerler alınmıştır.

*** 03/10/07 tarihinde çok fazla düşüş gösteren, hatalı olabilecek ölçüm değeri varken



Şekil 8 - BG için bölgesel EGM2008 kullanılarak hesaplanan ICESat su seviyeleri ile DSI yer gözlemlerinin saçılma grafiği (3 Ekim 2007 tarihli DSI gözlem değeri hatalı olduğu düşüncesi ile atılmıştır).

DSİ'den elde edilen BG'nin göl su seviye yer gözlem ölçümleri incelendiğinde, 30 Eylül 2007'den 1 Ekim 2007'ye geçişte su seviyesi 844.60m den 843.58m ye inerek, 1.02m lik bir düşüş göstermiştir (Şekil 9). ICESat tabanlı hesaplamalarda 3 Ekim 2007 ait 1.09m'lik hatanın bu düşüşten kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 9. BG için DSİ su seviye gözlemleri.

Tablo 3'de 23 Şubat 2006 tarihi için su seviyesi hesaplamalarında yüksek ss (8.10m) gözlenmiş olsa da, hesaplamalarda medyan değerleri kullanıldığından, hata değeri 0.14m mertebesinde kalmıştır. Birbirini takip eden kış ve yaz su seviyeleri olarak alınabilecek 23/02/2006 (845.80m) ile 26/10/2006 (845.07m) tarih ve değerler ile yaz ve kış su seviye farkı yaklaşık 0.73m bulunur. Bu değer Koçibay [40]'da belirtilen 1m'nin altındadır.

6. SONUÇLAR

Çalışma kapsamında yapılan literatür taramalarında, ICESat uydusu GLAS sensöründen elde edilen yükseklik verilerinin daha önce Türkiye'de iç sulardaki doğruluk analizlerinin yer ölçüm verileriyle karşılaştırılarak gerçekleştirilmediği görülmüştür. Dolayısıyla çalışma mevcut literatüre yeni bir katkı sağlamaktadır.

GLA14 veri setinde gelen Global EGM2008 jeoid yükseklikleri ile hesaplanan hata değerleri iki farklı şekilde ele alınmıştır. Bunlardan ilkinde 03/10/07 tarihinde çok fazla düşüş gösteren, hatalı olabilecek ölçüm değeri de dikkate alınarak, diğeri ise bu değer göz ardı edilmesi ile elde edilen sonuçlardır (Tablo 4). İlk durumda; Global EGM2008 ölçümleri ile [-0.96m ile 0.33m] aralığında olup, hataların ortalama kare kökü 0.70m olarak bulunmuştur. Bölgesel EGM2008 jeoid yükseklikleri ile hesaplamaların yeniden yapılması ile hata değerleri [-0.20m ile 1.09m] aralığında bulunmuş ve HOKK değeri 0.38m olarak belirlenmiştir. İkinci durumda ise; Global EGM2008 ölçümleri ile [-0.96m ile -0.60] aralığında bulunmuştur. Bölgesel EGM2008 jeoid yükseklikleri ile hesaplamaların yeniden yapılması ile hata değeri [-0.20m ile 0.16m] aralığında bulunmuş hataların ortalama kare kökü 0.12m ye düşmüştür. 3 Ekim 2007 tarihine ait 1.09m'lik hatanın 1 Ekim 2007 tarihinde

göl su seviye yer gözlem ölçümlerinde bulunan 1.02m lik seviye düşüklüğünden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çalışmada bölgesel ve global EMG2008 jeoid yükseklikleri arasında kullanılan 0.76m fark Rao vd. [6] belirtilen aralıktadır. Çalışmadaki bulgu, Jiang vd. [4]'da belirtilen altimetre verilerinden hesaplanacak su seviyelerinin doğruluğunun artırılması için jeoid düzeltmelerinin gerekliliğini desteklemektedir.

Deniz buzlarının izlenmesi ICESat uydusunun birinci görevi olması [5] ve uydu üzerindeki lazerlerde çıkan arızalardan dolayı görev güncellemeleri nedenlerinden, kutup bölgeleri dışındaki çalışma alanları üzerinde veri elde edilme imkanı büyük ölçüde azalmıştır. Bununla beraber, mevcut ICESat verileri ile değerli bir çok uygulama yapılabileceği bu çalışmada gösterilmiştir. Bu çalışmada önerilen metodoloji, ICESat'ı takip edecek uydu görevlerine kolaylıkla uygulanabileceği gibi, ICESat'ı takip edecek ICESat2'in bilimsel hedef ve misyonu olan "Diğer Yeryüzü gözlemeleme sistemlerinin yararını arttırmaya yönelik destekleyici ölçümler [41]" ile de örtüşmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, MOD10A1 ve ICESat GLA14 verilerini sağlayıcısı National Snow and Ice Data Center'a teşekkür ederler. Göl su seviye yer gözlem değerleri DSİ'nden ücreti mukabilinde temin edilmiştir.

Kaynaklar

- [1] The USGS Water Science School, <https://water.usgs.gov/edu/gallery/watercyclekids/earth-water-distribution.html>, 2020.
- [2] Duan Z., Bastiaanssen W. G. M., Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. *Remote Sensing of Environment* 134:403-416.DOI:10.1016/j.rse.2013.03.10, 2013
- [3] Zhang, G., Xie H., Duan S., Tian, M., and Yi, D., Water level variation of Lake Qinghai from satellite and in situ measurements under climate change, *J of Applied Remote Sensing*, 2011
- [4] Jiang L., Andersen O. B., Nielsen K., Zhang G., Bauer-Gottwein P., Influence of local geoid variation on water surface elevation estimates derived from multi-mission altimetry for Lake Namco, *Remote Sensing of Environment*, Volume 221, 2019, Pages 65-79 , <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.004>.
- [5] ICESat. <https://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat/index.php> (Son ulaşım 16 Eylül 2019)
- [6] Rao, B . S., Kumar, G., A. N., Krishna P., V., S., S., N., Srinivasulu, P., Venkataraman V., R., Evaluation of EGM 2008 with EGM96 and its utilization in Topographical Mapping Projects., *J. Indian Soc. Remote Sens.*, 40(2):335-340, doi:10.1007/s12524-011-0131-1, 2012
- [7] Kılıçoğlu, A., Direnç, A., Simav, M., Lenk, O., Aktug, B., Yildiz, H. Evaluation of The Earth Gravitational Model 2008 in Turkey. 2019, <https://www.harita.gov.tr/yuksismod/images/egitim/beb3eda36d64806.pdf>

- [8] Yılmaz., N. ve Karaali., C., Comparison of global and local gravetric models in Turkey. Scientific and Research Essays., 5(14), 1829-1839, 2010
- [9] Tekeli, A. E. Augmenting in situ lake level measurements with Earth observation satellites. Teknik Dergi, 29 (6), 0-0. DOI: 10.18400/tekderg.341316, 2018
- [10] Ramsar Sites Information Service, Lake Burdur, <https://rsis.ramsar.org/ris/658>, 2019.
- [11] Google Earth Pro V.7.3.2, 2019.
- [12] Yiğitbaşıoğlu, H., Uğur, A., Burdur Gölü Havzasında Arazi Kullanım Özelliklerinden Kaynaklanan Çevre Sorunları, Ankara Üniversitesi Çevre Bilimleri Dergisi, Cilt 2, Sayı 2, 129-143, 2010.
- [13] DMİ 2019 , <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=BURDUR>
- [14] Kaya, L., G., Yücedağ, C., Duruşkan, Ö., Burdur Gölü Havzasının Çevresel Açısından İrdelenmesi, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 6(1): 6-10 (2015).
- [15] Keskin, M., E., Taylan, E., D., Eğirdir ve Burdur Gölleri Su Seviyelerinde Olası Azalma Eğilimleri, 4. Su Yapıları Sempozyumu, sayfalar: 489-499, 2015.
- [16] Ataoğlu, M. Burdur Gölü'nde Seviye Değişimleri, Coğrafi Bilimler Dergisi, 8 (1), 77-92, 2010.
- [17] Yiğitbaşıoğlu, H., Uğur, A., Burdur Gölü'nün Jeoekolojik Özellikleri ve Sorunları, TURQUA Türkiye Kuvaterner Sempozyumu V, sayfalar: 100-103, 2005.
- [18] Yıldırım, Ü., Uysal, M. (2011). Changes in the Coastline of the Burdur Lake Between 1975 and 2010. International Symposium on Environmental Protection and Planning: Geographic Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) Applications (ISEPP) 28-29 June 2011, Izmir-Turkey.
- [19] Şener, E., Morova, N., Bulanık Mantık ve Doğrusal Regresyon Analizleri ile Burdur Gölü Su Seviyesi Değişimlerinin Modellenmesi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 15-1(2011),60-66
- [20] Zwally, H. J., Schutz, B., Abdalati, W., Abshire, J., Bentley, C., Brenner, A., et al., ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land, Journal of Geodynamics, 34(3-4), 405-445, 2002.
- [21] Spinhirne, J. D., S. P. Palm, W. D. Hart, D. L. Hlavka, and E. J. Welton, Cloud and aerosol measurements from GLAS: Overview and initial results, Geophys. Res. Lett., 32, L22S03, 2005, doi:10.1029/2005GL023507.
- [22] NSIDC, https://nsidc.org/sites/nsidc.org/files/technical-references/GLAS_ATBD_Range_and_Range_Distribution_v7_08_2012.pdf, (Son ulaşım 16 Eylül 2019)
- [23] Kwok, R., Zwally, H. J., Yi, D., ICESat observations of Arctic sea ice: a first look. Geophysical Research Letters, 31, L16401, 2004

- [24] Srivastava, P., Bhambri, R., Kawishwar, P., Dobhal, D. P., Water level changes of high altitude lakes in Himalaya–Karakoram from ICESat altimetry, *J. Earth Syst. Sci.*122, 1533–1543, 2013.
- [25] Khvorostovsky, K., Rampal, P., On retrieving sea ice freeboard from ICESat laser altimeter, *The Cryosphere*, 10, 2329–2346, 2016.
- [26] Song, C., Huang, B., Ke, L., Heterogeneous change patterns of water level for inland lakes in High Mountain Asia derived from multi-mission satellite altimetry, *Hydrological Processes*, 29, 2769-2781, 2015, doi:10.1002/hyp.10399
- [27] Zhang, G. ,Xie, H., Kang, S. ,Yi, D. and Ackley, S. F., Monitoring lake level changes on the Tibetan Plateau using ICESat altimetry data (2003-2009), *Remote Sens. Environ*, 115(7), 1733–1742, 2011.
- [28] Song C, Huang B, Ke L. 2013. Modeling and analysis of lake water storage changes on the Tibetan Plateau using multi-mission satellite data. *Remote Sensing of Environment* 135: 25–35. DOI: 10.1016/j. rse.2013.03.013.
- [29] MODIS. <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod10.php> (Son ulaşım 16 Eylül 2019)
- [30] Hall, D. K., Riggs, G. A., Salomonson, V. V., Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data, *Remote Sens Environ*, 54:127–14, 1995.
- [31] Pu, Z., Xu, L., Salomonson, V. V., MODIS/Terra observed seasonal variations of snow cover over the Tibetan Plateau, *Geophys Res Lett*, 34:L06706., 2007 doi:10.1029/2007GL029262
- [32] Gafuorov A., Vorogushyn S., Farinotti D., Duethmann D., Merkushev A., Merz B., Snow-cover reconstruction methodology for mountainous regions based on historic in situ observations and recent remote sensing data, *The Cryosphere*, 9, 451-463, 2015.
- [33] Xu W., Ma H., Wu D., Yuan W., Assessment of the Daily Cloud-Free MODIS Snow-Cover Product for Monitoring the Snow-Cover Phenology over the Qinghai-Tibetan Plateau, *Remote Sens*, 9(6),585, 2017
- [34] Tekeli, A. E., Akyürek, Z., Şorman, A. A., Şensoy, A., Şorman, A. U., Using MODIS snow cover maps in modeling snowmelt runoff process in the eastern part of Turkey, *Remote Sens Environ*, 97, 216–230, 2005.
- [35] Tekeli, A. E., Sensoy, A., Sorman, A. A., Akyurek, Z., Sorman, A. U., Accuracy assessment of MODIS daily snow albedo retrievals with in situ measurements in Karasu Basin, Türkiye, *Hydrological Processes*, 20, 705-721, 2006.
- [36] Uysal G., Şorman A. A., Şensoy A., 2016. Streamflow Forecasting Using Different Neural Network Models with Satellite Data for a Snow Dominated Region in Turkey, *Procedial Engineering* 154, 1185-1192, 12th International Conference on Hydroinformatics, HIC 2016, 21-26 August 2016

- [37] Uysal G., Şensoy A., Şorman A. A., 2016. Improving daily streamflow forecasts in mountainous Upper Euphrates basin by multi-layer perceptron model with satellite snow products . J. Hydrol.534,630-650, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.10.037>
- [38] Sorman A. A., Uysal G., Sensoy A., Probabilistic Snow Cover and Ensemble Streamflow Estimations in the Upper Euphrates Basin, Journal of Hydrology and Hydromechanics, 67,1,82-92, <https://doi.org/10.2478/johh-2018-0025>
- [39] Hall, D. K., V. V. Salomonson, and G. A. Riggs. 2006. MODIS/Terra Snow Cover Daily L3 Global 500m Grid, Version 5. Boulder, Colorado USA. NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center. doi: <https://doi.org/10.5067/63NQASRDPDB0>.
- [40] Koçıbay O. Burdur tarihi, https://www.academia.edu/32247710/Burdur_Gölü (Last accessed 06 Eylül 2019).
- [41] ICESat2. http://icesat.gsfc.nasa.gov/icesat2/science_objs.php (Last accessed 20 February 2017).

İnceltilmiş Uçlu Önüretimli Aşık Kirişlerinin Yük Taşıma Kapasitelerinin Deneysel ve Numerik Olarak İrdelenmesi ve Çözüm Önerileri

Ceyhun AKSOYLU¹

Yasin Onuralp ÖZKILIÇ²

Şakir YAZMAN³

Lokman GEMİ⁴

Musa Hakan ARSLAN⁵

ÖZ

Türkiye’de inşaat sektörü 1960’lı yılların sonu itibari ile beton prefabrikasyon ile tanışmıştır. Prefabrike olarak üretilen yapılar seri üretimlerinin ve montajlarının hızlı olmasından dolayı özellikle sanayi yapılarında daha fazla tercih edilmişlerdir. Bu yapı türünün en büyük dezavantajı özellikle mafsallı birleşim bölgelerinde oluşan hasarlardır. Çatı kirişleri ile aşık kirişlerinin birleştiği bölgelerde de bağlantı genellikle mafsallı olarak gerçekleştirilir. Bundan dolayı mesnet bölgelerinde teorik olarak moment oluşmamakta ve bu tip kirişlerin kesit tesirleri basit mesnetli kirişlerde olduğu gibi hesaplanmaktadır. Ancak aşık inceltilmiş uç bölgelerinde yoğunlaşan kesme kuvveti, kesme gerilmelerinin artmasına neden olduğundan bu bölgenin detaylandırılması için bir takım özel tasarım kuralları ilgili standartlarda yer almıştır. Bu birleşim bölgelerinde özellikle etkili ve uzun süreli kar yağışlarından sonra çatıda biriken yoğun kar neticesinde hasarlar gözlemlenmektedir. Bu hasarlar nispeten daha eski prefabrike yapı stokunda bulunanlar başta olmak üzere inceltilmiş uçlu aşık kirişleri için önemli bir risk oluşturmaktadır. Bu çalışmada, şimdiye kadar kapsamlı olarak araştırılmamış olan inceltilmiş uçlu aşıkların düşey yük etkisi altında davranışları, aşıkların değişen mekanik parametrelerine göre deneysel ve numerik olarak incelenmiştir. İlk olarak yürürlükteki standartlara uygun olan ve olmayan iki adet aşık kirişinin deneyleri

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu’na 29 Aralık 2019 günü ulaşmıştır. 28 Eylül 2020 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2021 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.667066>

1 Konya Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya - caksoylu@ktun.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0002-1574-4251>

2 Necmettin Erbakan Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya - yozkalic@erbakan.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0001-9354-4784>

3 Selçuk Üniversitesi, Iğın Meslek Yüksek Okulu, Konya - syazman@selcuk.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0002-4064-0024>

4 Necmettin Erbakan Üniversitesi, Meram Meslek Yüksekokulu, Konya - lgemi@erbakan.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0002-9895-6574>

5 Konya Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Konya - mharslan@ktun.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0002-5410-9218>

gerçekleştirilmiştir. Ardından yine standarda uygun bir adet aşık kiriş inceltilmiş uç hasarının önlenmesi amacıyla CFRP ile güçlendirilerek test edilmiştir. Daha sonra ABAQUS programıyla modellenen aşıklardan elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışma sonuçları doğrulanmıştır. Tüm deneysel sonuçlarla numerik modelleme sonuçlarının oldukça yakın olduğu görülmüştür. Numerik model numunelerinde gözlenen hasarlar ile deneylerde oluşan hasarların benzer olması yeni parametrik çalışmalarda numerik modellerin kullanılabilmesini göstermiştir. Doğrulamanın ardından aşıkların mekanik özellikleri ile güçlendirme alternatiflerine bağlı bir dizi parametrik çalışma numerik olarak gerçekleştirilmiştir. Parametrik çalışmada; özellikle mevcut aşıklarda beton basınç dayanımı, donatı çekme dayanımı ve aşık kirişlerin üretiminde kullanılan öngerme seviyesinin tasarlanandan farklı olabileceği düşüncesiyle bir parametre olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca karbon elyaf takviyeli polimer (CFRP) kumaş ile güçlendirilen ve yönetmeliğe göre tasarlanmayan aşıkların davranışı da yine parametrik çalışma kısmında incelenmiştir. Parametrik çalışmanın sonuçlarına göre beton basınç dayanımı daha etkin olmakla beraber beton ve çelik dayanımının artışı ile kesme kapasitesinde önemli ölçüde artış sağlandığı görülmüştür. Elde edilen sonuçlarda öngerme değeri artışının kapasiteye hatırı sayılır bir etki sağlamadığı görülmüştür. CFRP ile güçlendirilen numunelerde aşığın yük taşıma kapasitesinin %50'ye arttığı ve hasarın inceltilmiş uç bölgesi dışına kaydığı (inceltilmemiş bölgeye) görülmüştür. Parametrik çalışma ile farklı ve uygulanabilir CFRP alternatifleri de modellenerek en iyi güçlendirme alternatifi önerilmiştir. Bununla beraber inceltilmiş uçlu aşıkların donatı tasarımına esas bazı öneriler getirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: ABAQUS, CFRP, inceltilmiş uç, aşık kiriş, prefabrik yapı.

ABSTRACT

Experimental and Numerical Investigation of Load Bearing Capacity of Thinned End Precast Purlin Beams and Solution Proposals

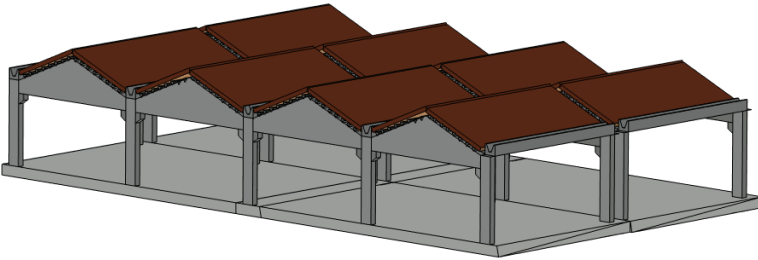
The construction sector in Turkey has met concrete prefabrication at the end of the 1960s. Prefabricated structures have been preferred more especially in industrial buildings due to their rapid production and fast erecting. The biggest disadvantage of these structures is the damages that occurred at especially the region of hinged connection. The connection of roof beams and purlin beams are generally assembled with a hinged connection. Therefore, a moment does not occur theoretically in the support areas and the cross-sectional effects of these beams are calculated as in simple support beams. However, since the shear force concentrated in the thinned end regions causes an increase in shear stresses, a number of special design rules are included in the relevant standards for the detailing of this region. Damages are observed in these connections as a result of snow accumulated on the roof especially after effective and prolonged snowfall. These damages pose a significant risk for thinned end beams, especially those in the relatively older prefabricated building stock. In this present study, the behavior of thinned end purlins under vertical loading, which have not been investigated extensively before, has been numerically and experimentally examined according to varying mechanical parameters. First, experiments of two purlin beam, which are in accordance with current standards and not, were carried out. Then another purlin beam in accordance with the standard, which was strengthened with carbon fiber reinforced polymer (CFRP) in order to prevent thinned end damage, was tested. Then, the results

obtained from the purlins modeled with ABAQUS program were verified with the results of the experimental study. The results of numerical modeling were found to be very close to all experimental findings. The similarities between the damages observed in the experiments and numerical modeling showed that numerical models can be used in new parametric studies. After the verification, a number of parametric studies related to the mechanical properties of the purlins and strengthening alternatives were performed numerically. In the parametric study, concrete compressive strength, reinforcement tensile strength and the prestressing level used in the production of purlin beams, especially in existing purlin, was evaluated as a parameter with the idea that it may differ from the designed one. In addition, the behavior of purlins which are not in accordance with standards and strengthened with CFRP was also examined in the parametric study section. According to the results of the parametric study, it has been observed that a significant increase in shear capacity has been achieved with the increase of concrete and steel strength although the concrete compressive strength is more effective. The results showed that increasing the pretension value does not have a significant effect on the capacity. In addition, the shear capacity of purlin strengthened with CFRP has increased up to 50% and the damage has shifted to out of the thinned end region. With the aid of parametric study, different and feasible CFRP alternatives were also modeled and the best strengthening alternative was recommended. In addition, some suggestions for the design of the reinforcements for the thinned ended purlins were made.

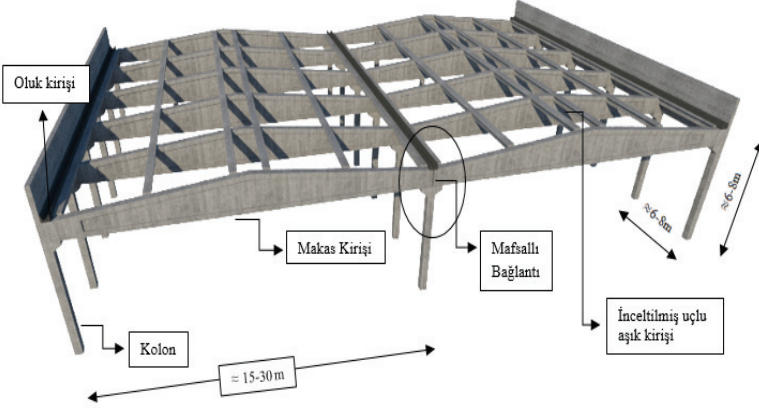
Keywords: ABAQUS, CFRP, thinned end, purlin, prefabricated building.

1. GİRİŞ

Prefabrikasyon (Önüretim); kullanım amacına göre dayanım, görünüm ve zaman açısından ihtiyaçlara maksimum seviyede cevap verebilen bir yapım sistemi oluşturmak amacıyla fabrikada seri olarak üretilen ve yerinde montajı hızlı yapı türüdür [1]. Ülkemizde prefabrike yapıların ilk olarak kullanımı 1950'li yıllara dayanmaktadır [2]. Daha sonraki yıllarda sanayiye yönelik yatırımların artmasıyla beraber 1980'li yıllarda kullanımı ancak yaygınlaşabilmiştir. Üretilen prefabrike yapıların büyük bir kısmı ise sanayi yapılarından oluşmaktadır [3]. Bu tür yapılar genellikle temelden ankastre olup tek katlı, geniş açıklığa sahip, kolon, kiriş ve çatı elemanlarından oluşan çerçeve tipini temsil etmektedir (Şekil 1 ve Şekil 2).

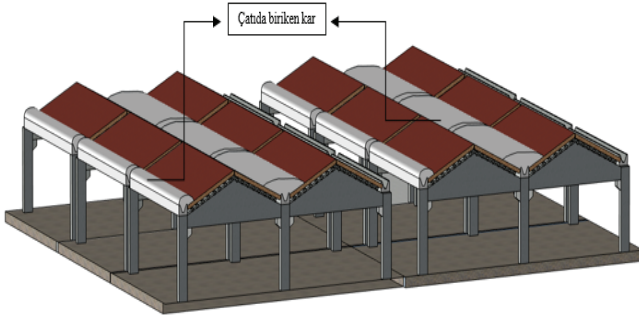


Şekil 1 - Tipik prefabrik sanayi yapısı örneği



Şekil 2 - Mafsallı prefabrik yapının tipik görünümü

Prefabrike yapılarda bağlantı türleri, moment aktaran prefabrik panellerden veya mafsallı olabilmektedir. Özellikle çatı kirişi olarak kullanılan inceltilmiş uçlu aşık kirişlerinde mafsallı bağlantılar tercih edilmektedir (Şekil 2). Ancak bu durumda aşık kirişlerinin inceltilmiş uç kısımlarında düşey yükler altında (kar vb.) ani ve gevrek hasarların oluştuğu literatürdeki çok sayıda çalışmada belirtilmiştir [4-12]. Prefabrike yapılarda biriken kar yükünün zamanla inceltilmiş uçlu aşık elemanlarında oluşturduğu yükleme durumu Şekil 3'de gösterilmektedir.



Şekil 3 - Prefabrike yapılarda zamanla kar yükünün birikmesi

İnceltilmiş uçlarda meydana gelen hasar ve hasarlara yönelik alınması gereken önlemleri içeren literatür de farklı analitik ve deneysel çalışmalar da mevcuttur [13-34]. İnceltilmiş uçlu aşık kirişlerinin tasarımına yönelik 1979 yılında Mattock ve Chan tarafından yapılan deneysel çalışmalar [5] 1999 yılında çıkarılan Amerikan prefabrik yapı yönetmeliğine [35] (PCI Design Handbook) altlık oluşturmuş ve inceltilmiş uç bölgelerinin tasarımı bu sayede iyileştirilmiştir. Bununla beraber ülkemizde inceltilmiş uçlu öngermeli aşık kirişlerin tasarımına yönelik şu anda yürürlükte olmayan ancak yerine alternatif getirilmediğinden kullanılan TS 9967 [36] ve TS 3233 [37] standartları mevcuttur. Prefabrik yapı üreticileri

kirişlerin çözümünde sırasıyla: kirişin üzerine gelen yük belirlenmekte, yük altında kirişin kesit tesir diyagramları çizilmekte, ve mesnet reaksiyonlarına göre kirişin uç kısmı boyutlandırılmaktadır. Boyutlandırma aşamasında kirişin her noktasındaki gerilme durumu önemli olduğundan dikkate alınmaktadır. Çünkü mesnet bölgesinde mafsalı birleşimden dolayı moment sıfırken, kesme kuvveti maksimum olmaktadır.

İnceltilmiş uçlu kirişler betonarme mesnetlere doğrudan oturabileceği gibi ayrıca çelik levha, korniyer ya da profil başlığa veya herhangi bir ara malzemeye de oturtulabilir. Mesnet bölgelerindeki kiriş uçları düşey (V_d) ve yatay (H_d) mesnet reaksiyonları ile ara malzemenin mesnet alanına paralel genişlemesiyle oluşacak çekme kuvvetlerini güvenle aktarip taşıyabilmelidir. TS 9967’de ve BPEK-2018’de inceltilmiş uç bölgesine yönelik donatı düzeni ve oluşan çatlaklar Şekil 4’de gösterildiği gibi verilmektedir.

İnceltilmiş uca yerleştirilen donatılar, yüklenme neticesinde oluşan çatlakları dik karşılayacak şekilde tasarlanmaktadır. Burada (1) ile gösterilen çatlak inceltilmiş uç kesişim noktasında doğrudan eğilmede çekme etkisiyle oluşmaktadır. (2) numara, inceltilmiş ucun başladığı noktadan itibaren diyagonal eğilme ve kesme şeklinde meydana gelmektedir. (3) numara ise inceltilmiş uç bölgesine geçmeden hemen önce diyagonal çatlak olarak gözlenmektedir. Son olarak (4) numara ise inceltilmiş uç bölgesinde oluşan diyagonal kesme çatlakları şeklinde sınıflandırılmıştır. Şekil 4’de gösterilen 1 numaralı çatlakın engellenmesi için TS 9967 ve BPEK-2018, aşağıdaki denklemlerin kullanılarak donatı hesaplarının yapılması gerektiğini belirtmektedir. Burada BPEK-2018’in güncel olması sebebiyle aşağıdaki denklemler bu kaynak referans gösterilerek verilmiştir. İlk olarak Şekil 4’de gösterilen A_s eğilme donatısı ve A_h kesme sürtünme donatısı 1 numaralı çatlak boyunca kayma güvenliğini sağlamak amacıyla yerleştirilmektedir. Artan düşey yüke bağlı olarak uç bölgede oluşan moment A_s donatısı ile karşılanmakta ve (1) bağıntısıyla hesap edilmektedir [38].

$$A_s = A_{sf} + A_n = \frac{1}{f_{yd} \cdot x d} * [V_d x a + H_d x (h - d)] + \frac{H_d}{f_{yd}} \quad (1)$$

Burada, a mesafesi(mm), V_d kesme kuvvetinin A_{sh} donatı eksenine uzaklığını, H_d ’nin (kN) en az $0.20V_d$ olacağı, h (mm), inceltilmiş bölgedeki yüksekliği, d (mm), inceltilmiş bölgedeki faydalı kiriş yüksekliğini, f_{yd} (MPa) ise enine donatının hesap dayanımı olarak ifade edilmektedir. A_s donatılarının ince ucun başından açıklığa doğru (H-d)+ l_b kadar uzaması gerektiği ve 3 nolu çatlak l_b kadar aşması gerektiği de ifade edilmektedir. Şekil 4’de 1 nolu olası çatlakın önlenmesi adına yerleştirilen donatılar $A_{sf}+A_n$ ve A_h donatılarının toplamı (2) ve (3) bağıntılarında verilmiştir.

$$A_{sf} = \frac{2}{3} x \frac{V_d}{f_{yd} x \mu_e} \quad (2)$$

$$A_n = \frac{H_d}{f_{yd}} \quad (3)$$

Burada f_{yd} ; A_{sf} , A_n ve A_h donatılarının akma dayanımı olarak kullanılmaktadır.

Bağıntı (2)'deki sürtünme katsayısı (μ_e), ve A_h kesme sürtünme donatısı bağıntı (4) ve bağıntı (5)'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$\mu_e = \frac{6.9x\lambda^2xbxhx\mu}{V_d} \quad (4)$$

$$A_h = 0.5x(A_s - A_n) \quad (5)$$

Denklem 1'den bulunacak A_s alanı ile Denklem 2 ve Denklem 3'ün toplamından elde edilecek A_s alanı karşılaştırılarak büyük olan değere göre inceltirilmiş bölgedeki eğilme donatısı (A_s) yerleşimi yapılmaktadır. Ayrıca bulunacak A_h donatısı inceltirilmiş uç yüksekliğinin (h) 2/3'üne en az iki sıra olarak yerleştirileceği belirtilmektedir. A_h donatısının kesitteki bitim yerinin ise 1 numaralı çatlaktan sonra TS500 [44]'de belirtilen en az kenetlenme boyu (l_b) kadar olması ifade edilmektedir.

Şekil 4'de inceltirilmiş bölgede 4 numaralı çatlağı önlemek için yerleştirilen A_v askı donatısı giriş eksenine dik düzenlenmiş olmasından dolayı etriye olarak da isimlendirilmektedir. İnceltirilmiş uç bölgesindeki donatıları birbirine bağlamak ve 4 numaralı çatlağı karşılamak için bağıntı (6) kullanılarak askı donatısı hesaplanarak kapalı etriye olarak düzenlenmektedir.

$$A_v = \frac{1}{2xf_{yd}} x \left[\frac{V_d}{0.85} - 0.65xf_{ctd}xbxd \right] \quad (6)$$

Şekil 4'de inceltirilmiş ucun hemen bitiminde bulunan A_{sh} askı donatısı 2 numaralı çatlağın oluşumunu önlemek amacıyla bağıntı (7)'deki gibi hesaplanmaktadır. A_{sh} donatısı, kapalı düşey etriye şeklinde ya da giriş çekme bölgesinde ana eğilme donatısının bükülebilir çapta olması durumunda, 90° kıvrılıp gerekli ankraj boyunu sağlayacak biçimde oluşturulabilir.

$$A_{sh} = \frac{V_d}{f_{yd}} \quad (7)$$

Şekil 4'de 3 numaralı çatlağa paralel eğik beton basınç kuvvetinin yatay bileşenini alacak A'_{sh} donatısı bağıntı (8)'deki gibi hesaplanmaktadır

$$A_{sh} = A'_{sh} = \frac{V_d}{f_{yd}} \quad (8)$$

Şekil 4 incelendiğinde inceltirilmiş kesitin büyük oranda kesme etkisinde olduğu bu nedenle oluşacak hasarın ani ve gevrek olacağı söylenebilir. Bundan dolayı oluşacak çatlaklara önlemlerin alınması gerektiği görülmektedir. Ayrıca TS 500'de verilen l_b , kenetlenme

boyunu, V_d ve H_d ise çatlak oluşumlarına sebep olan düşey ve yatay mesnet reaksiyonlarını temsil etmektedir. TS 9967 standardında ve BPEK-2018'de A_s donatılarının inceltilmiş ucun başından açıklığa doğru en az $1.7l_b$ boyunda olması gerektiği belirtilmektedir. Bununla beraber kenetlenme boyunun 3 numaralı çatlağı l_b kadar aşması gerektiği de ifade edilmektedir. İnceltilmiş uçlu bir kiriş tasarımının TS 9967'ye ve BPEK-2018'e uygun olarak yapılabilmesi ancak yukarıdaki hesaplamalara uyulmasıyla mümkündür. Bununla birlikte belirtildiği üzere standartlara ve BPEK-2018'e uygun tasarımın yapılması durumunda dahi inceltilmiş bölgede hasarlar oluşabilmektedir. Literatürde yapı elemanlarının güçlendirilmesi için yapılan farklı güçlendirme yöntemleri ve güçlendirme malzemeleri mevcuttur [45-55]. Bunların ışığında aşık kirişlerde oluşan hasarların giderilmesi adına bazı güncel alternatifler düşünülebilir. Ayrıca mevcut aşıkların iyileştirilmesi için literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde lifli polimer malzemeler ile aşık uçlarının güçlendirilebileceği de görülmektedir [56-69]. Literatürde güçlendirme amacıyla yaygın olarak kullanılan karbon fiber takviyeli polimer (CFRP) malzemelerin özellikle tercih edilme sebepleri arasında çeliğe göre ağırlıklarının beşte biri civarında olması ve çekme dayanımlarının 10 ile 14 kat fazla olması söylenebilir [70-73]. Daha çok kirişlerde sargılama amacıyla kullanılan bu lifler, uygulanma doğrultularına göre boyuna donatı veya enine donatı işlevi de görmektedirler.

1.1. Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada prefabrike betonarme aşık kirişlerinin en zayıf halkası olarak kabul edilen inceltilmiş uç bölgelerinde oluşacak hasarları önlemek için bir dizi parametrik çalışma yapılmıştır. İlk olarak yürürlükte olan standartlara uygun olan ve olmayan birer adet aşık kirişinin deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ardından yine standarda uygun bir adet aşık kiriş inceltilmiş uç hasarının önlenmesi amacıyla CFRP ile güçlendirilerek test edilmiştir. Daha sonra ABAQUS programıyla modellenen aşıklardan elde edilen numerik sonuçlar ile deneysel çalışma sonuçları karşılaştırılarak modeller doğrulanmıştır. Modellemelerin ardından aşıkların mekanik özellikleri ile güçlendirme alternatiflerine bağlı bir dizi parametrik çalışma numerik olarak gerçekleştirilmiştir. Parametrik çalışmada; özellikle mevcut aşıklarda beton basınç dayanımı, donatı çekme dayanımı ve aşık kirişlerin üretiminde kullanılan öngerme seviyesinin tasarlanandan farklı olabileceği düşüncesiyle her biri parametre olarak düşünülmüştür. Literatürde benzer parametrelerin baz alındığı öngerilmeli kiriş deneyleri mevcuttur [74-78]. Ayrıca CFRP uygulaması ile güçlendirilen ve yönetmeliğe göre tasarlanmayan aşığın davranışı da yine parametrik çalışma kısmında incelenmiştir. Bu çalışmanın ana motivasyonunu,

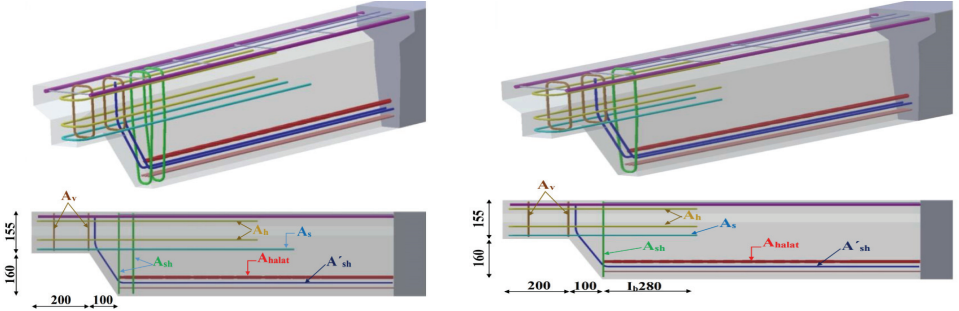
- ABAQUS programıyla modellenen aşıklardan elde edilen sonuçlar ile deneysel çalışma sonuçları karşılaştırılarak modellerin numerik olarak doğrulanıp doğrulanamayacağını sınamak,
- TS 9967 ve BPEK-2018'e göre önerilen donatı ve beton sınıfı, ön germe halat kapasitesi gibi parametrelerin değiştirilmesi durumunda kesme kapasitesinde ve hasar gelişiminde meydana gelecek olan farklılığı analiz etmek,
- Uygulamada aşık kirişleri için dikkate alınan standart detayların yapılan deneysel ve numerik çalışmalar ile kontrol edilmesi ve BPEK-2018'de ve TS500'de belirtilen kenetlenme boyu (l_b), askı donatısı (A_{sh}) parametrelerinin incelenerek yeni detaylar üretilebilmek,

- İnceltilmiş uçlu kirişlerin kar yükü ve zamanla oluşan buz yükü altında hasar aldığı ve bu hasarın üretim aşamasında alınacak önlemler ile veya aşık kaldırılmadan (sonradan) yapılması gereken CFRP ile güçlendirme alternatifi ile nasıl giderilmesi gerektiğini araştırmak, inceltilmiş uçlu kirişlerin sonradan güçlendirilmesi adına CFRP ile yapılan deneysel ve numerik çalışmalar ile pratik ve etkili bir güçlendirme alternatifi sunmak, oluşturmaktadır.

2. MATERYAL VE METOD

2.1. Deneysel Çalışma

Bu çalışmada iki adet aşık uç bölge donatı detaylandırması, TS 9967 normlarına ve BPEK-2018'e uygun (D1) olması ya da olmaması (D2) durumuna göre deneysel olarak dikkate alınmıştır. D2 numunesinin uygun olmaması askı donatısı sayısının ve kenetlenme boyunca azaltılması ile gerçekleştirilmiştir. D2 numunesinin deneysel ve numerik olarak incelenmesinin nedeni ise eski tip yapılardaki mevcut eksikliklerin değerlendirilmek istenmesidir. Deneysel çalışmada D1 numunesinde oluşan hasar inceltilmiş uç bölgesinde kesme hasarı olarak meydana gelmiştir. Bundan dolayı TS 9967'ye ve BPEK-2018'e uygun (D3) bir adet aşığın inceltilmiş uç bölgesi CFRP ile sargılanarak (güçlendirilerek) deneysel testi gerçekleştirilmiştir [79]. Sonuç olarak elde edilen üç adet aşığın düşey yükler altında deneysel çalışması yapılmıştır.



a) D1 ve D3:TS 9967'ye ve BPEK-2018'e uygun donatı düzeni

b) D2:TS 9967'ye ve BPEK-2018'e uygun olmayan donatı düzeni

Şekil 5 - TS 9967'ye ve BPEK-2018'e uygun ve uygun olmayan donatı detayı

Deneylerde kullanılan yük hücresinin kapasitesi ve boyutları düşünülerek test edilecek aşık boyları 320 cm olarak seçilmiştir. Uygulamada aşık üzerinde var olan yayılı yük deneysel olarak çok pratik olmadığından dolayı 2 noktadan noktasal yük ile elemanın kesme ve moment davranışları yayılı yüke benzetilmeye çalışılmıştır. Çalışmada incelenen bölge inceltilmiş uç bölgesi olduğu için ilk olarak bu bölgelerin hasar görmesi amaçlanmıştır. Kesme açıklığı / aşık kirişi faydalı yükseklik (a_v/d) oranı 2.4 olarak dikkate alınmış ve bu sayede inceltilmiş uç bölgede kesme hasarı oluşumu sağlanmıştır. Aşık kirişlerin üretimi esnasında alınan üç adet silindirik beton numunesinin aksenal basınç testi sonucu sırasıyla 31.4 MPa, 28.8 MPa, 30.3 MPa olarak ve bunların aritmetik ortalaması da 30.16 MPa olarak

hesaplanmıştır. Deneysel çalışmada D1 ve D3 olarak tasarımı yapılan aşıklarda ortalama B420c tipinde 2Φ8 boyuna donatılar ile 1 adet ½'' (1.27 cm çapında) öngerme halatı tasarımda dikkate alınmıştır. Ayrıca Şekil 4'de gösterilen 2 numaralı çatlakın oluşumunu engellemek için uç bölgelerde 2 adet Φ8 askı donatısı (A_{sh}) kullanılmıştır.

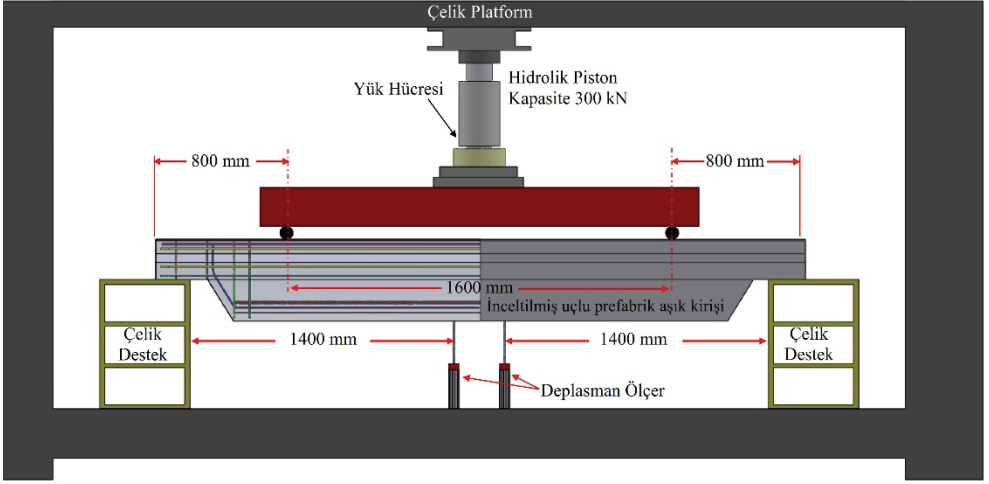
D2 aşık numunesinde ise askı donatısı 1Φ8'e düşürülmüştür. Bununla beraber D2 numunesinde 3 numaralı çatlakın ilerlemesini engelleyecek olan A'_{sh} donatısının boyu önerilen 1.7 l_b (476 mm) yerine 1.0 l_b (280 mm) olarak sınırlandırılmıştır. Şekil 5'de D1, D2 ve D3 tipi aşıkların donatı düzeni gösterilmiş, Çizelge 1'de ise donatı adetleri ve kenetlenme boy bilgileri verilmiştir. Burada kullanılan iki aşık (D1-D3/D2) arasındaki tek farkın askı donatısı sayısı ile kenetlenme boy (l_b) miktarı olduğu görülmektedir.

Çizelge 1 - D1, D2 ve D3 tipi aşıkların donatı düzeni

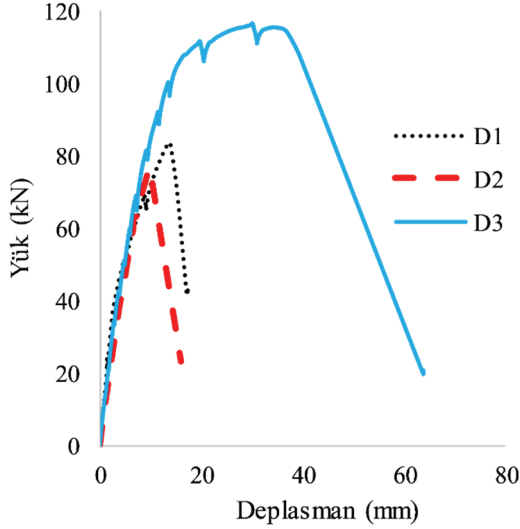
Donatı Tipi	TS 9967'ye ve BPEK-2018'e uygun (D1-D3)	TS 9967'ye ve BPEK-2018'e uygun değil (D2)
Kesme Sürtünme Donatısı (A_h)	2Φ8	2Φ8
İnceltilmiş Bölgedeki Eğilme Donatısı (A_s)	2Φ8	2Φ8
İnceltilmiş Bölge Dışındaki Eğilme Donatısı (A'_{sh})	2Φ8	2Φ8
Askı Donatısı (A_{sh})	2Φ8	1Φ8
Ön germe halatı	½''(inch)	½''(inch)
İnceltilmiş bölgedeki etriye donatısı (A_v)	2Φ8	2Φ8
Kenetlenme boyu (l_b)	476 mm	280 mm

Yapılan deneysel çalışmalar Konya Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, Deprem Araştırma Laboratuvarı'nda 500 kN kapasiteli rijit çelik yükleme çerçevesi kullanılarak düşey yükleme düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında kullanılan aşıklar aynı zamanda üretildiği için malzeme özellikleri aynıdır. Deney esnasında bilgisayar destekli 8 kanallı veri okuma sistemi kullanılarak, gerekli yük ve yer değiştirme okumaları yapılmış ve kayıt altına alınmıştır. Deney sırasında düşey yük ölçümleri yük ölçer ile, düşey yer değiştirmeler ise LVDT kullanılarak yapılmıştır. Yük hücresinin kapasitesi 300 kN'dur. Deneysel yük protokolü, düşey monotonik yükleme ile 10 kN'luk artışlar şeklinde uygulanmıştır. Yük kontrollü olarak sürdürülen deneyler aşık kirişlerinde kesme hasarı ile ani ve gevrek bir şekilde sonlanmıştır. Monotonik her yüklemede kısa bir süre deney üzerindeki çatlakların işaretlenmesi için beklenilmiştir. Deneysel çalışmada oluşan hasarlar D1 numunesi için göçmeye yakın uç bölgede meydana gelirken D2 ve D3 numunesi için inceltilmemiş bölgede meydana gelmiştir. Çalışmanın numerik modelleme kısmı ön plana çıkarılmak istendiğinden deneysel

çalışma sonuçları için gerekli ve yeterli şekil ve çizimler ile birlikte deney düzeneği Şekil 6'da, karşılaştırma grafiği Şekil 7'de verilmiştir.



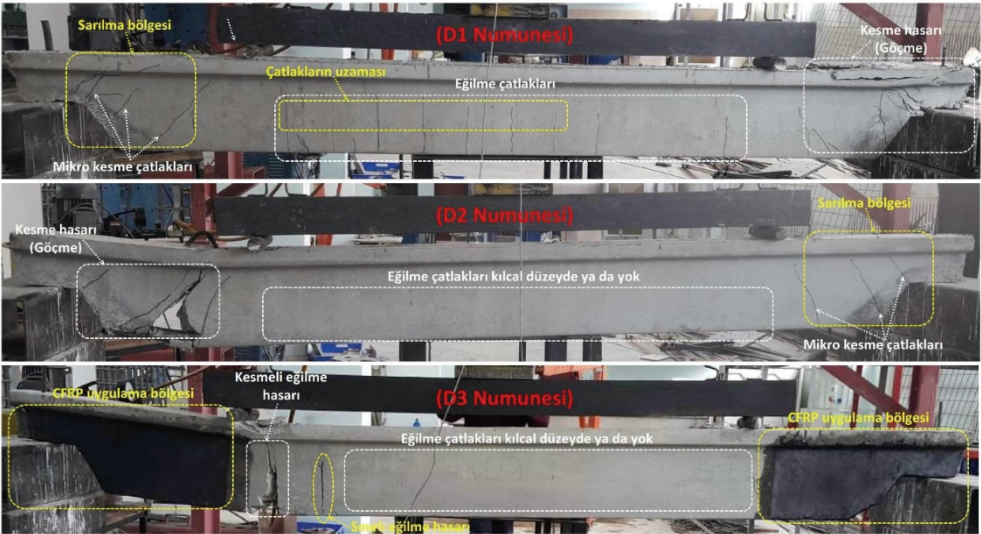
Şekil 6 - Aşık yükleme deney düzeneği



Şekil 7 - Deney sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 7'de deneysel çalışması yapılan üç numunenin karşılaştırılması, Şekil 8'de ise her bir numunenin deneysel makro hasar analizleri gösterilmiştir. Bunlardan ilki D1 numunesidir. D1 numunesinde yük 83.5 kN ve deplasman değeri 13.8 mm olduğu anda inceltmiş uç bölgesinde kesme hasarı ile aşık kirişi göçme konumuna ulaşmıştır. D2 numunesinde ise

sonuç hasarı, yükün 76.3 kN ve düşey deplasmanın 9.7 mm olduğu anda inceltilmiş bölge dışında ani kesme hasarı şeklinde meydana geldiği görülmüştür. İnceltilmemiş bölgedeki eğilme donatılarının (A'_{sh}) koştığı gözlenmiştir. Eğilme bölgesinde bulunan ön germe halatında ise herhangi bir kopma gözlenmemiştir. Bu durum aslında inceltilmemiş bölgeye yerleştirilen fazladan bir adet A_{sh} donatısının önemini göstermektedir. Son olarak D3 numunesinin CFRP ile üç yüzeyinin mesnet bölgesi de dahil U şeklinde güçlendirildiği numunede göçme hasarı maksimum yük taşıma kapasitesinin 116.4 kN ve deplasman değerinin 39 mm olduğu anda gerçekleşmiştir. Nihai hasarın kesmeli eğilme olarak meydana geldiği aşık kirişin inceltilmiş uç bölgelerinde CFRP'nin betona deney sonuna kadar tam bir aderans ile bağlı olduğu görülmüştür. Ayrıca uygulamada aşık kirişlerinin eğik çatı kirişinden (makaslardan) ayrılmadan (de-monte olmadan) aşığı alttan saracak şekilde U tipi CFRP ile güçlendirilmesi oldukça zordur. Bu çalışmada tam kapasite ile CFRP'nin etkisi görülmek istendiğinden bu tip bir güçlendirme tercih edilmiştir. Gerçek uygulamada mesnet bölgelerinde yapılacak bu güçlendirmenin aşığın kaldırılmadan uygulanması mümkün olmayacaktır. Bunun için numerik analiz kısmında aşıkların yerinden kaldırılmaması adına farklı tip güçlendirme modelleri numerik olarak analiz edilmiş ve daha pratik ve etkili güçlendirme alternatifler de önerilmiştir.

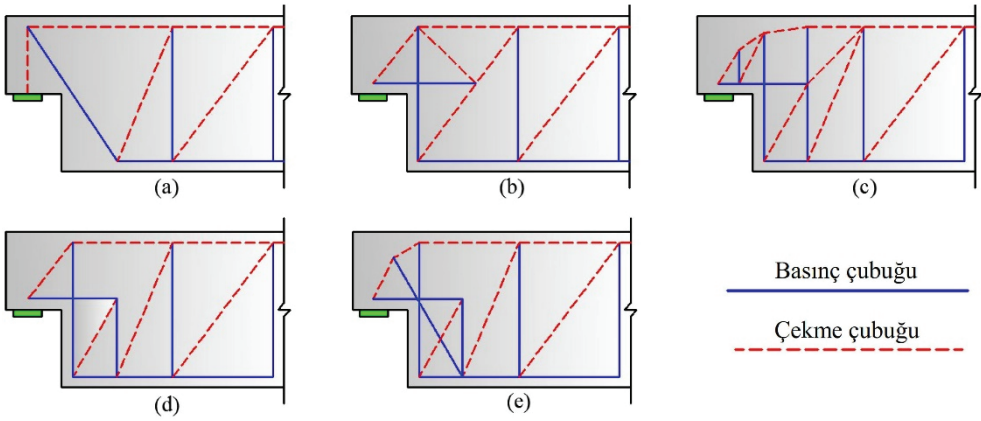


Şekil 8 - Deneysel çalışma sonrası inceltilmiş uçlu kirişlerin makro hasar analizleri

2.2. Analitik Çalışma

Literatürde inceltilmiş uçlu kirişler için önerilen analitik çalışmalarda kafes kiriş (strut and tie) modelleri üzerine yapılanlar ön plana çıkmaktadır. Genel olarak kafes kiriş (strut and tie, STM) modeli üç ana bileşenden oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla basıncı karşılayan (strut), çekmeyi karşılayan (tie) çubuklar ile basıncı ve çekme çubukların birleşim noktalarını temsil eden düğüm bağlantı (node) elemanlarıdır [80]. STM sadece akma kriterlerinin ve sistem dengesinin karşılanmasını gerektirir. Gerinim uyumluluğu gerektirmeyen bir model sunmaktadır. Bu durum alt sınır plastisite methoduna karşılık gelmektedir [81, 82].

İnceltilmiş uçlu aşık kirişlerin muhtemel STM modelinin tanımlanması için bir çok metod geliştirilmiştir. Bu çözümlerin hepsi elastik çözümlere dayanmaktadır. İnceltilmiş uçlu kirişler için en yaygın kullanılan STM'ler takviye düzenine bağlı olarak üç kategoride değerlendirilmiştir (Şekil 9). Bunlar sırasıyla diyagonal, dikey ve kombinasyon modelleridir. İnceltilmiş uçlu aşıklara yönelik Avrupa ve ABD'de kafes kiriş modelleri üzerine farklı eğilimler olduğu görülmektedir. Avrupa'da, inceltirilmiş uçlu kirişler üzerinde var olan yükü inceltirilmemiş bölgeye aktarmak için diyagonal bir donatı ile kafes kiriş (strut and tie) modeli daha çok kullanılmaktadır (Şekil 9a) [82, 83]. Bununla birlikte ABD'de ise inceltirilmemiş bölgeye yerleştirilen dikey donatılar ile inceltirilmiş uç bölgeye uzanan yatay takviye donatıları daha yaygın olarak tercih edilmektedir. Bu durum dikey kafes kiriş (strut and tie) modelinin yaygın olduğunu göstermektedir (Şekil 9b-c-d) [84-86]. Ayrıca inceltirilmiş uçlu kirişler için daha karmaşık kombinasyonlarda kafes kiriş (strut and tie) modeli literatürde önerilmektedir (Şekil 9e) [82, 87-89].

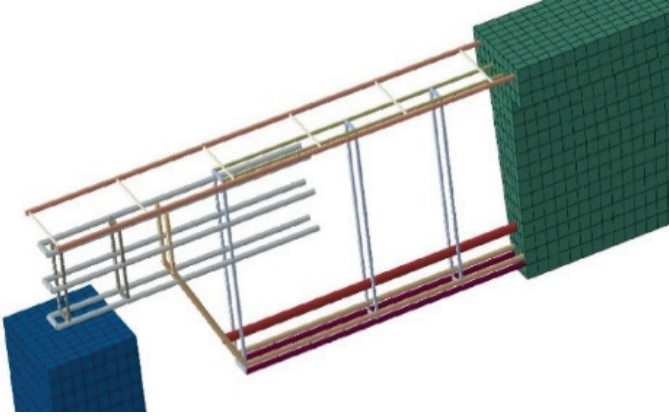


Şekil 9 - İnceltilmiş uçlu kirişlerde yaygın kullanılan kafes kiriş modelleri: a) diyagonal model, b-c-d) dikey model, e) kombinasyon tipi model

Şekil 9'dan da görüldüğü üzere literatürde kafes kiriş modelleri için yapılan analitik çalışmalarda elastik çalışmalara yoğunlaşılmıştır. Gelişen teknoloji ile numerik çalışmalara olan ilgi ise gün geçtikçe artmaktadır. Numerik çalışmalar sayesinde yorucu ve maliyetli deneyler yapılmadan birçok araştırma yürütülebilmektedir [90]. Bu çalışmada numerik analizler sonlu elemanlar paket programı olan ABAQUS kullanılarak yapılmıştır. ABAQUS programı zor ve karmaşık problemleri yeterince güvenli sunması ile bu çalışmanın odak noktasını oluşturmaktadır.

Bu çalışmada, ilk olarak deneysel çalışmadaki D1, D2 ve D3 numunelerin doğrulaması numerik olarak sırasıyla N1, N2 ve N3 modelleri oluşturularak gerçekleştirilmiştir. Daha sonra 10 farklı yeni numerik model ile TS 9967 ve BPEK-2018'e uygun olmayan aşıklar için analiz yapılmıştır. Yapılan analiz parametreleri Tablo 4'de verilmiştir. Çalışmada mevcut yapılarda bulunan aşıklardaki standartlara uygun olmayan tasarım veya üretim hatalarına dikkat çekilmek istenmiştir. Bunun için aşıkların uç bölgesinde kesme davranışını etkileyen parametreler araştırılmış ve güçlendirilmesi için öneriler verilmiştir. Numerik çalışma için 3 boyutlu elamanlar kullanılmıştır. Numerik model, deneyin sınır şartlarını ve yüklemeyi doğru

temsil edecek şekilde tasarlanmıştır. Yükleme, deney sırasında aşıklara kuvvet uygulanan alanlara deplasman verilerek sağlanmıştır. Yüksek deformasyonların etkisini katmak için doğrusal olmayan geometri opsiyonu aktif edilmiştir. Ayrıca doğrusal olmayan malzeme modelleri tanımlanmıştır. Betonun modellemesi için sekiz düğüm noktalı üç boyutlu katı elemanlar (C3D8R) kullanılmıştır. Çelik donatılar ve çelik halatlar üç boyut iki düğüm noktalı kafes elemanları (T3D2) kullanılarak modellenmiştir. Betonarme için 20 mm eleman ağı boyutu seçilirken çelik donatılar ve çelik halat için 10 mm eleman ağı boyutu kullanılmıştır. Kullanılan modelin eleman ağı dağılımı ve donatı yerleşimi Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10 - Numerik model

Sonlu elemanlar metodu ile gerçekçi sonuçlar elde etmek için malzeme modellerinin doğru bir şekilde tanımlanması gerekmektedir. Bu çalışmada beton modellemesi için beton plastik hasar modeli kullanılmıştır. Beton plastik hasar modeli için betonun basınç ve çekme dayanımı, elastisite modülü, çatlama ve ezilme hasar dayanımlarının tanımlanması gerekmektedir. Ayrıca Çizelge 2'de verilen parametreler de betonun numerik olarak modellenmesi için kullanılmıştır.

Çizelge 2 - Beton modelinde kullanılan parametreler

Dilatasyon Açısı	Eksantriklik	f_b/f_c	K
31	0.1	1.16	0.667

f_b/f_c : Çift yönlü yükleme oranı

Bu çalışmada Dere [91] tarafından önerilen beton modeli kullanılmıştır. Basınç gerinim ve gerilme ilişkisi (9) numaralı bağıntı kullanılarak elde edilmiştir. Burada σ_c basınç gerilimini, ε_c basınç gerinimini, f_c tek eksenli basınç gerilimini, ε_{c0} tek eksenli basınç gerinimini temsil eder ve n ise (10) numaralı bağıntı kullanılarak elde edilmiştir.

$$\frac{\sigma_c}{f_c} = \frac{n \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)}{(n-1) + \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^n} \quad (9)$$

$$n = 0.0004f_c + 1.0 \quad (10)$$

Çekme gerinim ve gerilim ilişkisi maksimum çekme kuvvetine kadar elastik ve bu noktadan sonra plastik davranış sergiler. Çekme gerinim ve gerilim ilişkisi (11) ve (12) numaralı bağıntılar kullanılarak elde edilmiştir.

$$\sigma_t = f_t \left(\frac{\varepsilon_{to}}{\varepsilon_t} \right)^{0.4} \quad (11)$$

$$\varepsilon_{to} = \frac{f_t}{E_c} \quad (12)$$

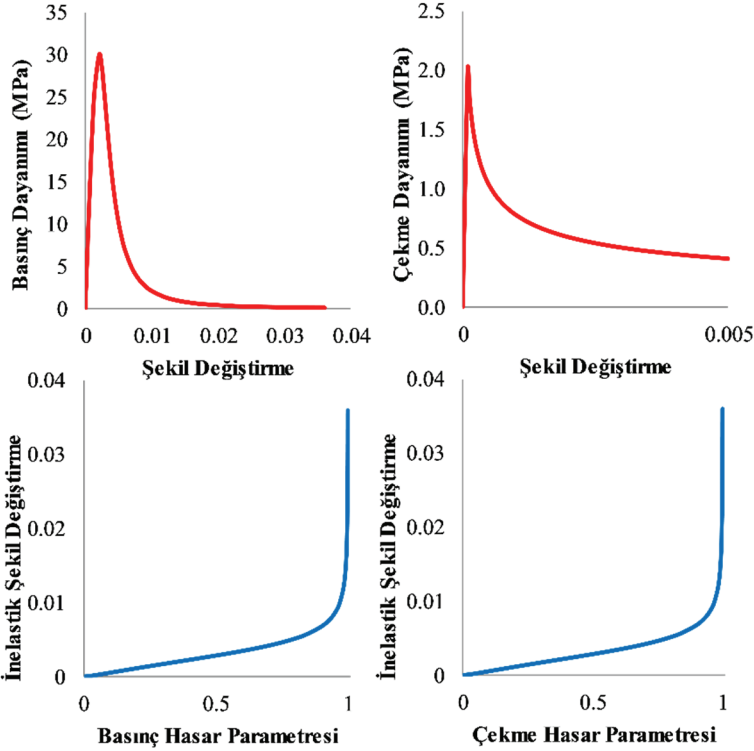
Betondaki hasar, beton basınç hasar parametresi (d_c) ve beton çekme hasar parametresi (d_t) kullanılarak tespit edilir. Bu parametreler de 0 değeri hasarsız betonu, 1 değeri ise tamamen hasarlı betonu temsil eder. Beton basınç hasar parametresi (13) numaralı bağıntıdan ve beton çekme hasar parametresi (14) numaralı bağıntıdan elde edilmiştir.

$$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E_c^{-1}} \quad (13)$$

$$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\varepsilon_t^{pl} (1/b_t - 1) + \sigma_t E_c^{-1}} \quad (14)$$

30 MPa basınç dayanımına sahip betonun modellenmesi için kullanılan basınç dayanımı, çekme dayanımı, basınç hasar parametresi ve çekme hasar parametresi Şekil 11'de tanımlanmıştır. Betonun maksimum yüke ulaştıktan sonraki davranışını incelemek ve muhtemelen oluşacak olan yakınsama problemlerinin önüne geçmek için Hognestad beton gerilme-deformasyon eğrisi [92] birçok araştırmacı tarafından ABAQUS modellerine yüksek gerinim (strain) değerlerine kadar tanımlanmaktadır [93-97].

Çelik ise B420c malzeme özelliklerine göre modellenmiştir. Akma dayanımı 420 MPa, çekme dayanımı 560 MPa, elastisite modülü 200 GPa ve poisson oranı 0.3 olarak alınmıştır. ABAQUS’de malzeme modeline gerçek gerinim ve gerilme değerlerinin tanımlanması gerekmektedir. (15) ve (16) numaralı bağıntılar kullanılarak gerçek gerinim ve gerilme değerlerine dönüştürülmüştür. Halat için ise akma dayanımı 1500 MPa olarak tanımlanmıştır. Modelde halata öngerme sıcaklık verilerek uygulanmıştır.



Şekil 11 - Beton modeli için gerekli parametreler

$$\varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon) \quad (15)$$

$$\sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (16)$$

Deneysel çalışması yapılan bir adet CFRP ile güçlendirilmiş D3 aşık eleman da numerik olarak N3 ABAQUS’de modellenmiştir. CFRP modellemesi için Hashin hasar teorisi [98] kullanılmıştır. CFRP malzeme modellemesi için Gemi ve diğ. [79] çalışmasında kullanılan

Çizelge 3 - Elyaf modelinde kullanılan parametreler

Parametreler	Kısaltma	Değer
Elyaf doğrultusunda elastisite modülü	E_1 (GPa)	70000
Elyaf doğrultusuna dik doğrultuda elastisite modülü	E_2 (GPa)	6000
Poisson oranı	ν_{12}	0.30
Kayma modülü	G_{12} (GPa)	3000
Elyaf doğrultusunda çekme mukavemeti	X^T (MPa)	1450
Elyaf doğrultusunda basma mukavemeti	X^C (MPa)	1550
Elyaf doğrultusuna dik doğrultuda çekme mukavemeti	Y^T (MPa)	50
Elyaf doğrultusuna dik doğrultuda basma mukavemeti	Y^C (MPa)	70
Kayma mukavemeti	S (MPa)	40

Çizelge 4 - Numerik modellerin özellikleri

Numerik model	TS9967'ye ve BPEK-2018'e uygunluk	Beton dayanımı (MPa)	Çelik dayanımı (MPa)	Öngerme (kN)	FRP güçlendirme	Donatıda değişiklik
N1*	Evet	30	420	140	Yok	-
N2**	Hayır	30	420	140	Yok	-
N3***	Evet	30	420	140	Var (U sargılama)	-
N4	Hayır	20	420	140	Yok	-
N5	Hayır	40	420	140	Yok	-
N6	Hayır	30	500	140	Yok	-
N7	Hayır	30	420	200	Yok	-
N8	Hayır	30	420	100	Yok	-
N9	Hayır	30	420	140	Var (Yan Tam Sargılama)	-
N10	Hayır	30	420	140	Var (Yan Dik Şerit Sargılama)	-
N11	Hayır	30	420	140	Var (Yan Eğik Şerit Sargılama)	-
N12	Hayır	30	420	140	Yok	A_v yeri değiştirildi
N13	Hayır	30	420	140	Yok	l_b boyu kısaltıldı

*: D1 **:D2 ve ***:D3'e özdeş modellerdir.

kompozit malzemenin özellikleri tanımlanmış ve Çizelge 3’de verilen malzeme özellikleri kullanılmıştır. CFRP’nin modellenmesi dört düğüm noktalı kabuk elemanları (S4R) kullanılarak yapılmıştır. Gemi ve diğ. [79] prefabrikte aşıklarda görülen kesme hasarını engellemek için aşıkların uç kısımlarına $[\pm 45^\circ]$ konfigürasyonunda tabakalı CFRP kompozit kullanmışlardır. Yapılan deneysel çalışmada elyaf matris ara yüzey ayrılması (debonding) ve tabaka ayrılması (delaminasyon) hasarı gözlenmemiştir. Delaminasyon ve debonding ana hasar modu olmadığı durumlarda, FRP ve beton mükemmel yapışacak şekilde modellenebilir. Birçok araştırmada [93, 99-104] FRP ve beton mükemmel yapışacak şekilde modellenmiş ve deneysel sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu çalışmada da deneysel çalışmada debonding ve delaminasyon hasarı gözlenmediği için, numerik modelde CFRP betona mükemmel bir şekilde yapıştırılmış ve yapıştırıcı ayrıca modellenmemiştir. İnceltilmiş uçlu kirişlere ilave CFRP ankraj modellemesi de yapılmamıştır.

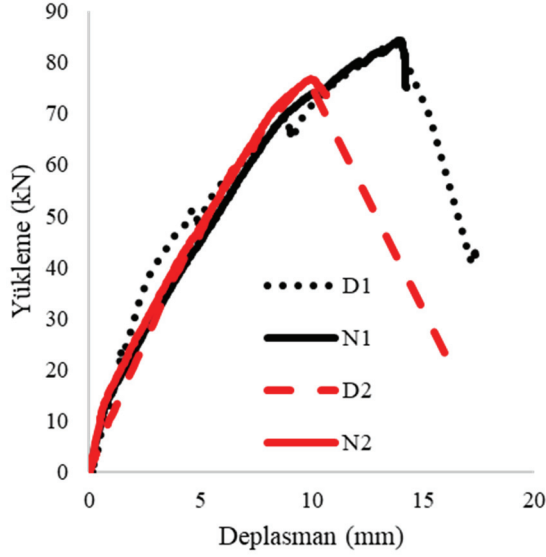
Bu çalışma kapsamında 3 tanesi doğrulama modeli olmak üzere toplam 13 adet numerik model tasarlanmıştır. İlk olarak TS 9967’ye ve BPEK-2018’e uygun D1 numunesi numerik (N1) olarak doğrulanmıştır. Daha sonra TS 9967’ye ve BPEK-2018’e uygun olmayan D2 numunesi numerik (N2) olarak doğrulanmıştır. Son olarak TS 9967’ye ve BPEK-2018’e uygun D3 numunesi numerik (N3) olarak doğrulanmıştır. Ardından sırasıyla Çizelge 4’de verilen parametrelere göre bir dizi numerik çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapılan numerik çalışmaların bir kısmı (N4-N8) aşıkların üretim aşamasında yapılabilecek müdahalelere yönelik iken diğer bir kısmı (N9-N11) sahada montajı tamamlandıktan sonra güçlendirilmesi gereken aşıklar için düşünülmüştür. Ayrıca yönetmeliklerdeki donatı düzenini iyileştirmek için birtakım çalışmalar (N12-N13) yapılmıştır.

3. BULGULAR

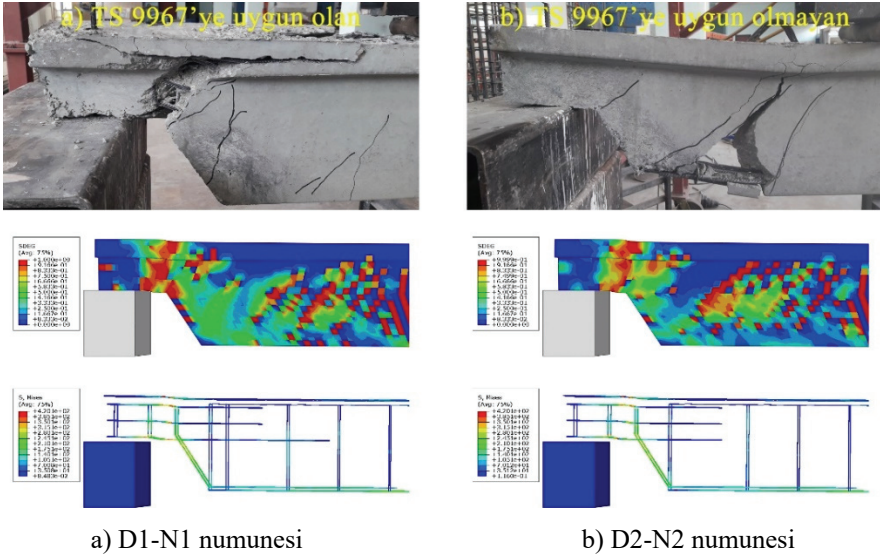
3.1. Deneysel ve Numerik Sonuçların Karşılaştırılması (D1-N1, D2-N2, D3-N3)

Yapılan deneysel ve numerik çalışmalar sonucunda TS 9967’ye BPEK-2018’e uygun olan (D1-N1) ve olmayan (D2-N2) aşık numunelerine ait yük ve deplasman grafikleri Şekil 12’de karşılaştırılmıştır. Deneysel çalışmada D1 numunesi D2’ye benzer şekilde kesme hasarına uğrayarak kapasiteye ulaşmış ancak %10 daha fazla yük taşıdığı gözlenmiştir. Ayrıca D2 numunesinde kesme hasarı inceltilmiş bölge dışında gerçekleşirken, D1 numunesinde hasar inceltilmiş bölgede meydana gelmiştir. Yapılan karşılaştırmada numerik çalışmaların deney sonuçları ile örtüştüğü görülmektedir (Şekil 12).

Şekil 13’de D1 ve D2 deney numuneleri ile N1 ve N2 numerik modellerin yükleme sonunda oluşan hasarları gösterilmiştir. Hem numerik model hem de deneysel çalışma için gösterilen hasarlar deney sonrası elde edilmiştir. ABAQUS’de çatlak mekanizması birçok araştırmacı tarafından SDEG (rijitlik kaybı) kullanılarak gösterilmiştir [105-107]. Burada 1 değeri tamamen hasarlı elemanı temsil ederken 0 değeri hasarsız elemanı temsil eder. Hem numerik modelde hem de deneyde görüldüğü üzere TS 9967’ye ve BPEK-2018’e uygun olmayan numunelerde uç bölgedeki hasara ilaveten faydalı yükseklik (d) kadar içeride 45 derecelik kesme hasarı (D2-N2) oluşmaktadır. Ayrıca Şekil 12’de yapılan karşılaştırmadan da görüldüğü üzere D1-N1 numunesinde fazladan kullanılan bir adet askı donatısının (A_v) hasarı sınırlandırıldığı anlaşılmaktadır.



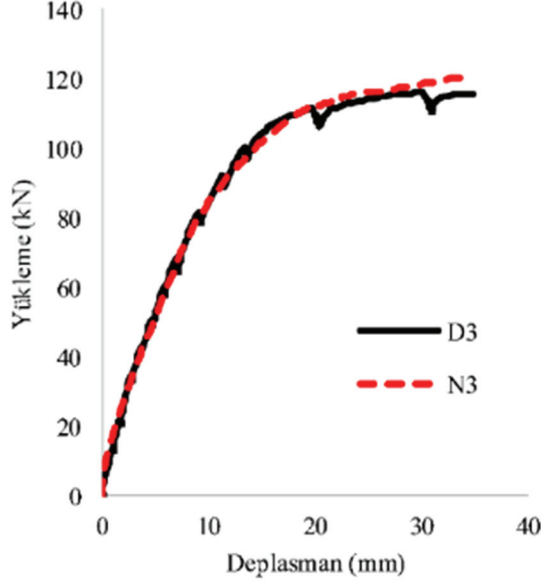
Şekil 12 - D1/N1 ve D2/N2 numunelerin deneysel ve numerik karşılaştırılması



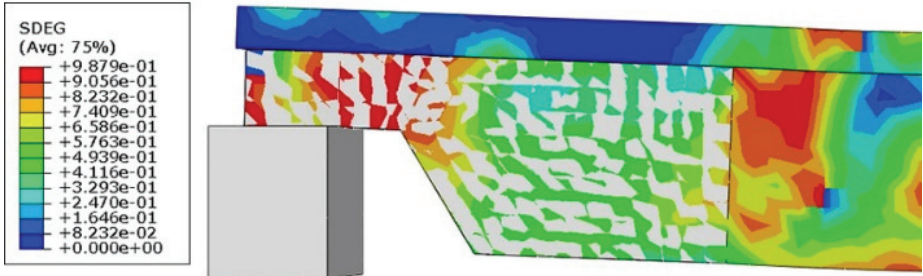
Şekil 13 - Standartlara a) uygun olan b) uygun olmayan numunelerde oluşan hasarlar

DeneySEL çalışmada (D3) $\pm 45^\circ$ elyaf konfigürasyonunda tabakalı 400 gr/m² karbon kumaş kullanılmıştır. CFRP uygulamalar için F-1564 reçine ve F-3486-3487 sertleştirici kullanılmıştır. DeneySEL çalışmada CFRP uygulamasının kirişin enerji tüketme kapasitesini artırdığı ve sünek davranışın gelişimine yol açtığı görülmüştür. Şekil 14’de Gemi ve diğ. [79] tarafından yapılan D3 numunesinin yük-deplasman sonuçları, numerik model ile elde edilen

sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Numerik model N3 de deney numunesi gibi sünek davranış sergilemiştir. N3'den elde edilen maksimum taşıma kuvveti (120 kN) deneyde görülen maksimum yük taşıma kapasitesinden (115 kN) %4 daha fazladır. Deneysel sonuçlar numerik model ile başarılı bir şekilde örtüşmüştür.



Şekil 14 - D3 ve N3 numunelerinin karşılaştırılması

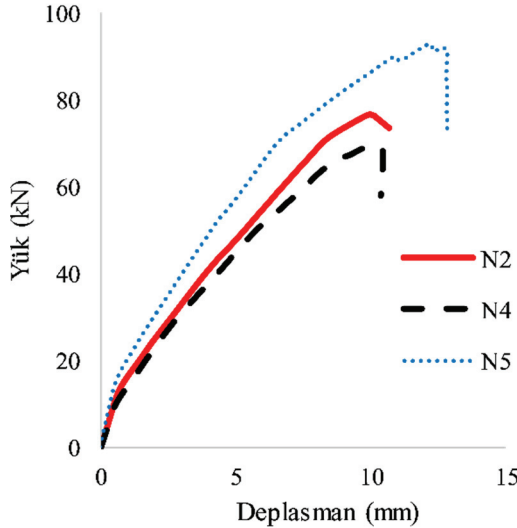


Şekil 15 - Güçlendirilmiş (D3) aşık modelinin numerik doğrulanması (N3)

Şekil 15’de CFRP sargılı deneysel numunede oluşan hasarlar ve N3 numerik modelde elde edilen hasar bölgeleri gösterilmiştir. N3’de oluşan beton hasar bölgesindeki gerilme dağılımı CFRP’nin sargı etkisiyle uç bölgedeki kesme davranışını eğilme davranışına doğru yönelttiği görülmüştür. Bu durum N3’de incelenmiş uç bölgesinde gerilme yoğunluğu olmasına rağmen CFRP sargılama ile giderildiği anlaşılmıştır. Bu sayede kirişin kesme kapasitesi artarak CFRP sargının bittiği yerden başlayan çekme çatlakları sonucu sünek davranışın geliştiği görülmüştür. Ayrıca sonuç hasarının hem numerik modelde hem deneysel çalışmada aynı bölgede gerçekleştiği görülmüştür.

3.2. Beton Basınç Dayanımı Değişiminin Numerik Olarak Karşılaştırılması (N2-N4-N5)

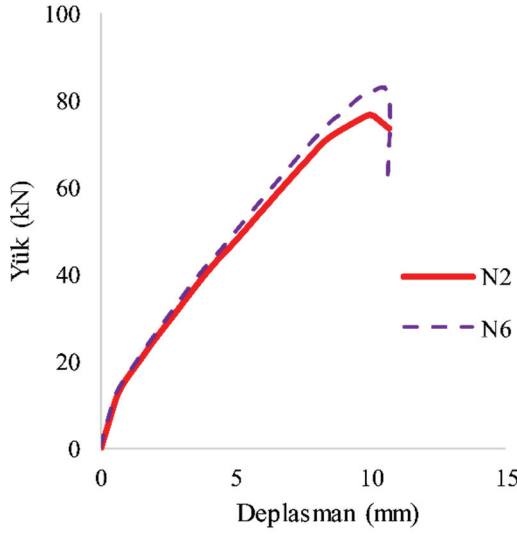
Deneysel çalışmada (D2) beton sınıfı C30 olarak dikkate alınmış ve buna göre numerik modelleme (N2) doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Burada beton sınıfı sırasıyla C20 (N4) ve C40 (N5) düşünülerek numerik analizler gerçekleştirilmiştir. N2, N4 ve N5 modellerin karşılaştırması Şekil 16’da gösterilmiştir. Numerik analizde N2 kendisi ile yalnızca beton sınıfı farklı olan N4 ve N5 ile karşılaştırıldığında, beton dayanımı 30 MPa’dan 40 MPa’ya çıktığında kesme kapasitesi %21 artarken, beton dayanımı 30 MPa’dan 20 MPa’ya indiğinde kapasitenin %10 azaldığı görülmektedir. Buradan beton sınıfının daha da artırılması durumunda betonun ezilmesinin gecikerek sünek davranışa yöneleceği anlaşılmaktadır. Ancak beton sınıfının çok yüksek seçilmesinin de ekonomik olmayacağı açıktır. Bu durum da uygulamada yaygın olarak kullanılan 40 MPa dayanıma sahip beton sınıfının yeterince uygun olduğu anlaşılmaktadır. Deneysel çalışmada yük transfer durumu dikkate alınarak ortalama beton dayanımı 30 MPa olarak seçilmiştir. Ayrıca imalat hatalarından dolayı beton dayanımının yerinde 20 MPa olması durumu ile halen firmaların tercih ettiği fabrika standardı olan 40 MPa beton sınıfı düşünülerek de analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 16 - N2/N4/N5 modellerin karşılaştırması

3.3. Donatı Akma Dayanımı Değişiminin Numerik Olarak Karşılaştırılması (N2-N6)

TS 9967 ve BPEK, 2018'e uygun olmayan deneysel çalışmanın (D2) doğrulaması (N2) yapıldıktan sonra yalnızca donatı dayanımının değişimi ile karşılaştırma yapılmıştır. Şekil 17'de donatı kalitesinin değişimine yönelik karşılaştırma gösterilmiştir. Burada çekme donatı akma dayanımı 420 MPa olan N2 numunesi, akma dayanımı 500 MPa olan N6 numunesi ile karşılaştırılmıştır. Diğer tüm parametrik özellikleri aynı olan N2 ve N6 karşılaştırıldığında yalnızca donatı kalitesinin yüksek olduğu N6 numunesinde kesme kapasitesinin N2'ye göre %8 artış sağladığı görülmüştür. Bu durum da uygulamada standart aşıklarda kullanılan donatı kalitesinin değiştirilmesinin çok da etkili olmadığı söylenebilir.



Şekil 17 - N2 ve N6 modellerin karşılaştırması

3.4. Öngerme Kuvveti Değişiminin Numerik Olarak Karşılaştırılması (N2-N7-N8)

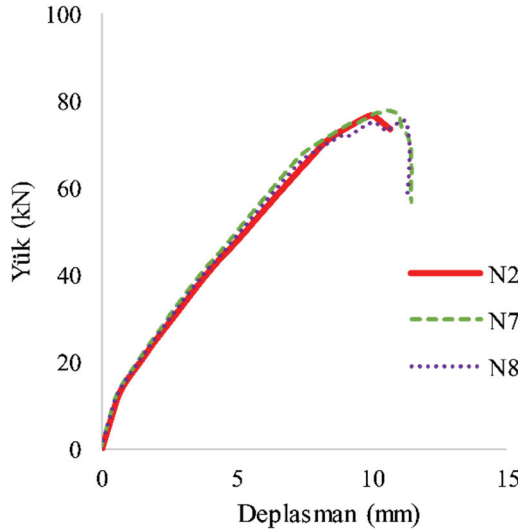
Uygulamada genellikle aşık elemanların beton sınıfı, çelik sınıfı ve ön germe nihai halat kapasitesi (% f_{pu}) değişmemektedir. Özellikle ön germe halatları azami yük taşıyacak şekilde hesaplanmakta ve ekonomik olması için %65-70 f_{pu} oranında gerilmektedir. TS 3323 [37] ve AASHTO [108] rötre ve sünmeden kaynaklanan kayıplardan önce geçici emniyet gerilmelerinin gerilmenin yapılacağı andaki dayanım baz alınmak kaydıyla basınç gerilmesi olarak $0.6f_c$, servis yükleri altında kayıplardan sonra emniyet gerilmeleri 28 günlük basınç dayanımı baz alınmak kaydıyla $0.4f_c$ olarak kabul edilmektedir. Benzer şekilde çekme gerilmesi içinde $0.6\sqrt{f_c}$ baz alınmaktadır.

Aşıklarda kullanılan ve genellikle standart olan $\frac{1}{2}$ " (12.7 mm çapında) bir halatın akma ve kopma gerilmelerinin 1250 MPa ve 1450 MPa olduğu düşünüldüğü zaman bu halata uygulanabilecek olan teorik kuvvetin maksimum değeri akma anında 160 kN kopma anında ise 184 kN'dir. Aşıklarda ters sehimi sınırlandırmak ve yukarıda belirtilen gerilme

seviyelerinde kalmak için uygulamada öngerme kuvvetleri 100 ila 160 KN arasında kalmaktadır. Bu nedenle numerik çalışmada uygulamadaki mevcut kullanım dışındaki halleri parametre olarak dikkate alınmış ve uygulamada genellikle kabul gören kullanım değerlerine göre analiz edilmiştir.

Numerik çalışmada uygulamadaki mevcut kullanım dışındaki halleri parametre olarak dikkate alınmış ve uygulamada kabul gören kullanım değerleri analiz edilmiştir. Tasarımda bu kapasite değişmiyor olsa da bazı durumlarda kesitlerde ön germe kayıpları yaşandığı ya da fazla öngerme verilebileceği durumlardaki değişim gözlenmek istendiğinden dikkate alınmıştır.

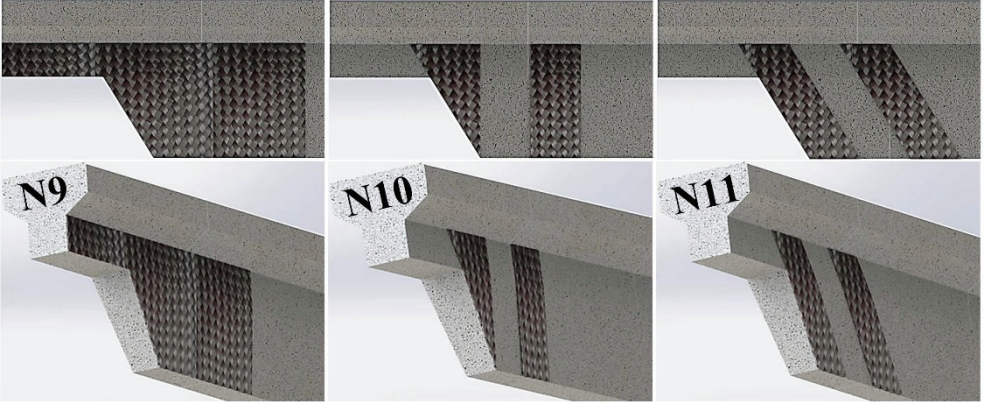
Analiz sonuçların Şekil 18’de karşılaştırma olarak verilmiştir. Burada N2 ile tüm özellikleri aynı olan yalnızca öngerme kapasitesi artırılan N7 ve azaltılan N8 numunelerin kapasitesinde belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir. Kapasitelerde bu oranda farklılığın oluşmasının temel sebebi aşkın eğilme davranışını göstermeden kesmeden dolayı göçmesidir. Bu durumda öngerme kapasite değişiminin kesme kapasitesine ciddi bir katkı sağlamadığı görülmüştür. Bu durum da uygulamada yaygın olarak kullanılan ön germe halatları için dikkate alınan kapasite değerlerinin uygun olduğu söylenebilir.



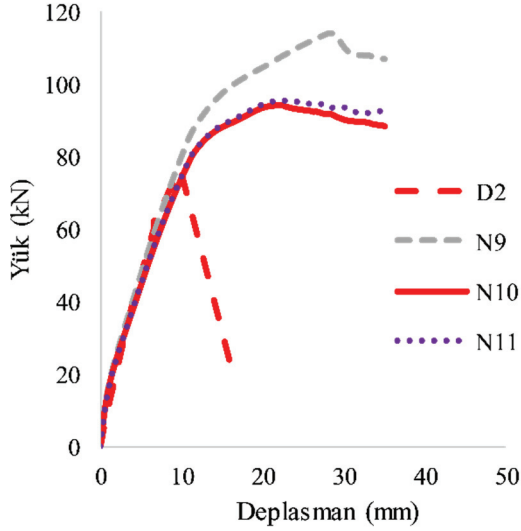
Şekil 18 - N2/N7/N8 modellerin karşılaştırması

3.5. CFRP Sargılamasının Değişiminin Numerik Olarak Karşılaştırılması ve Güçlendirme Uygulamaları İçin Çözüm Önerileri (D2-N9-N10-N11)

Deneyssel kısımda test edilen ve tam sargılı olarak (numuneyi U şeklinde saran) CFRP uygulaması gerçekleştirilen D3 numunesinin kesme kapasitesini önemli oranda artırdığı görülmüştü. Laboratuvar şartlarında yapılan bu uygulamanın aslında uygulamada çatı



Şekil 19 - Önerilen güçlendirilmiş yeni numerik modeller



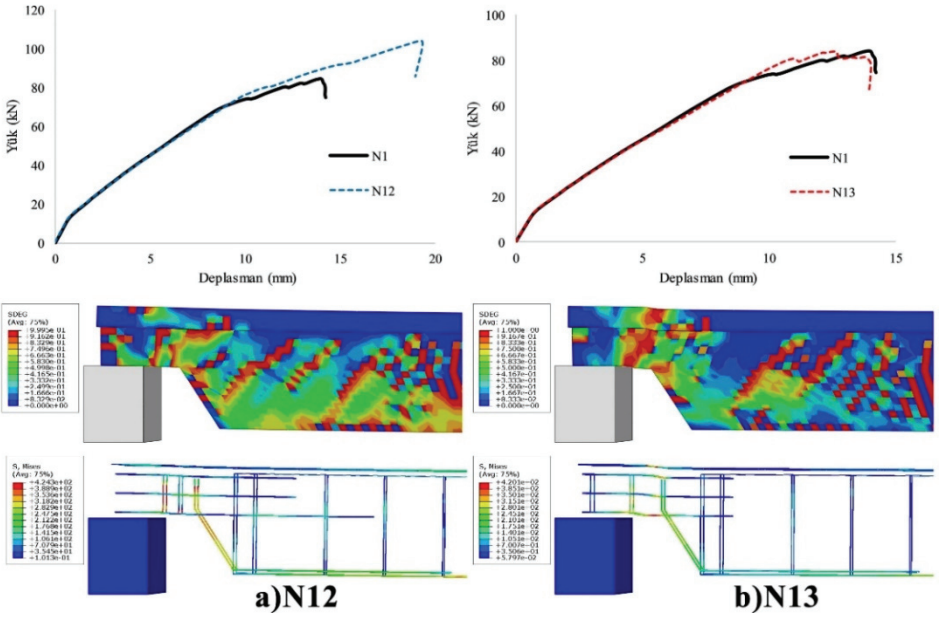
Şekil 20 - D2/N9/N10/N11 modellerin karşılaştırması

kaplamasının ve aşıkların de-montajına gerek duyulacağı için çok pratik olmayacağı düşüncesiyle Şekil 19'da verilen alternatif CFRP güçlendirme modelleri için bir dizi parametrik çalışma yapılmıştır. Burada hem pratik uygulanabilir hem de daha az karbon kumaş kullanarak kesme kapasitesini artırmak amaçlanmıştır. Şekil 20'de yapılan karşılaştırmalarda CFRP'nin farklı yerleşim durumunda kesme kapasitesini D2'ye göre artırdığı ve uygulamada tercih edilebileceği görülmektedir. Bunun için ilk olarak N9 numunesinde kiriş yan yüzeylerine tamamen CFRP sargılaması uygulanmıştır. İkinci olarak N10 numunesinde N9 ile aynı konfigürasyonda parçalı şerit şeklinde CFRP uygulaması

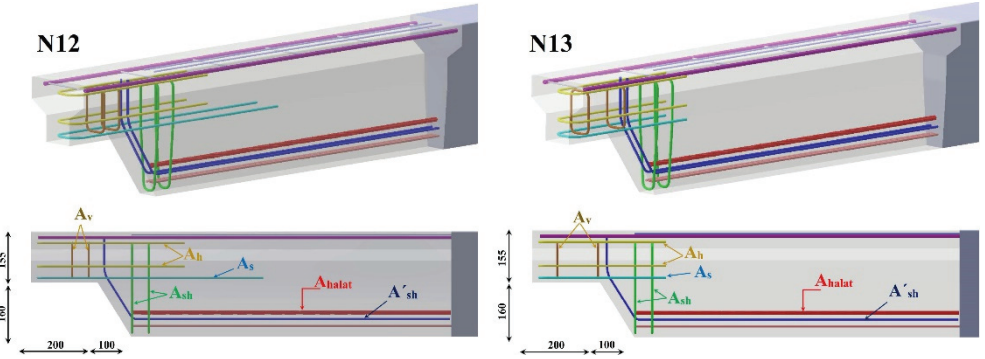
yapılmıştır. Son olarak N11 numunesinde aynı karbon kumaş yaklaşık 45°'lik açı ile uygulanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Yapılan numerik analizde N9 numunesinin kapasitesi N10 ve N11'e göre belirgin artış sağlamıştır. N9 numunesi sargı etkisiyle 113.8 kN yük ve 28.5 mm deplasman seviyesinde kesmeli eğilme hasarına uğramıştır. CFRP uygulaması kapasitede referans numuneye göre %50'lik artış sağlamıştır. Aynı zamanda davranış gevrekten sünek davranışa yönelmiştir. N10 ve N11 numunelerinde ise yaklaşık 95 kN yük ve 22 mm deplasman seviyesinde sargı etkisinin azalmasıyla kiriş göçme konumuna ulaşmıştır. CFRP uygulamalarında beton ile mükemmel yapışma kabul edildiğinden ilave ankraj detayı dikkate alınmamıştır. D3 numunesinde elde edilen gözlemler tam sargı (U şeklinde) neticesinde beton ile CFRP arasında iyi bir ara yüzeyin oluştuğu görüldüğünden bu modellerde ankraj uygulaması da düşünülmemiştir. N9 numunesi deneysel olarak doğrulanan N3 numunesi ile karşılaştırıldığında çekme bölgesine CFRP uygulaması yapılmadığı halde yük taşıma kapasitelerine ve deplasman değerlerine yaklaşmıştır. Bu değerler sırasıyla N9 için 113.8 kN ve 28.5 mm iken N3 için 120.6 kN ve 34.3 mm'dir. Dolayısıyla bu durum önerilen yeni CFRP yerleşiminin uygulanabileceğini göstermektedir. N10 ve N11 numunelerinin düşük çıkması uygulama yüzey alanının azalmasından kaynaklandığı söylenebilir. Bu numuneler için uygulamada ankraja ihtiyaç duyulabilir [109]. Bunun için N10 ve N11 numunelerinin uygulanması durumunda ankraj görevi yatay doğrultuda CFRP uygulaması ya da mekanik ankraj uygulaması yapılması önerilmektedir [110-118].

3.6. Donatı Detayı Değişiminin Numerik Olarak Karşılaştırılması ve Yeni Yapılacak Aşıklar İçin Çözüm Önerileri (N1-N12-N13)

Yapılan kapsamlı numerik analiz çalışmaları sonucunda uygulamada aşıkların üretim aşamasında dikkate alınması için bir takım çözüm önerileri sunulmuştur. Bunun için standartlarda verilen mevcut donatı düzenini geliştirmek için iki farklı model önerilmektedir. Bu modeller geliştirilirken Şekil 13'de verilen donatı gerilmeleri göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 13'de görüldüğü üzere A_v etriyesi ile A'_{sh} donatısı arasında kalan donatılarda yoğun gerilmeler oluşmaktadır. En uç bölgede kalan A_v etriyesinde ise herhangi bir gerilme gözlenmemiştir. Bu etriye daha çok montaj kaygısı nedeniyle kullanılmamaktadır. Bu çalışmada bu etriyenin Şekil 21'deki gibi A_v ile A'_{sh} donatısı arasına yerleştirilmesi önerilmiştir. Montaj için ise üstteki ve alttaki donatılar L şeklinde kanca yapılarak son nokta teşkil edilebilir. Referans numunesi olan N1 numunesi 84.2 kN yükte ve 14.8 mm deplasmanda maksimum yüke ulaşırken önerilen N12 numunesi 103.9 kN yükte ve 19.2 mm deplasman değerinde maksimum yüke ulaşmıştır. Bu da yük kapasitesinde %24'lük ve deplasman kapasitesinde %30'luk artışa tekabül etmektedir. Önerilen ikinci alternatif ise yük ve deplasman değerinde değişiklik olmadan gereksiz donatıyı azaltmaya yöneliktir. Bu öneride A_s ve A_h donatılarının kenetlenme boyu üzerinde birtakım modeller oluşturulmuştur. Şekil 13'de görüldüğü üzere bu donatılar üzerinde gerilmenin oldukça düşük olduğu bölgeler vardır. Bu durum göz önüne alınarak deneme-yanılma yöntemiyle yük ve deplasman değerinde değişiklik olmayacak şekilde bir dizi numerik analizler gerçekleştirilerek optimum kenetlenme boyu elde edilmeye çalışılmıştır. Optimum sonuca 100 mm kenetlenme boyu ile edilmiştir. Şekil 21'de elde edilen yük-deplasman değerleri karşılaştırılmıştır. Şekil 21b'de görüldüğü üzere maksimum yük ve maksimum yüke tekabül eden deplasman değerleri arasındaki fark belirgin derecede değildir. Şekil 22'de N12 ve N13 numunelerinin donatı detayları gösterilmiştir.



Şekil 21 - Önerilen donatı detayları



Şekil 22 - Numerik modeller sonucunda önerilen yeni donatı detayı

4. TARTIŞMA, SONUÇLAR VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

Bu çalışmada düşey yük etkisi altında deneysel sonuçları elde edilen inceltilmiş uçlu aşık kirişlerinin üç boyutlu sonlu eleman modelinde numerik karşılaştırılması yapılmıştır. Daha sonra farklı parametreler kullanılarak numerik çalışma geliştirilmiştir. Numerik hesaplamalar sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Önerilen sonlu eleman modelleme yaklaşımı, düşey yükler etkisi altında olan inceltmiş uçlu aşık kirişlerin davranışlarını gözlemek için kullanılabilir durumdadır.
- Modellenen her bir malzemenin davranışı tanımlanan ağ boyutlarına bağlıdır. Burada tanımlanan ağ boyutlarının uygun olduğu görülmektedir.
- Sonlu eleman analizi gerçekleştirilen kirişlerde beton modeline uygun parametrelerin seçilmesi davranışı etkileyeceğinden dikkat edilmelidir.
- Sonlu eleman analizleri ile yük-deplasman eğrileri, beton, çelik, diğer malzemelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkileri ve çatlak oluşum yerleri gösterilebilir olduğundan maliyetli deneysel çalışmalara alternatif olarak kullanılabilir.
- Yapılan saha çalışmalarında özellikle hasar gören aşıkların bir kısmında aşık uç donatı düzenlerinin yetersiz olduğu ve beton basınç dayanımlarının projede öngörülen değerin oldukça altında kaldığı görülmüştür. Bu nedenle çalışmada; aşıkların modellenmesinde özellikle aşıkların uç donatılarında bazı değişikliklere de gidilmiştir.
- Beton dayanımının düşürülmesi (N4) kapasiteyi düşürmekte ve yükseltilmesi (N5) de kapasiteyi artırmakta olduğu numerik model üzerinden rahatlıkla görülebilmektedir. Benzer durum donatı kalitesi içinde söylenebilir.
- Ön germe halat kapasitesinin artırılması (N7'den N8'e geçilmesi), kiriş kesme kapasitesi ve deplasman yapma kabiliyetini yok denecek kadar az değiştirmiştir (yaklaşık %1).
- Yapılan numerik modelleme sonucunda inceltmiş mevcut aşıklar için uç bölgesinde oluşan kesme hasarını önlemeye yönelik CFRP sargılanmasının oldukça başarılı olduğu söylenebilir.
- Çalışmada test edilen D3 numunesi sadece deneysel çalışma için kurgulanmıştır. Uygulamada özellikle mesnet bölgelerinde aşığın kaldırılmadan uygulanması mümkün olmayacaktır. Bunun için numerik analiz kısmında aşıkların yerinden kaldırılmaması adına farklı tip güçlendirme modelleri numerik olarak analiz edilmiş ve kapasiteyi artırıcı sonuçlara ulaşılmıştır. Bu tip güçlendirme yöntemlerinin uygulamada kullanılabileceği önerilmektedir.
- Önerilen CFRP uygulaması yük taşıma kapasitesini %50 artırmıştır. Aynı zamanda aşık uçlarındaki gevrek kesme kırılması engellenmiş açıklık donatısının akmasıyla sünek davranış ortaya çıkmıştır.
- Uçta kalan A_v etriyesi gerilmelerin en yoğun olduğu yere taşınması önerilerek kapasitede %24'lük bir artış sağlanmıştır.
- Kenetlenme boyunun 100 mm'e düşürülerek kapasitede bir değişiklik olmadan donatı miktarının azaltılması önerilmiştir.

Uygulamada kar yükünün çatının bazı bölgelerinde birikmesi, uzun süreli kalması, karın birim ağırlığının zamanla artması, kar ile beraber rüzgârında etki etmesi gibi nedenlerden dolayı yükler tasarımcının hesap değerlerinin oldukça üzerine çıkabilmektedir. Bu durumda

da aşık uçlarında kesme kırılmaları meydana gelmektedir. Bu çalışma ışığında özellikle fazla yüklü aşıklarda aşık boyutlarında mimari ve üretim sebeplerinden dolayı bir değişiklik yapılamayacaksa CFRP uygulaması ile aşığın yük taşıma kapasitesinde ve sünekliğinde önemli iyileşmelerin olacağı görülmüştür.

Burada CFRP uygulamasının ekonomik bir çözüm olup olmayacağını tartışmak gerekmektedir. Sanayi yapılarında aşık sistemlerinin sökülmesi için ilk olarak mevcut çatı kaplamasının sökülmesi, daha sonra aşığın tepe kirişle olan ve pimler yardımıyla sağlanmış birleşim bölgelerinden alınması ve yeni aşığın eğer zarar görmediyse mevcut pimplere tekrar oturtularak eski çatı kaplamasıyla aşıkların kapatılması gerekmektedir. Bu işlemlerin mevcut kaplamaya, pimplere ve çatı kirişine zarar verme ihtimali düşünülmelidir. Bu imalat yerine mevcut aşık korunarak kaplama açılmadan fabrika içinde yapılabilecek CFRP takviyesi aşık performansını olumlu etkileyeceği için tercih sebebi olabilir.

Bu çalışma neticesinde yapılacak gelecek çalışmalarda, inceltilmiş uç bölgesinin farklı lifli polimer malzemeler ile sarılması ve malzemelerin birden çok katmanlı uygulanması durumunda kesme kapasitesinin değişimi araştırılabilir.

Teşekkür

Yazarlar numunelerin üretilmesini sağlayan Yardımcı Prefabrik Yapı Elemanları A.Ş.'ye teşekkür ederler.

Kaynaklar

- [1] Günerman, H., Prefabrikte Bina Sistemleri. Prefabrikte İnşaat Teknolojileri Sempozyumu, 23-6, 1997.
- [2] Şenel, Ş.M., Palanci, M., Kalkan, A., Yılmaz, Y., Mevcut Prefabrik Binaların Mafsallı Birleşimlerinin Kesme ve Devrilme Güvenliğinin Araştırılması, Teknik Dergi, 24, 119, 2013.
- [3] Taştekin, M.S., Sanayi yapılarında prefabrik betonarme ve çelik konstrüksiyon uygulamalarının ekonomik yönden karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [4] Reynolds, G., The strength of half-joints in reinforced concrete beams, Cement and Concrete Association, 1969.
- [5] Mattock, A.H., Chan, T.C., Design and behavior of dapped-end beams, PCI journal, 24, 28-45, 1979.
- [6] Mattock, A., Theyo, T., Strength of Prestressed concrete members with dapped ends-reply, Journal Prestressed Concrete Institute, 32, 120-1, 1987.
- [7] Solanki, H., Strength of Prestressed Concrete Members with Dapped Ends-Comment, Journal Prestressed Concrete Institute, 32, 119-20, 1987.
- [8] Shakir, Q.M., Reinforced Concrete Dapped End Beams–State of the Art, International Journal of Applied Science, 1, 2, 44-57, 2018.

- [9] Ahmad, S., Elahi, A., Junaid, H.M.F., Ahsan, Z., Evaluation of the shear strength of dapped ended beam, *Life Science Journal*, 10, 1038-44, 2013.
- [10] Yazman, Ş., Aksoylu, C., Özkılıç, Y., Gemi, L., Arslan, M.H., Sanayi Yapılarında Kullanılan Betonarme Prefabrike Öngerilmeli Aşıkların Kesme ve Eğilme Kapasitelerini Artırmaya Yönelik CFRP Uygulaması, *International Science and Academic Congress (INSAC'19)*, 292-8, 2019.
- [11] Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y., Gemi, L., Arslan, M.H., İnceltilmiş Uçlu Betonarme Prefabrik Aşıkların Kesme Kapasitelerinin CFRP uygulaması ile Artırılması. *International Science and Academic Congress(INSAC'19)*, 285-91, 2019.
- [12] Özkılıç, Y., Aksoylu, C., Yazman, Ş., Gemi, L., Arslan, M.H., Prefabrike İnceltilmiş Aşık Uçlarının Deneysel ve Numerik Sonlu Eleman Analizlerinin Karşılaştırılması. *International Science and Academic Congress(INSAC'19)*, 299-307, 2019.
- [13] Hwang, S-J., Lee, H-J., Strength prediction for discontinuity regions by softened strut-and-tie model, *Journal of Structural Engineering*, 128, 1519-26, 2002.
- [14] Aksoylu, C., Özkılıç, Y.O., Yazman, Ş., Gemi, L., Arslan, M.H., The Numerical Study of The Effects of Steel Reinforcement Ratio to Behavior of Prefabricated Purlins, *2nd International Congress on Engineering and Architecture (ENAR)*, 1759-65, 2019.
- [15] Aswin, M., Mohammed, B.S., Liew, M., Imam, Z.S., Root cause of reinforced concrete dapped-end beams failure, *Abu Dhabi University*, 2015.
- [16] Aswin, M, Mohammed BS, Liew M, Syed ZI. Shear failure of RC dapped-end beams. *Advances in Materials science and engineering*, 11, 2015.
- [17] Aswin, M., Syed, Z.I., Wee, T., Liew, M.S., Prediction of failure loads of RC dapped-end beams, *Applied Mechanics and Materials, Trans Tech Publ*, 567, 463-8, 2014.
- [18] Atta, A., Taman, M., Innovative method for strengthening dapped-end beams using an external prestressing technique, *Materials and Structures*, 49, 3005-19, 2016.
- [19] Hussain, H.N., Shakir, Q.M., Experimental Study of the Behavior of Reinforced Concrete Beams with Composite Dapped End under Effect of Static and Repeated Loads, *International Journal of Applied Science*, 2, 43-55, 2019.
- [20] Kotsovovs, G.M., Cotsovovs, D.M., Half-joint beam design based on the CFP theory, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 768-777, 2019.
- [21] Lin, I-J., Hwang, S-J., Lu, W-Y., Tsai, J-T., Shear strength of reinforced concrete dapped-end beams, *Structural Engineering and Mechanics*, 16, 275-94, 2003.
- [22] Lu, W.Y., Lin, I.J., Hwang, S.J., Lin, Y.H., Shear strength of high-strength concrete dapped-end beams, *Journal of the Chinese Institute of Engineers*, 26, 671-80, 2003.
- [23] Lu, W-Y., Lin, I-J., Yu, H-W., Behaviour of reinforced concrete dapped-end beams, *Magazine of Concrete Research*, 64, 793-805, 2012.

- [24] Mata-Falcón, J., Pallarés, L., Miguel, P.F., Proposal and experimental validation of simplified strut-and-tie models on dapped-end beams, *Engineering Structures*, 183, 594-609, 2019.
- [25] Moreno-Martínez, J.Y., Meli, R., Experimental study on the structural behavior of concrete dapped-end beams, *Engineering Structures*, 75, 152-63, 2014.
- [26] Nagrodzka-Godycka, K., Piotrkowski, P., Experimental Study of Dapped-End Beams Subjected to Inclined Load, *ACI Structural Journal*, 109, 11-20, 2012.
- [27] Peng, T., Influence of detailing on response of dapped-end beams [Ms Thesis], McGill University Montréal, Canada, 2009.
- [28] Rymeš, J., Štemberk, P., Kohoutkova, A., Experimental Analysis of Strengthening of Dapped-End Beams, *Key Engineering Materials: Trans Tech Publ*, 241-6, 2017.
- [29] Shakir, Q.M., Alliwe, R., Behavior of Self-Compacting Reinforced Concrete Dapped End Beams, *International Journal of Applied Science*, 2, 43-55 , 2019.
- [30] Syed, Z.I., Sami, E., Ahmed, M.O., Modelling of Dapped-End Beams under Dynamic Loading, Abu Dhabi University, 2017.
- [31] Özkılıç, Y., Aksoylu, C., Yazman, Ş., Gemi, L., Arslan M.H., The Effects of Material Properties and Pretension to Behavior of Prefabricated Purlins, 2nd International Congress on Engineering and Architecture (ENAR), 1754-8, 2019.
- [32] Yazman, Ş., Aksoylu, C., Özkılıç, Y.O., Gemi, L., Arslan, M.H., Experimental and Numerical Investigation of Prefabricated Thinned Ended Purlins with and without CFRP Composites, 2nd International Congress on Engineering and Architecture (ENAR), 575-9, 2019.
- [33] Yang, K-H., Ashour, A.F., Lee, J-K., Shear strength of reinforced concrete dapped-end beams using mechanism analysis, *Magazine of Concrete Research*, 63, 81-97, 2011.
- [34] Aksoylu C, Özkılıç YO, Arslan MH. Damages on Prefabricated Concrete Dapped-End Purlins due to Snow Loads and a Novel Reinforcement Detail. *Engineering Structures*. 225, 2020.
- [35] Handbook PD., Precast and prestressed concrete. Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 1999.
- [36] TS9967., Yapı Elemanları, Taşıyıcı Sistemler ve Binalar-Prefabrike Betonarme ve Öngerilmeli Betondan-Hesap Esasları ile İmalat ve Montaj Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, İstanbul, 1992.
- [37] TS3233., Öngerilmeli Yapıların Hesap ve Yapım Kuralları, Türk Standartları Enstitüsü. 1-44, 1979.
- [38] Barka, G., Ataköy, H., Yüksel, E., Beton Prefabrikasyon El Kitabı, Tasarım, Üretim ve Montaj Esasları, Türkiye Prefabrik Birliği, 2018.
- [39] TBDY2019., Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Deprem Etkisi Altında Binaların Tasarımı İçin Esaslar, Ankara.

- [40] Standard T., Eurocode 1-Actions on structures-Part 1-3, General actions-Snow loads (TS EN 1991-1-3), Institute of Turkish Standard (TSE), Ankara, Turkey. 2007.
- [41] Chen, B.S., Hagenberger ,M.J., Breen, J.E., Evaluation of strut-and-tie modeling applied to dapped beam with opening, *Structural Journal*, 99, 445-50, 2002.
- [42] Committee, A., Standardization IOF. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary, American Concrete Institute, 2008.
- [43] Gundogan, G., İnceltmiş Uçlu Prefabrikte Kiriş Birleşimlerinin Türk (TS9967) ve Amerikan (PCI) Yönetmelikleriyle Karşılaştırılması [Yüksek Lisans], Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [44] Enstitüsü TS., TS 500 Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları, Ankara, Türkiye, 2000.
- [45] Aksoylu, C., Kara, N., Strengthening of RC frames by using high strength diagonal precast panels, *Journal of Building Engineering.*, 31, 101338, 2020.
- [46] Aksoylu, C., Sezer, R., Investigation of precast new diagonal concrete panels in strengthened the infilled reinforced concrete frames, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22, 236-46, 2018.
- [47] Aksoylu, C., Kara, N., Güçlendirme Tekniği Olarak Yeni Nesil Ön Üretimli Beton Panel Uygulamasının Araştırılması, *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7, 346-61, 2019.
- [48] Madenci, E., Özkılıç, Y.O., Gemi, L., Experimental and theoretical investigation on flexure performance of pultruded GFRP composite beams with damage analyses, *Composite Structures*, 242, 112162, 2020.
- [49] Özkılıç, Y.O., Madenci, E., Gemi, L., Tensile and Compressive Behaviors of the Pultruded GFRP Lamina, *Turkish Journal of Engineering (TUJE)*, 4, 169-75, 2020.
- [50] Ghatte, H.F., Comert, M., Demir, C., Akbaba, M., İlki, A., Seismic Retrofit of Full-Scale Substandard Extended Rectangular RC Columns through CFRP Jacketing, Test Results and Design Recommendations, *Journal of Composites for Construction*, 23, 04018071, 2019.
- [51] Cosgun, C., Cömert, M., Demir, C., İlki, A., Seismic Retrofit of Joints of a Full-Scale 3D Reinforced Concrete Frame with FRP Composites, *Journal of Composites for Construction*, 23, 04019004, 2019.
- [52] Ates, A.O., Khoshkholghi, S., Tore, E., Marasli, M., İlki, A., Sprayed Glass Fiber-Reinforced Mortar with or without Basalt Textile Reinforcement for Jacketing of Low-Strength Concrete Prisms, *Journal of Composites for Construction*, 23, 04019003, 2019.
- [53] Köroğlu, M.A., Ceylan, M., Arslan, M.H., İlki, A., Estimation of flexural capacity of quadrilateral FRP-confined RC columns using combined artificial neural network, *Engineering Structures*, 42, 23-32, 2012.

- [54] Ilki, A., Bedirhanoglu, I., Kumbasar, N., Behavior of FRP-Retrofitted Joints Built with Plain Bars and Low-Strength Concrete, *Journal of Composites for Construction*, 15, 312-26, 2011.
- [55] Ilki, A., Demir, C., Bedirhanoglu, I., Kumbasar, N., Seismic Retrofit of Brittle and Low Strength RC Columns Using Fiber Reinforced Polymer and Cementitious Composites, *Advances in Structural Engineering*, 12, 325-47, 2009.
- [56] Arslan, M.H., Aksoylu, C., Gemi, L., Yazman, Ş., Özkılıç, Y.O., Effect of Circular Holes in Shear Region on the Behavior of CFRP Strengthened RC Beams, 4th Eurasian Conference on Civil and Environmental Engineering (ECOCEE), İstanbul, 860-5, 2019.
- [57] Çetinkaya, N., Kaplan, H., Şenel, Ş.M., Betonarme Kirişlerin Lifli Polimer (FRP) Malzemeler Kullanılarak Onarım ve Güçlendirilmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 10, 291-8, 2011.
- [58] Ertürkmen, D., Dünder, C., Tokgöz, S., Karbon lifli polimer sargılı standart silindirik beton numunelerin aksel yük altındaki davranışlarının incelenmesi, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23, 679-86, 2017.
- [59] Gemi, L., Köroğlu, M.A., Çekme Bölgesi Lifli Beton Olan Cam Fiber Takviyeli Polimer (GFRP) ve Çelik Donatılı Etriyesiz Kirişlerin Eğilme Etkisi Altındaki Davranışı ve Hasar Analizi, *S.Ü Müh Bilim ve Tekn Derg.*, 6, 654-67, 2018.
- [60] Gemi, L., Köroğlu, M.A., Ashour, A., Experimental study on compressive behavior and failure analysis of composite concrete confined by glass/epoxy±55 filament wound pipes, *Composite Structures*, 187, 157-68, 2018.
- [61] Gemi, L., Madenci, E., Özkılıç, Y.O., An Investigation on Effect of Steel/Glass Fiber Bars in Concrete Beams, *VI International Earthquake Symposium (IESKO 2019)*, 651-6, 2019.
- [62] Gemi, L., Özkılıç, Y.O., Madenci, E., Investigation of Flexural Behavior of FRP Wrapped and Concrete Filled GFRP Box Profile Beams, *VI International Earthquake Symposium (IESKO 2019)*, 605-10, 2019.
- [63] Kang, T.H-K., Ary, M.I., Shear-strengthening of reinforced & prestressed concrete beams using FRP: Part II—Experimental investigation. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 6, 49-57, 2012.
- [64] Kuntal, V.S., Chellapandian, M., Prakash, S.S., Efficient near surface mounted CFRP shear strengthening of high strength prestressed concrete beams—An experimental study, *Composite Structures*, 180, 16-28, 2017.
- [65] Özcan Z, Yöntem K. Betonarme Kirişlerin Kompozit Malzemeler ile Güçlendirilmesi, *Deprem Sempozyumu*, 1016-1022, 2005.
- [66] Özkılıç, Y.O., Madenci, E., Gemi, L., Performance of Pultruded Glass Fiber Reinforced Polymer Composite Beams under Quasistatic Load, *In The 5th International Conference on Engineering Science (ICES-2019)*, 2019.
- [67] Pohl, G., *Textiles, Polymers and composites for buildings*, Elsevier, 2010.

- [68] Sayın, B., Manisalı, E., Lif Takviyeli Plastik Levhalar ile Güçlendirilmiş Betonarme Kirişlerde Arayüz Gerilmelerini Etkileyen Parametreler, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16, 63-75, 2010.
- [69] Soyaslan, A.E., Demiray, D., Tekstil Malzemelerinin İnşaat Mühendisliği Uygulamaları, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7, 29-34, 2016.
- [70] Aytaç, E., CFRP güçlendirme malzemesi ve güçlendirme teknikleri [Yüksek Lisans Tezi], Dokuz Eylül Üniversitesi, 2011.
- [71] Gemi, L., Investigation of the effect of stacking sequence on low velocity impact response and damage formation in hybrid composite pipes under internal pressure, A comparative study, Composites Part B, Engineering, 153, 217-32, 2018.
- [72] Morkavuk, S., Köklü, U., Bağcı, M., Gemi, L., Cryogenic machining of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) composites and the effects of cryogenic treatment on tensile properties, A comparative study. Composites Part B, Engineering, 147, 1-11, 2018.
- [73] Özütok, A., Madenci, E., Static analysis of laminated composite beams based on higher-order shear deformation theory by using mixed-type finite element method, International Journal of Mechanical Sciences, 130, 234-43, 2017.
- [74] Mohandoss P., Pilla R.G., Sengupta A.K., "Effect of compressive strength of concrete on transmission length of pre-tensioned concrete systems" 23, 304-313, Structures, 2020.
- [75] Alberto T.Ramirez-Garciaa, Royce W.Floydb, W.Micah Halea, J.R.Martí-Vargasc, Effect of concrete compressive strength on transfer length, 5, 131-140, Structures,2016.
- [76] R.W. Barnes J.W. GroveN.H. Burns, "Experimental Assessment of Factors Affecting Transfer Length" 100(6):740-748, ACI Structural Journal, 2003.
- [77] Jin Kook Kim, Jun-Mo Yang, Hong Jae Yim, "Experimental Evaluation of Transfer Length in Pretensioned Concrete Beams Using 2,400-MPa Prestressed Strands", Journal of Structural Engineering 142(11):04016088, 2016.
- [78] Ahmed Ghallab, A.W. Beeby, "Factors affecting the external prestressing stress in externally strengthened prestressed concrete beams", Cement and Concrete Composites 27(9-10):945-957,2005.
- [79] Gemi, L., Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y.O., Arslan MH. Experimental investigation of shear capacity and damage analysis of thinned end prefabricated concrete purlins strengthened by CFRP composite, Composite Structures, 229, 111399, 2019.
- [80] Eurocode2., Design of Concrete Structures-Part 1-1, General Rules and Rules for Buildings, 2005.
- [81] du Béton FI., Practitioners guide to finite element modelling of reinforced concrete structures, State-of-Art Report, 2008.
- [82] Desnerck, P., Lees, J.M., Morley, C.T., Strut-and-tie models for deteriorated reinforced concrete half-joints, Engineering Structures, 161, 41-54, 2018.

- [83] Fernández, R.M., Muttoni, A., On development of suitable stress fields for structural concrete, *ACI, Structural Journal*, 104, 495-502, 2007.
- [84] Mitchell, D., Cook, W.D., Peng, T., Importance of reinforcement detailing. *Special Publication*, 273, 1-16, 2010.
- [85] Schlaich, J., Schäfer, K., Jennewein, M., Toward a consistent design of structural concrete, *PCI journal*, 32, 74-150, 1987.
- [86] Tjhin, T.N., Kuchma, D.A., Computer-based tools for design by strut-and-tie method: Advances and challenges, *Structural Journal*, 99, 586-94, 2002.
- [87] Wang, Q., Guo, Z., Hoogenboom, P.C., Experimental investigation on the shear capacity of RC dapped end beams and design recommendations, *Structural Engineering and Mechanics*, 21, 221, 2005.
- [88] Bergmeister, K., Breen, J., Jirsa, J., Kreger, M., Detailing in structural concrete. *Center for Transportation Research, Report*, 1993.
- [89] MacGregor, J.G., Wight, J.K., Teng, S., Irawan, P., *Reinforced concrete: mechanics and design* Upper Saddle River, NJ, Prentice Hall, 1997.
- [90] Özkılıç, Y.O., A new replaceable fuse for moment resisting frames, *Replaceable bolted reduced beam section connections*, *Steel and Composite Structures*, 35, 353-70, 2020.
- [91] Dere, Y., Assessing a Retrofitting Method for Existing RC Buildings with Low Seismic Capacity in Turkey, *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31, 04016098, 2016.
- [92] Hognestad, E., A Study of combined bending and axial load in reinforced concrete members [Doctoral Thesis], University of Illinois, Urbana, University of Illinois at Urbana Champaign, College of Engineering, 1951.
- [93] Obaidat, Y.T., Heyden, S., Dahlblom, O., The effect of CFRP and CFRP/concrete interface models when modelling retrofitted RC beams with FEM, *Composite Structures*, 92, 1391-8, 2010.
- [94] Behfarnia, K., Shirmeshan, A., A numerical study on behavior of CFRP strengthened shear wall with opening. *Comput Concrete*, 19, 179-89, 2017.
- [95] Sümer, Y., Aktaş, M., Defining parameters for concrete damage plasticity model, *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 1, 149-55, 2015.
- [96] Tahnat, YBA., Dwaikat, M.M., Samaaneh, M.A., Effect of using CFRP wraps on the strength and ductility behaviors of exterior reinforced concrete joint, *Composite Structures*, 201, 721-39, 2018.
- [97] Zhang, D., Wang, Q., Dong, J., Simulation study on CFRP strengthened reinforced concrete beam under four-point bending, *Computers and Concrete*, 17, 407-21, 2016.
- [98] Hashin, Z., Failure criteria for unidirectional fiber composites. *Journal of applied mechanics*, 47, 329-34, 1980.

- [99] Arduini, M., Nanni, A., Di Tommaso A., Focacci, F., Shear response of continuous RC beams strengthened with carbon FRP sheets, *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third Symposium*, 459-66, 1997.
- [100] Kachlakev, D., McCurry, D., Behavior of full-scale reinforced concrete beams retrofitted for shear and flexural with FRP laminates, *Composites Part B: Engineering*, 31, 445-52, 2000.
- [101] Lesani, M., Bahaari, M., Shokrieh, M., Numerical investigation of FRP-strengthened tubular T-joints under axial compressive loads, *Composite Structures*, 100, 71-8, 2013.
- [102] Lesani, M., Bahaari, M., Shokrieh, M., Experimental investigation of FRP-strengthened tubular T-joints under axial compressive loads, *Construction and building materials*, 53, 243-52, 2014.
- [103] Lesani, M., Bahaari, M., Shokrieh, M., FRP wrapping for the rehabilitation of Circular Hollow Section (CHS) tubular steel connections, *Thin-Walled Structures*, 90, 216-34, 2015.
- [104] Rasheed, H.A., Larson, K.H., Amiri, S.N., Analytical solution of interface shear stresses in externally bonded FRP-strengthened concrete beams, *Journal of Engineering Mechanics*, 139, 18-28, 2011.
- [105] Zhang, H., Huang, Y., Yang, Z., Xu, S., Chen, X., A discrete-continuum coupled finite element modelling approach for fibre reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, 106, 130-43, 2018.
- [106] Qureshi, J., Lam, D., Behaviour of headed shear stud in composite beams with profiled metal decking, *Advances in Structural Engineering*, 15, 1547-58, 2012.
- [107] Panigrahi, S.K., Deb, A., Bhattacharyya, S.K., Modes of Failure in Shear Deficient RC T-Beams Strengthened with FRP, *Journal of Composites for Construction*, 20:, 04015029, 2016.
- [108] AASHTO., *Guide Specifications for Horizontally Curved Steel Girder Highway Bridges, With Design Examples for I-girder and Box-girder Bridges*, Washington, DC, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2003.
- [109] Müsevitoğlu, A., Arslan, M.H., Aksoylu, C., Özkış, A., Experimental and analytical investigation of chemical anchors's behaviour under axial tensile, *Measurement*. 158, 107689, 2020.
- [110] Mansur, M., Tan, K-H., Wei, W., Effects of creating an opening in existing beams, *Structural Journal*, 96, 899-905, 1999.
- [111] Abdalla H, Torkey A, Haggag H, Abu-Amira A. Design against cracking at openings in reinforced concrete beams strengthened with composite sheets, *Composite Structures*, 60, 197-204, 2003.
- [112] Kalfat, R., Al-Mahaidi, R., Smith, S.T., Anchorage devices used to improve the performance of reinforced concrete beams retrofitted with FRP composites, *State-of-the-art review*, *Journal of Composites for Construction*, 17, 14-33, 2013.

- [113] Grelle, S.V., Sneed, L.H., Review of anchorage systems for externally bonded FRP laminates, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 7, 17-33, 2013.
- [114] Adhikary, B.B., Mutsuyoshi, H., Behavior of concrete beams strengthened in shear with carbon-fiber sheets, *Journal of Composites for Construction*, 8, 258-64, 2004.
- [115] Siddika, A., Al Mamun, M.A., Alyousef, R., Amran, Y.M., Strengthening of reinforced concrete beams by using fiber-reinforced polymer composites, A review. *Journal of Building Engineering*, 100798, 2019.
- [116] Madenci, E., Özkılıç, Y. O., & Gemi, L. (2020). Buckling and free vibration analyses of pultruded GFRP laminated composites: Experimental, numerical and analytical investigations. *Composite Structures*, 254, 112806.
- [117] Aksoylu, C., Yazman, Ş., Özkılıç, Y. O., Gemi, L., & Arslan, M. H. (2020). Experimental analysis of reinforced concrete shear deficient beams with circular web openings strengthened by CFRP composite. *Composite Structures*, 249, 112561.
- [118] Madenci E, Özkılıç YO, Gemi L. Theoretical Investigation on Static Analysis of Pultruded GFRP Composite Beams. *Academic Platform Journal of Engineering and Science*. 2020; 8(3): 483-489.

Yaya Kazalarının Yaralanma Şiddetinin İncelenmesi: İkili Lojistik Regresyon Modeli Uygulaması

Murat ÖZEN¹

ÖZ

Bu çalışmada ikili lojistik regresyon model kullanılarak yaya kazalarının yaralanma şiddetine etki eden faktörler belirlenmiştir. Bu amaçla Emniyet Genel Müdürlüğü veri tabanından elde edilen, Mersin’de 2015-2017 yılları arasında tek bir taşıt ve tek bir yayanın karıştığı kazalara ait kaza düzeyindeki detaylı veriler kullanılmıştır. Yayaların yaralanma şiddetini belirlemek için kaza sonrası 30 günlük sürecin sonundaki veri kullanılmıştır. Model sonuçları kazalara 55 yaş ve üstü yayaların karışmasının, erkek yayaların karışmasının, kazada yayaların kusurlu olmasının, kazada hız kusuru olmasının ve kaza noktasında yatay kurb bulunmasının yaya kazalarının yaralanma şiddetinin 0,05 anlamlılık düzeyinde arttırdığını göstermiştir. Yaya kazalarının devlet yollarında ve gece meydana gelmesi yaya kazalarının yaralanma şiddetini 0,10 anlamlılık düzeyinde artırmaktadır. Öte yandan, kazalara motosikletlerin karışması yaralanma şiddetini 0,05 anlamlılık düzeyinde azalmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yaya, kaza, şiddet, güvenlik, lojistik regresyon.

ABSTRACT

Injury Severity Level Examination of Pedestrian Crashes: An Application of Binary Logistic Regression

This study used a binary logistic regression model to identify factors affecting the severity level pedestrian crashes. For this purpose, a crash level disaggregate data were provided by the General Directorate of Security for the crashes involving a single vehicle and a single pedestrian in Mersin from 2015 to 2017. 30-day post-crash data were used to describe injury severity level of pedestrians. The model results showed that older pedestrians (55 years old and older), male pedestrians, pedestrians at-fault crashes, speeding and horizontal curves increases the severity level of pedestrian crashed at 0.05 significance level. State highway and night crash are associated with increased probability of severe injuries at 0.10 significance level. On the other hand, motorcycles decreases the severity level of pedestrian accidents at 0.05 significance level.

Keywords: Pedestrian, crash, severity, safety, logistic regression.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu’na 6 Ocak 2020 günü ulaşmıştır. 26 Haziran 2020 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2021 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.670811>

1 Mersin Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mersin - ozen.murat@mersin.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0002-1745-7483>

1. GİRİŞ

En temel ulaşım türü olan yürümenin insan sağlığına birçok faydası bulunmaktadır [1,2]. Yürümek özellikle obeziteye ve kronik hastalıklara yakalanma riskini azaltmaktadır [3]. Yürümenin ayrıca kentlerdeki trafik sıkışıklığı kaynaklı problemlerin azaltılmasında olumlu etkileri vardır [4-5]. Bu nedenle yürüme aktivitesi sıklıkla tavsiye edilmektedir [6]. Fakat kentlerde yürümenin yaygınlaştırılması için mutlaka güvenli yürüme alanlarının oluşturulması gerekmektedir. Günümüzde ulaşım sistemi tasarımlarının yaya güvenliğini yeterince dikkate almaması nedeniyle, nüfusta ve motorlu taşıt trafiğinde yaşanan artışa paralel olarak, yayalar giderek daha çok trafik kazası tehdidi altında kalmaktadır [7]. Yayaların yavaş hareket ediyor olmaları ve çarpışmalara karşı korunmasız olmaları yaşanan kazaların sonuçlarını ciddiştirmektedir [5,8]. Bu konuda Elvik [9] yayaların trafik kazalarında yaralanma riskinin sürücülerin dört katı olduğunu, Pucher ve Dijkstra [10] yayaların taşıt-kilometredeki ölüm riskinin motorlu taşıtlardakilerin 23 katı olduğunu söylemiştir. Buna bağlı olarak, Sullman vd. [11] yaya kazalarının günümüzde yaşanan yaralanma, sakatlık ve ölümlerin önemli sebeplerinden bir tanesi olduğunu vurgulamıştır.

Dünya Sağlık Örgütü verilerine göre, trafik kazalarındaki ölümlerin %23'ünü yayalar oluşturmaktadır [12]. İstatistikler incelendiğinde yaya güvenliğinin sadece az gelişmiş ülkelerin sorunu olmadığı görülmektedir. Avrupa Birliği-28 ülkelerinde dahi yaya ölümlerinin payı %21'dir [13]. Yaşanan ölüm ve yaralanmaların yanı sıra, ekonomik kayıplar dikkate alındığında yaya kazalarının toplum üzerindeki olumsuz etkisi göz ardı edilemeyecek boyutlara ulaşmaktadır [14]. Bu nedenle yaya kazalarının sonuçlarını azaltılabilmesi için ortak hareket edilerek etkili karayolu güvenlik stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir [15]. Geliştirilecek stratejilerin etkili olabilmesi yaşanan kazalara etki eden faktörlerin doğru bir şekilde belirlenmesine bağlıdır [16]. Bu noktada trafik güvenliği çalışmalarının incelenen bölgeye özgü olduğu, sonuçlarının bir bölgeden diğerine her zaman kolaylıkla adapte edilemeyeceği ve her bölgede yapılacak çalışmaların sonunda ilgili politikaların geliştirilmesi gerektiği görüşü unutulmamalıdır [17].

Türkiye'de 2018 yılında trafik kazalarında 1.484 yaya ölmüştür [18]. Türkiye, trafik güvenliğinde 2015 yılından itibaren kaza sonrası 30 günlük gözlem süresini uygulamaya başlamıştır. Bu tarihten itibaren kaza noktasında ve kazayı takip eden 30 günlük süre içerisinde trafik kazasına bağlı meydana gelen ölümler trafik güvenliği istatistiklerinde gösterilmeye başlanmıştır. Bu nedenle, en korunmasız yol kullanıcısı olan yayalar ile ilgili karşılaştırmalar 2015 yılına göre yapılmalıdır. İstatistikler 2015 yılı sonrasında Türkiye'de yaya ölümlerinin %20 azaldığını göstermektedir [18]. Türkiye Cumhuriyeti İçişleri Bakanlığı trafikteki yaya güvenliği konusunda toplumsal bir farkındalık yaratılarak, yaya kazalarını daha da azaltmak için 2019 yılını "Öncelik Hayatın, Öncelik Yayanın" sloganıyla "Yaya Önceliği Yılı" ilan etmiştir. Yaya güvenliği konusunda yaşanan bu olumlu gelişmeye rağmen, trafik kazalarındaki ölümlerin %22'sini halen yayalar oluşturmaktadır.

Türkiye'de yaya güvenliği konusunda yapılmış çalışmalar sınırlıdır. Yaya kazalarının tanımlayıcı istatistikleri [19], yaya kazalarının zamansal ve mekânsal analizi [20-22], yaya kazalarını önleyici denetim politikaları [23], otobüs durakları çevresindeki yaya güvenliği [24] ve il düzeyinde yaya kazasına karışma oranları [25] mevcut çalışmaların odak noktalarını oluşturmuştur. Yaya güvenliğinin analizinde kullanılan yaklaşımlardan bir tanesi yaya kazalarının yaralanma şiddetine etki eden faktörlerin tespit edilmesidir. Böylece trafik güvenliği çalışmalarında, yaya kazalarındaki ölümlerin azaltılmasında kullanılacak uygun

stratejiler belirlenebilmektedir. Bu amaçla, bu çalışmada Mersin’de 2015-2017 yılları arasındaki yaya kazalarının yaralanma şiddeti ile yüksek korelasyon gösteren değişkenlerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Çalışmanın modelleme aşamasında ikili lojistik regresyon modeli kullanılmıştır. Türkiye’deki yaya kazalarının şiddetinin ilk defa inceleniyor olması nedeniyle, çalışmanın yol güvenliği literatürüne katkıda bulunması beklenmektedir.

2. GEÇMİŞ ÇALIŞMALAR

Yaya güvenliği giderek daha çok araştırmacının dikkatini çekmektedir. Yakın geçmişteki çalışmalarda yaya ve sürücü özellikleri, kazaya sebep olan kusurlar, taşıt tipleri ve hızları, trafik özellikleri, karayolu geometrisi, zamansal/mekânsal özellikler ve hava koşulları gibi parametreler ile yaya kazalarının sıklığı ve şiddeti arasındaki ilişkiler incelenmiştir [26-36]. Bu çalışmaların araştırmacılara ve kurumlara, etkili önlemlerin alınmasında ve yaya kazalarının şiddetinin azaltılabilmesi için uygun güvenlik yönetmeliklerinin geliştirilmesinde yardımcı olması beklenmektedir [37]. Bu bölüm modelleme aşamasına temel oluşturması açısından yaya kazalarının şiddeti üzerine yapılmış çalışmalar ile sınırlandırılmıştır.

Yaya kazalarının yaralanma şiddeti kazaya karışan yayaların yaralanma seviyesiyle ifade edilmektedir. Yaralanma seviyesini tanımlamak için kesikli değişkenler kullanılmaktadır. Örnek olarak, Amerika Birleşik Devletleri’nde bu tanımlama için kullanılan KABCO ölçeğine göre, kazaya karışanların (yaya, sürücü veya yolcu) yaralanma şiddeti ölüm (K-fatal injury), kapasite kısıtlayan veya ağır yaralanma (A-incapacitating injury), kapasite kısıtlamayan yaralanma (B-non-incapacitating injury), muhtemel yaralanma (C-possible injury) ve yaralanmamış (O-uninjured) şeklinde beş seviyeye ayrılmaktadır [38].

Yayaların cinsiyet ve yaşı ile yaya kazaları arasında ilişki farklı çalışmalara konu olmuştur. Bu çalışmaların sonuçları incelendiğinde ortak bir kanaate varılamadığı görülmektedir. Çoğunlukla erkeklerin yol kenarında veya karşıdan karşıya geçerken sergiledikleri riskli davranışlar sonucu ciddi yaralanmalı ve ölümlü yaya kazalarına karışma olasılığının daha yüksek olduğu belirtilmiştir [32,39-42]. Öte yandan, bazı çalışmalarda kadınların, vücut dirençlerinin zayıf olması nedeniyle, daha yüksek olasılıkla ciddi yaralanmalı ve ölümlü yaya kazalarına karıştığı sonucuna ulaşılmıştır [15,43]. Moundon vd. [5] ise kadınların ve erkeklerin karıştıkları kazaların yaralanma şiddetleri arasında bir anlamlı bir fark bulamamıştır.

Eluru vd. [32] yaşın, yaya kazalarının yaralanma şiddetini belirleyen en önemli parametre olduğunu söylemiştir. Gelişmiş ülkelerdeki çalışmalar yayaların yaşları arttıkça yaralanma şiddetinin arttığını göstermiştir [44-45]. Yine birçok çalışmada yaşlı yayaların karıştığı kazalardaki ölüm riskinin diğer yaş gruplarına göre daha yüksek olduğu bulunmuştur [46-58]. Yaşlıların karıştığı kazaların şiddetinin yüksek olması, yaşlıların algısal yeteneklerinde oluşan zayıflamalar sonucu risk olarak tehlikeli durumlarda karşıdan karşıya geçmeye çalışmalarıyla ve vücutlarının çarpışmalara karşı daha kırılğan olmasıyla açıklanmaktadır [43,59-62]. Bu sonuçların aksine, Holland ve Hill [40] ve Harell [63] yaşlıların trafikte daha dikkatli olduğunu ve riskli davranışlardan kaçındığını belirtmiştir. Burada incelenen çalışmaların çoğunluğunda yaşlı yayalar için yaş sınırı 65 kabul edilmiştir [41,44,49,55]. Sınırlı sayıdaki çalışmada ise 60 yaş [32,50] ve 70 yaş [48] sınırları kullanılmıştır. Literatürde çocukların karıştığı kazaların şiddeti ile ilgili de farklı sonuçlar elde edilmiştir. Wazana vd. [64] çocukların en yüksek yaya kazası şiddetine maruz kalan grup olduğunu ve bu kazaların

çevresel faktörler ile sürücü özelliklerinden önemli derecede etkilendiğini bulmuştur. Yasmin vd. [65] ise yaya kazasına karışan bireylerin 18 yaş ve altında olmasının yaralanma şiddetini azalttığı sonucuna ulaşmıştır.

Kim vd. [44], Salon ve McIntrye [48] ve Haleem vd. [66] yayaların kusurunun bulunmasının yaya kazalarının şiddetini arttırdığını söylemiştir. Sarkar vd. [67] karşıdan karşıya geçerken kazaya karışan yayaların, yol üzerinde yürürken kazaya karışan yayalara göre daha şiddetli yaralandığını belirtmiştir. Clifton vd. [41] trafik ışıklarına uymayan ve yaya geçitlerini kullanmayan yayaların, Jang vd. [54] cep telefonu ile konuşurken kazaya karışan yayaların şiddetli yaralanma olasılıklarının yüksek olduğunu bulmuştur. Geçmiş çalışmalar sürücüler kadar yayaların da alkollü olmasının yaya kazalarının gerçekleşme riskini ve şiddetini önemli derecede arttırdığı göstermiştir [48-49,54,68-71]. Öström ve Eriksson [68] alkollü yayaların kazalarda daha çok kafa darbesi aldıklarını ve daha şiddetli yaralanmalara maruz kaldıklarını vurgulamıştır. Alkollü yayaların kazalara daha çok karışmasına neden olarak yaşanan farkındalık kayıpları sonucu, yol üzerinde veya kenarında riskli davranışlarda bulunmaları gösterilmiştir. Ayrıca alkollü yayaların hareket kabiliyetlerinde azalma olduğu, taşıtların hızlarını ve mesafelerini doğru algılayamadıkları belirtilmiştir [72-73].

Yaya kazalarına karışan taşıtların tiplerinin, tasarımlarının, ağırlıklarının [30,49,74-75] ve çarpışma anındaki hızlarının [76-78] kaza şiddetine etkisi birçok çalışmada araştırılmıştır. Bu çalışmalarda SUV araçların [30], kamyonetlerin [31], panelvan araçların [74], kamyonların [44] karıştığı kazalardaki yayaların yaralanma şiddetinin otomobillerin karıştığı kazalara göre daha yüksek olduğu bulunmuştur. Buna neden olarak, bu tip araçların yayaya çarpan ön aksamalarının diz seviyesinden daha yüksek ve daha sert olmasını gösterilmektedir. Starnes ve Longthorne [79] büyük araçların olumsuz etkisinin en çok 8 yaş altı çocukların karıştığı kazalarda görüldüğünü söylemiştir. Salon ve McIntrye [48] tarafından yapılan çalışmada büyük araçların yaya kazalarının şiddetini arttırdığı sonucu tekrarlanmıştır. İlginç olarak motosikletlerin karıştığı kazalardaki yaralanmalarının şiddetinin otomobillerin karıştığı kazalara göre yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Yaya güvenliği araştırmaları daha yüksek çarpışma hızının yaya kazalarının şiddetini arttırdığı net bir şekilde ortaya koymuştur [80-83]. Oh vd. [84] çarpışma hızının yayalarının yaralanma şiddetini etkileyen en önemli faktör olduğunu bulmuştur. Anderson [85] hız limitlerinin azalmasının yaya kazalarını azalttığını söylemiştir. Kim vd. [44] ve Pour-Rouholamin ve Zhou [86] sürücülerin yaşı arttıkça karıştıkları yaya kazalarının şiddetinin azaldığını belirtmiştir. Bu durum sürücülerin yaşları arttıkça olgunlaşmalarıyla ve trafik kurallarına daha çok uyararak araç kullanmalarıyla açıklanmaktadır [87].

Yol geometrik tasarımı, trafik hacmi, arazi kullanımı, aydınlatma koşulları gibi faktörler ile yaya kazaları arasında ilişki farklı çalışmalarda incelenmiştir [41,88-90]. Kim vd. [44] trafiğin en yoğun olduğu akşam zirve saatlerindeki kazalarının şiddetinin düşük olduğunu söylemiştir. Ivan vd. [91] yolların fonksiyonel sınıflandırmasının ve şerit sayısının yaya kazalarının şiddetini etkilediğini bulmuştur. Zajac ve Ivan [49], Ukkusiri [92] taşıt yolu genişliği ile yaya kazalarının şiddeti arasındaki pozitif ilişkiyi ortaya koymuştur. Lee ve Abdel-Aty [43] yol geometrisinin, trafik özelliklerinin ve çevresel koşulların kavşaklardaki yaya kazalarının şiddetinde etkili olduğunu bulmuştur. Eluru vd. [32] en hafif yaya yaralanmalarının sinyalize kavşaklardaki kazalarda gerçekleştiğini söylemiştir. Moudon vd. [5] sinyalize olmayan kavşakların yaya kazalarının şiddetini arttırdığı sonucuna ulaşmıştır. Zahabi vd. [90] ise kavşakların taşıtların yavaşlamalarına neden olması nedeniyle, sinyalize

olup olmamasından bağımsız bir şekilde, yaya kazalarının şiddetini azalttığı sonucuna ulaşmıştır. Abdel-Aty ve Keller [93] kavşaklardaki yaya kazalarında en ağır yaralanmalara sola dönüş yapan araçlar tarafından çarpılan yayaların maruz kaldığını belirtmiştir. Haleem vd. [66] sinyalize ve sinyalize olmayan kavşaklardaki yaya kazalarının şiddetini karşılaştırdıkları çalışmada, kavşaktaki trafik hacminin sadece sinyalize kavşaklardaki kazaların şiddetini artıran bir parametre olduğunu bulmuştur. Pour-Rouholamin ve Zhou [86] trafik kontrol ışık ve levhalarının yaya kazalarının şiddetini azalttığını söylemiştir. Bu sonuca paralel olarak, Rothman vd. [4], Sarkar vd. [67] ve Siddiqui vd. [94] kontrolsüz kesim orta noktalarındaki kazaların şiddetinin, sinyalize kavşaklardakilere göre daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmıştır. Öte yandan, Pitt vd. [95] ve Agran vd. [96] tarafından çocukların karıştığı yaya kazalarının incelendiği çalışmalarda, kesim orta noktalarında ve kavşaklarda meydana gelen kazaların yaralanma şiddetleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır.

Literatürde şiddetli yaya kazalarının karanlık gece koşullarında gerçekleştiği yönünde bir görüş vardır [54,86,94,97]. Miles-Doan [98] ve Sullivan ve Flannagan [99] gece kazalarındaki ölüm olasılığının gündüz kazalarına göre en az üç kat yüksek olduğunu söylemiştir. Kim vd. [44] gece koşullarında gerçekleşen kazaların şiddetinin yüksek olmasının, yol ışıklandırmasının olup olmamasından bağımsız olduğunu söylerken; Siddiqui vd. [94] ışıklandırmanın ölümlü yaya kazası olasılığını ciddi derecede azalttığını belirtmiştir. Aydınlatma koşullarının yanı sıra hava koşullarının da yaya kazalarının şiddeti üzerinde etkisi vardır. Kim vd. [44] sis, yağmur ve olumsuz hava koşullarında sürücülerin araçlarını daha yavaş kullanmak zorunda kaldıklarını ve bu durumun yaya kazalarının şiddetinin azalttığını söylemiştir. Bunun aksine, Jang vd. [54] yağmurlu hava koşullarının yaya kazalarının şiddetini artıran bir faktör olduğunu bulmuştur. Siddiqui vd. [94] sisli havada meydana gelen kazaların şiddetinin yağmurlu havalardaki kazalardan daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmıştır.

Garber ve Lienau [88] yaya kazalarının çoğunlukla kentsel alanlarda gerçekleşmesine rağmen, düşük nüfus yoğunluğa sahip kırsal alanlardaki kazalarda ölüm olasılığının daha yüksek olduğunu bulmuştur. Başka çalışmalarda da kırsal alanlardaki kazaların yaralanma şiddetini arttırdığı sonucu tekrarlanmıştır [39, 49, 98, 100]. Marshall vd. [101] yol kenarı parklanmaların olduğu, düşük hızdaki caddelerde gerçekleşen yaya kazalarının şiddetinin diğer yol türlerine göre çok daha düşük olduğunu belirtmiştir. Clifton vd. [41] toplu taşıma erişiminin ve yüksek yaya bağlantılılığının bulunduğu bölgelerdeki yaya kazalarının şiddetinin düşük olduğunu söylemiştir. Ukkusiri [92] ticari, endüstriyel ve açık arazi kullanımının kaza riskini artırırken, konutsal arazi kullanımının tam tersi bir etki yaptığı sonucuna ulaşılmıştır. Kim vd. [44] de ticaret bölgelerinde gerçekleşen yaya kazalarının daha ölümcül olduğunu bulmuştur. Noland ve Quddus [102] gelir seviyesinin düşük ve kişi başına alkol tüketiminin yüksek olduğu bölgelerdeki yaya kazalarının şiddetinin daha yüksek olduğunu söylemiştir.

3. ANALİTİK YÖNTEM

Savolainen vd. [103] trafik kazalarının şiddetinin analizinde kullanılan metodolojik alternatifleri detaylı olarak tartışmıştır. Bu alternatifler incelendiğinde, kaza şiddetinin derecelendirmesinin, tercih edilecek yöntemin seçilmesinde belirleyici unsur olduğu görülmektedir. Yöntem belirlendikten sonra, yaya özellikleri, sürücü özellikleri, taşıt

özellikleri, yol tasarım özellikleri, kaza özellikleri, zamansal özellikler, çevresel özellikler, arazi kullanımı ve kazaya sebep olan yaya ve sürücü kusurları gibi faktörlerin trafik kazalarının şiddeti üzerindeki etkisi araştırılmaktadır. Yasmin vd. [65] literatürde yaya kazalarının yaralanma şiddetini inceleyen araştırmacıların kullandıkları modelleri ve bu modellerdeki yaralanma seviyelerini özetlemiştir.

KABCO ölçeği ve benzerlerinde olduğu gibi, kaza şiddetinin ikiden fazla seviyede raporlanması durumunda, lojistik regresyon, multinomial logit model, sıralı logit (ordered logit), sıralı probit (ordered probit), rastgele (karışık) parametrelili logit (random (mix) parameter logit) yöntemleri veya bu yöntemlerin farklı varyasyonları kullanılmaktadır. Örnek olarak, Zajac ve Ivan [49] KABCO ölçeğine göre beş seviyede derecelendirilen yaya kazalarının şiddetini sıralı probit modeli ile incelemiştir. Kim vd. [45], dört yaralanma seviyesi (ölüm, kapasite kısıtlayan yaralanma, kapasite kısıtlamayan yaralanma, muhtemel yaralanma/yaralanmama) kullandığı çalışmada rastgele parametrelili logit modelini tercih etmiştir. Abay [2] sıralı logit ve rastgele parametrelili logit modelleri ile Danimarka'daki yaya kazalarının yaralanma seviyesini incelerken üç yaralanma seviyesi (ölüm, ciddi yaralanma ve hafif yaralanma/yaralanmama) kullanmıştır. Tay vd. [51] üç yaralanma seviyesi (ölüm, ciddi yaralanma ve hafif yaralanma) kullandığı multinomial logit modeliyle Avustralya'daki yaya kazalarının yaralanma şiddetini araştırmıştır. Yaralanma şiddetinin ölü veya yaralı gibi iki seviyede incelendiği durumlarda ikili (binary) logit veya ikili probit gibi iki seviyeli modeller kullanılmaktadır. İkili logit modeli, ikili lojistik regresyon modeli (binary logistic regression) olarak da bilinmektedir. Literatürde iki seviyeli modeller trafik güvenliği çalışmalarında sıklıkla kullanılmaktadır [5,15,35,87,104-106]. Türkiye'de yaya kazalarına karışan yayaların yaralanma şiddeti yaralanma veya ölüm olarak iki grupta raporlanmaktadır. Buna bağlı olarak, bu çalışmanın modelleme aşamasında ikili lojistik regresyon modeli kullanılmıştır. Çalışma verileri bölümünde detaylıca anlatılacağı gibi, incelenen 1.652 yaya kazasına karışan yayaların %94,2'si yaralanmış (1.556 yaya), %5,8'i ölmüştür (96 yaya). Yakın geçmişte, Versoza ve Miles [87], Rifat ve Tay [106], Haleem ve Abdel-Aty [107] gibi araştırmacılar benzer yaralanma seviyesi oranlarıyla iki seviyeli modelleri başarıyla uygulamıştır. Çalışmada kullanılan ikili lojistik regresyon modelinde bağımlı değişken için 0 (yaralanmalı yaya kazası) ve 1 (ölümlü yaya kazası) olmak üzere iki yaralanma seviyesi oluşturulmuştur. Modelde ölümlü yaya kazasının gerçekleşme olasılığının (p) gerçekleşmeme olasılığına oranı ($1-p$), *odds oranı* (*OR*) olarak adlandırılır. *OR*, 0 ile $+\infty$ aralığında değişim gösterir. Modelde logit, *odds oranının* doğal logaritması olarak tanımlanır.

$$Y = \text{logit}(p) = \ln\left(\frac{p}{1-p}\right) = \alpha + \beta X \quad (1)$$

burada α modeldeki sabit terimi, X bağımlı değişkenler vektörünü; β tahmin edilecek parametreler vektörünü ifade etmektedir. Diğer faktörler sabit olmak koşuluyla, bir x_i bağımlı değişkendeki bir birim artışa bağlı olarak *odds oranı* (*OR*) $\exp(\beta_i)$ kadar artmaktadır [108]. Buna bağlı olarak, herhangi bir değişken için *OR* değerinin 1'den büyük olması o değişkenin ölümlü yaya kazası olma olasılığını arttırdığı anlamına gelmektedir. *OR* değerinin 1'den küçük olması ise tam tersi şekilde yorumlanmalıdır.

4. ÇALIŞMA VERİLERİ

Bu çalışma, yaya kazalarında yayaların yaralanma şiddeti ile korelasyon gösteren parametrelerin belirlenmesini amaçlamıştır. Çalışmada Emniyet Genel Müdürlüğü trafik kazası veri tabanı kullanılmıştır. Bu veri tabanından 2015-2017 yılları arasında Mersin’de en az bir yayanın karıştığı 1,929 ölümlü ve/veya yaralanmalı yaya kazasına ait veriler alınmıştır. Bu veriler bir ön işleme tabi tutularak kullanılabilir hale getirilmiştir. Öncelikle birden fazla aracın ve/veya birden fazla yayanın karıştığı 113 kaza yaya kazası çalışma kapsamından çıkarılmıştır. Daha sonra hata ayıklama işlemi yapılarak, eksik verilerin veya açık bir şekilde hatalı verilerin bulunduğu 164 yaya kazası çalışma dışarısında bırakılmıştır. Böylece çalışmanın modelleme aşamasında kullanılacak tek bir taşıt ve yayanın karıştığı 1.652 trafik kazası belirlenmiştir. Bu kazaların 523 tanesi 2015 yılında, 577 tanesi 2016 yılında ve 552 tanesi 2017 yılında meydana gelmiştir. Türkiye’de yaya kazalarındaki yayaların yaralanma şiddeti yaralı veya ölü şeklinde iki gruba ayrılarak raporlanmaktadır. Emniyet Genel Müdürlüğü, 2015 yılından itibaren veri tabanında bu bilgiyi kazayı takip eden 30 günlük süreci kapsayacak şekilde saklamaktadır. Örnek olarak, kaza noktasında yaralı rapor edilmiş bir yaya, kaza sonrası 30 günlük süreçte kazaya bağlı bir nedenden dolayı yaşamını yitirse veri tabanında ölü olarak güncellenmektedir. Aksi takdirde, bu yaya veri tabanında yaralı olarak kalmaktadır. Bu çalışmanın modelleme aşamasında trafik kazasına karışan her bir yayanın kazayı takip eden 30 günlük sürecin sonundaki yaralanma şiddeti kullanılmıştır. Buna göre çalışma kapsamındaki kazalara karışan yayaların %94,2’si yaralanmış (1.556 yaya) ve %5,8’i ölmüştür (96 yaya).

Tablo 1’de çalışmanın modelleme aşamasında kullanılan bağımsız değişkenlerin tanımlayıcı istatistikleri verilmiştir. İncelenen her bir yaya kazasında bu değişkenlerin hepsine ait bilgi mevcuttur. Bu değişkenler yaya özellikleri, sürücü özellikleri, taşıt özellikleri, yol tasarım özellikleri, kaza özellikleri, zamansal özellikler, çevresel özellikler, arazi kullanımı ve kusurlar şeklinde incelenmiştir. Yaya özellikleri, yayaların yaş ve cinsiyetini içermektedir. Sürücülerin yaş ve cinsiyeti ise çalışmada kullanılan sürücü özelliklerini oluşturmaktadır. Sürücülerin eğitim durumları, sürücülük deneyimleri (kaç yıllık ehliyet sahibi oldukları), trafik cezası ve kazası geçmişleri gibi parametrelerin de yaya kazalarının şiddetini etkileyebileceği düşünülebilir. Fakat çalışma kapsamında sürücülere ait bu bilgilere ulaşılamamıştır. Taşıtların özellikleri için kazaya karışan taşıtların tipi kullanılmıştır. Yol tasarım özellikleri, kazanın gerçekleştiği yolun fonksiyonel sınıflandırmasını (devlet yolu, otoyol, cadde vb.), trafik tipini (bölünmüş, iki yönlü trafiğe açık vb.), kaplama tipini (asfalt, parke vb.), yatay ve düşey geometrik özelliklerini içermektedir. Kaza özellikleri olarak yaya kazasının gerçekleştiği noktanın konumunu (yol üzerinde, banket üzerinde, yay kaldırımında vb.); bu noktada geçit ve kavşak bulunup bulunmadığını, bulunuyorsa da türlerini gösteren değişkenler kullanılmıştır. Zamansal özellikler kaza saati, günü (hafta içi veya hafta sonu) ve mevsiminden oluşmaktadır. Çevresel özellikler kaza anındaki hava, gün ve yol yüzeyi durumudur. Arazi kullanımı için yaya kazalarının kentsel alanlarda mı yoksa kırsal alanlarda mı gerçekleştiğini gösteren değişken kullanılmıştır. Son olarak, incelenen kazalarda yayaların ve sürücülerin kusurlu olup olmadıklarının; sürücüler için hız ve yasal limitlerin üzerinde alkol kullanımının etkisi geliştirilen modelde test edilmiştir.

2018 yılı itibariyle Mersin kentinin nüfusu 1.814.468’dir. Nüfus içerisinde kadınlar (%50,1) ve erkekler (%49,9) eşit olarak dağılmıştır [109]. Tablo 1’de kazalara karışan yayaların cinsiyeti incelendiğinde, yaya kazalarına karışanların %56,6’sının erkekler olduğu

görülmektedir. Birçok ülkede olduğu gibi Türkiye’de de güvenilir yaya hareketliliği verisine ulaşmanın zor olması nedeniyle, sadece bu veriye bakarak kadınların ve erkeklerin yaya kazasına karışma riskleri hakkında sağlıklı bir yorumda bulunmak mümkün değildir. Modelleme aşamasında, yaya ve sürücü yaşları geçmiş çalışmalar dikkate alınarak beş grupta incelenmiştir. Buna göre kazaya karışan yayaların önemli bir kısmını 0-17 (%36,6) yaş grubundaki gençler oluşturmaktadır. Ayrıca, 25-54 (%26,0) ve 65+ (%19,3) yaş grupları yaya kazalarında önemli yer tutmaktadır. 55-64 (%9,2) ve 18-24 (%8,8) yaş grupları ise yaya kazalarına göreceli olarak daha az karışmaktadır. Mersin’de 25-54 yaş grubu nüfusun %42,7’sini oluşturmaktadır. 0-17 yaş grubu da nüfusta önemli bir paya sahiptir (%27,5). Diğer yaş gruplarının nüfustaki payları birbirine oldukça yakındır (18-24 için %11,0; 55-64 için %10,0 ve 65+ için %8,8). Buna göre 65+ ve 0-17 yaş gruplarındaki bireyler nüfustaki paylarına göre çok daha fazla yaya kazasına karışmaktadır. Tam tersi bir şekilde, 25-54 yaş grubundaki bireyler nüfustaki paylarından daha az yaya kazasına karışmaktadır. 18-24 ve 55-64 yaş gruplarındaki bireylerin yaya kazalarındaki oranı, nüfustaki paylarına oldukça yakındır. Kazaya karışan sürücülerin çoğunluğunu erkek (%90,7) ve 25-54 yaş grubu sürücüler (%68,3) oluşturmaktadır. Yasa dışı kullanım olan 0-17 yaş grubundaki sürücülerin kazalardaki payı %3,0’dür. Kazalardaki taşıtların %52,2’sini otomobiller oluşturmaktadır. Motosikletlerin (%19,1) en çok kazaya karışan ikinci taşıt tipi olması dikkat çekicidir. Kazaların çok büyük kısmı caddelerde (%77,7) gerçekleşmiştir. Yaya kazalarının %61,7’sinin bölünmüş, %30,9’unun iki yönlü trafiğe açık yollarda yaşandığı görülmektedir. Kazaların neredeyse tamamına yakını asfalt (%95,3) yollarda yaşanmıştır. Kaza noktaları, yatay yol geometrisi açısından düzdür (%96,9), düşey yol geometrisi açısından ise eğimsizdir (%91,9). Kaza özellikleri bakımından yayaların %95,5’i karşıdan karşıya geçerken kazaya karışmıştır.

Tablo 1 - Değişkenlerin tanımlayıcı istatistikleri

Değişken (Gözlem Sayısı: N=1.652)	Frekans	Yüzde
Kaza Şiddeti		
Yaralı	96	5,8
Ölü	1,656	94,2
Yaya Özellikleri		
<i>Yaş</i>		
<=17	605	36,6
18-24	146	8,8
25-54	430	26,0
55-64	152	9,2
65+	319	19,3

Tablo 1 - Değişkenlerin tanımlayıcı istatistikleri (devam)

Değişken (Gözlem Sayısı: N=1.652)	Frekans	Yüzde
<i>Cinsiyet</i>		
Kadın	934	56,6
Erkek	718	43,4
Sürücü Özellikleri		
<i>Yaş</i>		
<=17	49	3,0
18-24	306	18,5
25-54	1129	68,3
55-64	125	7,6
65+	43	2,6
<i>Cinsiyet</i>		
Kadın	154	9,3
Erkek	1498	90,7
Taşıt Özellikleri		
<i>Taşıt tipi</i>		
Motosiklet	316	19,1
Otomobil	862	52,2
Minibüs	73	4,4
Kamyonet	291	17,6
Kamyon/Tır/Tanker	39	2,4
Otobüs	61	3,7
Diğer	10	0,6
Yol Tasarım Özellikleri		
<i>Fonksiyonel sınıf</i>		
Cadde	1.283	77,7
Sokak	202	12,2
Otoyol	4	0,2
Devlet yolu	142	8,5
Diğer	11	1,3
<i>Trafik tipi</i>		
Bölünmüş	1.019	61,7
Tek yönlü	114	6,9
İki yönlü	511	30,9
Diğer	8	0,5

Tablo 1 - Değişkenlerin tanımlayıcı istatistikleri (devam)

Değişken (Gözlem Sayısı: N=1.652)	Frekans	Yüzde
<i>Kaplama tipi</i>		
Asfalt	1.575	95,3
Parke	64	3,9
Diğer	13	0,8
<i>Yatay güzergah</i>		
Düz yol	1.600	96,9
Kurb	52	3,1
<i>Düşey güzergah</i>		
Eğimsiz	1.518	91,9
Eğimli	134	8,1
Kaza Özellikleri		
<i>Kaza konumu</i>		
Yol üzerinde	1.578	95,5
Banket üzerinde	26	1,6
Orta refüjde	3	0,2
Yol kenarında	9	0,5
Yaya kaldırımında	18	1,1
Diğer	18	1,1
<i>Geçit</i>		
Demiryolu	2	0,1
Yaya geçidi	382	23,1
Okul geçidi	20	1,2
Geçit yok	1.248	75,5
<i>Kavşak</i>		
T kavşak	338	20,5
Y kavşak	25	1,5
Dört yönlü	194	11,7
Dönel	67	4,1
Köprülü	4	0,2
Kavşak yok	974	59,0

Tablo 1 - Değişkenlerin tanımlayıcı istatistikleri (devam)

Değişken (Gözlem Sayısı: N=1.652)	Frekans	Yüzde
Zamansal Özellikler		
<i>Saat</i>		
06:00-09:59	197	11,9
10:00-15:59	703	42,6
16:00-18:59	456	27,6
19:00-21:59	228	13,8
22:00-05:59	68	4,1
<i>Gün</i>		
Hafta içi	1.258	76,2
Hafta sonu	394	23,8
<i>Mevsim</i>		
İlkbahar	462	28,0
Yaz	382	23,1
Sonbahar	423	25,6
Kış	385	23,3
Çevresel Özellikler		
<i>Hava durumu</i>		
Açık	1.587	96,1
Sis/Duman	7	0,4
Yağmur	56	3,4
Diğer	2	0,2
<i>Gün durumu</i>		
Gündüz	1.295	78,4
Gece	301	18,2
Alacakaranlık	56	3,4
<i>Yol yüzeyi</i>		
Kuru	1.565	94,7
Islak/Nemli	87	5,3
Arazi Kullanımı		
<i>Tür</i>		
Kentsel	1.611	97,5
Kırsal	41	2,5

Tablo 1 - Değişkenlerin tanımlayıcı istatistikleri (devam)

Değişken (Gözlem Sayısı: N=1.652)	Frekans	Yüzde
Kusurlar		
<i>Yaya kusuru</i>		
Evet	1.150	69,6
Hayır	502	30,4
<i>Sürücü kusuru</i>		
Evet	791	47,9
Hayır	861	52,1
<i>Hız (Sürücü)</i>		
Evet	307	18,6
Hayır	1.345	81,4
<i>Alkol (Sürücü)</i>		
Evet	10	99,4
Hayır	1.642	0,6

İncelenen kazaların %59,0'u kavşakların ve %75,5'i geçitlerin bulunmadığı noktalarda yaşanmıştır. Kazaların zamansal özelliklerine bakıldığında, kazaların %42,6'sının 10-16 saatleri arasında, %27,6'sının 16-19 saatleri arasında, %13,8'sinin 19-22 saatleri arasında, %11,9'unun 06-10 saatleri arasında ve %4,1'inin 22-06 saatleri arasında gerçekleştiği görülmektedir. Yayaların büyük bir kısmı kazalara hafta içi (%76,2) karışmıştır. Mevsimlere göre kazaların yaşanma sıklıkları arasında önemli bir fark bulunmamaktadır. Kazalar genellikle gündüz (%78,4), açık (%96,1) ve kuru yüzey koşullarında (%94,7) meydana gelmiştir. Kaza noktalarının neredeyse tamamına yakını kentsel (%97,5) bölgelerdedir. Bu kazaların %69,6'sında (1.150 kaza) kazaya karışan yayanın kusuru vardır. %47,9'unda (791 kaza) kazaya karışan sürücünün kusuru vardır. %17,5'inde (289 kaza) ise hem sürücüler hem de yayalar kusurludur. Kazalara karışan sürücülerin %18,6 hız kusuru işlemiştir. Yine sürücülerin %0,6'sı ise yasal limitlerin üzerinde alkol değerine sahiptir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

Geriye doğru eleme (backward elimination) yöntemi ile elde edilen ikili lojistik regresyon modelinin sonuçları Tablo 2'de sunulmuştur. Modeldeki değişkenlerin işaretleri makul çıkmıştır. Geliştirilen modelin *p*-değeri 0,000 (<0,05) ve *Hosmer-Lemeshow ki kare* değeri 11,296 (serbestlik derecesi=8, $p=0,185>0,05$) bulunmuştur. Bu değerler modelin çalışma verilerine uyduğunu göstermektedir. Lojistik regresyonda geliştirilen modelin tahmin gücünü etkileyen bir diğer önemli parametre de kullanılan veri setinin büyüklüğüdür. Bu konudaki farklı çalışmalarda modeldeki bağımsız değişken başına ez 10 tane bağımlı değişkendir az olan durumun veri setinde yer alması gerektiği vurgulanmıştır [110-112]. Bu minimum örneklem büyüklüğü limiti literatürde yaygın olarak kabul görmüş bir yaklaşımdır [113]. Bu çalışmanın modelleme aşamasında 1.652 yaya kazasına ait veri

kullanılmıştır. Bu kazaların 1.556'sı yaralanmayla, 96'sı ölümlle sonuçlanmıştır. Buna bağlı olarak, geliştirilen modelde bağımlı değişken ölüm ve yaralanmalardan oluşmaktadır. Burada az olan durum ölümlerdir. Tablo 2'de görüldüğü üzere, geliştirilen modelde 9 tane bağımsız değişken yer almaktadır. Modeldeki bağımsız değişken başına $96/9=10,7$ veri düşmektedir. Bu değer 10'dan büyük olması modelde kullanılan veri setinin büyüklüğünün yeterli olduğunu göstermektedir.

Tablo 2'ye göre yatay güzergah (kaza noktasında kurb bulunması ($p=0,013$), taşıt tipi (motosiklet ($p=0,042$), yaya yaşı (55-64 ($p=0,003$) ve 65+ ($p=0,000$)), yaya cinsiyeti (kadın ($p=0,000$)), yaya kusuru (yaya kusuru var ($0,007$)), hız kusuru (hız kusuru var ($p=0,000$)) ve modelin sabit terimi ($p=0,000$) 0,05 anlamlılık düzeyinde anlamlı bulunmuştur ($p<0,05$). Yol fonksiyonel sınıflandırması (devlet yolu ($p=0,082$)) ve gün durumu (gece ($p=0,063$)) 0,10 anlamlılık düzeyinde anlamlıdır ($p<0,10$). Diğer parametrelerin anlamlı bir etkisi bulunmamıştır.

İncelenen yaya kazalarında erkeklerin ölüm riskinin kadınların 2,754 (1/0,363) katı olduğu anlaşılmaktadır (bak Tablo 2). Bu sonuç erkek yayaların trafikte daha çok riskli durumlarda karşıdan karşıya geçmeye çalıştıkları şeklinde yorumlanabilir. Bu literatürdeki çoğu çalışmanın sonucu ile örtüşmektedir [39-42]. Bu noktada, kadınların karıştığı yaya kazalarının şiddetinin daha yüksek olduğu ve cinsiyetin yaya kazalarının şiddetine eden bir faktör olmadığı sonucuna ulaşan çalışmalar da göz ardı edilmemelidir [5,15,43]. Bu durum, trafik güvenliği çalışmalarında çalışılan bölgeye, bölgede yaşayan bireylerin algı ve davranışlarına bağlı sonuçlar elde edildiği gerçeğini tekrarlamaktadır.

Kazaya karışan yayaların yaşlarının 55'in üzerinde olması ölüm olasılığı arttırmaktadır. 55-64 yaş grubundaki yayaların ölüm olasılığı 25-54 yaş grubundaki yayaların 3,192 katıdır. Buna ek olarak, 65 ve üstü yaş grubundaki yayaların ölüm olasılığı ise 25-54 yaş grubu yayaların 3,791 katıdır. Literatürde birçok çalışma 60 yaş üstü yaşa sahip yayaların karıştığı kazalardaki ölüm olasılığının daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmıştır [32,41,46-58]. Bu çalışmada bu riskin 55 yaşından sonra artmaya başladığı bulunmuştur. Bu bakımdan elde edilen sonuç önceki çalışmalarla uyumludur. Daha önce belirtildiği gibi bu durum yaşlıların yavaş hareket etmeleriyle, algısal yeteneklerinde oluşan zayıflıklar sonucu riskli durumlarda karşıdan geçmeye çalışmalarıyla ve vücutlarının darbelere karşı daha kırılgan olmalarıyla açıklanmaktadır [43,59-62]. Çalışma diğer yaş grupları için anlamlı bir farklılık bulunamamıştır.

Yayaların kusurlu olması yaya kazalarındaki ölüm olasılığını 2,070 kat arttırmaktadır. Bu geçmiş çalışmaların sonuçlarıyla uyumludur [44,48,66]. Yaya kazalarında sürücülerin kusurlu olup olmamasının anlamlı bir etkisi bulunmamıştır. Spesifik olarak, sürücülerin hız kusuru bulunması durumunda yayaların ölüm olasılığı 2,361 kat artmaktadır. Devlet yolunda kazaya karışan yayaların ölüm olasılığı, caddelerde kazaya karışan yayaların ölüm olasılığının 1,815 katı bulunmuştur. Modelde bu parametre 0,10 seviyesinde anlamlıdır. Geçmiş çalışmalar bölümünde bahsedildiği gibi, hız yaya kazalarının şiddetini belirleyen en önemli faktörlerden biridir ve daha yüksek çarpışma hızları yaya kazalarının şiddetini arttırmaktadır [80-84]. Hız kusurunun olduğu kazalarda, yani sürücülerin yayalara yüksek hızlarda çarptığı kazalarda, ölüm olasılığının yüksek olması önceki çalışmaların sonuçlarıyla uyumludur. Buna paralel biçimde, ortalama seyahat hızlarının yüksek olduğu devlet yolu kesimlerinde yaşanan kazalardaki ölüm olasılığının yüksek olması beklenen bir durumdur. Ek olarak, devlet yollarındaki taşıt-yolu genişliği cadde ve sokaklardan genellikle daha

büyüktür. Bu bakımdan da elde edilen sonuç literatürde daha önce belirtilen taşıt yolu genişliği ile yaya kazalarının şiddeti arasındaki pozitif ilişkiyi tekrarlamaktadır [49,92]. Öte yandan, hız limitlerinin ve dolayısıyla ortalama seyahat hızlarının daha yüksek olduğu otoyollarda yaşanan kazaların anlamlı bir etkisi bulunamamıştır. Bu normal koşullar altında yaya trafiğine yasak olan otoyollarda sadece 4 kaza yaşanmış olması ve bu durumun parametrenin anlamlılığını test etmeye yeterli olmaması ile açıklanabilir.

Taşıt tiplerinden sadece motosikletlerin karıştığı kazaların anlamlı etkisi bulunmuştur. Buna göre otomobillerin karıştığı yaya kazalarındaki ölüm olasılığı motosikletlerin karıştığı kazaların 2,262 (1/0,442) katıdır. Bir başka ifadeyle, motosikletlerin karışması yaya kazalarının şiddetini azaltmaktadır. Geçmiş çalışmaların çoğunda motosikletlerin yaya kazalarının şiddeti üzerine anlamlı bir etkisi bulunamamıştır. Sadece Salon ve McIntyre [48] motosikletlerin karıştığı kazalardaki yaralanma şiddetinin otomobillerin karıştığı kazalardan yüksek olduğunu söylemiştir; ancak, bu çalışmadaki etki bunun tam tersi çıkmıştır. Literatürde birçok çalışmada büyük araçların yaralanma şiddetini artırdığı bulunmuştur [30-31,74]. Fakat bu çalışmada minibüs, kamyonet, kamyon/tır/tanker gibi araçların karıştığı yaya kazalarının yaralanma şiddeti ile otomobillerin karıştığı yaya kazalarının yaralanma şiddeti arasında anlamlı bir fark bulunamamıştır. Bu durum, yaralanma şiddeti üzerinde asıl etkili olan parametrenin taşıt tipi değil, çarpışma hızı olduğu yorumu ile açıklanabilir. Taşıtlarını yasal limitlerinden daha hızlı kullanan sürücülerin karıştığı kazalarda ve ortalama seyahat hızlarının daha yüksek olduğu devlet yollarında meydana gelen yaya kazalarının ölümlü olma olasılığının anlamlı derecede daha yüksek olması bu durumun bir göstergesidir.

Gece koşullarında yaşanan yaya kazalarının ölümlü olma olasılığı gündüz koşullarındaki yaya kazalarının 1,645 katı olduğu bulunmuştur. 0,10 anlamlılık düzeyinde anlamlı olan bu parametrenin etkisi geçmiş çalışmaların sonuçlarıyla uyumludur [44,54,86,94,97-99]. Kazalarının meydana geldiği noktada yatay kurb bulunması yayaların ölüm olasılığını 3,094 kat artırmaktadır. Geçmiş çalışmalarda bu etki incelenmemiştir. Bu bulgu, görüşün kısıtlandığı yatay kurlarda, sürücülerin ve yayaların birbirlerini geç fark etmeleri nedeniyle daha şiddetli yaya kazalarının meydana geldiği şeklinde yorumlanabilir.

Tablo 2 - Lojistik regresyon modeli için parametre tahminleri

Değişken	Katsayı	Standart Hata	p-değeri	Odds Oranı (OR)	%95 Güven Aralığı (OR)
Fonksiyonel Sınıf			0,068		
Cadde (Referans)					
Sokak	-0,855	0,540	0,113	0,425	0,148-1,225
Otoyol	1,956	1,216	0,108	7,070	0,653-76,576
Devlet yolu	0,596	0,343	0,082**	1,815	0,927-3,552
Diğer	-0,515	1,097	0,639	0,598	0,070-5,131

Tablo 2 - Lojistik regresyon modeli için parametre tahminleri (devam)

Değişken	Katsayı	Standart Hata	p-değeri	Odds Oranı (OR)	%95 Güven Aralığı (OR)
Yatay Güzergah					
Düz yol (Referans)					
Kurb	1,130	0,456	0,013*	3,094	1,267-7,557
Geçit					
Geçit yok (Referans)					
Demiryolu	25,025	25x10 ³	0,999	7.380x10 ⁷	0,000
Yaya geçidi	-0,004	0,269	0,987	0,996	0,588-1,687
Okul geçidi	-0,344	1,186	0,772	0,709	0,069-7,251
Gün					
Gündüz (Referans)					
Alacakaranlık	-1,245	1,094	0,255	0,288	0,034-2,460
Gece	0,498	0,267	0,063**	1,645	0,974-2,778
Taşıt Tipi					
Otomobil (Referans)					
Motosiklet	-0,816	0,401	0,042*	0,442	0,201-0,970
Minibüs	0,456	0,509	0,371	1,577	0,581-4,280
Kamyonet	0,330	0,290	0,255	1,391	0,788-2,454
Kamyon/Tır/Tanker	-0,173	0,777	0,824	0,841	0,183-3,858
Otobüs	0,647	0,501	0,196	1,911	0,716-5,101
Diğer	1,204	1,136	0,289	3,332	0,360-30,876
Yaya Yaşı					
25-54 (Referans)					
0-17	-0,488	0,374	0,192	0,614	0,295-1,278
18-24	-0,031	0,531	0,954	0,970	0,342-2,478
55-64	1,161	0,389	0,003*	3,192	1,488-6,845
65+	1,333	0,316	0,000*	3,791	2,043-7,037
Yaya Cinsiyeti					
Erkek (Referans)					
Kadın	-1,013	0,265	0,000*	0,363	0,216-0,611

Tablo 2 - Lojistik regresyon modeli için parametre tahminleri (devam)

Değişken	Katsayı	Standart Hata	p-değeri	Odds Oranı (OR)	%95 Güven Aralığı (OR)
Yaya Kusuru					
Yok (Referans)					
Var	0,728	0,272	0,007*	2,070	1,215-3,529
Hız Kusuru					
Yok (Referans)					
Var	0,859	0,246	0,000*	2,361	1,459-3,819
Sabit	-4,298	0,415	0,000*	0,014	
Model Parametreleri					
Gözlem sayısı: 1.652					
Anlamlılık (p-değeri): 0,000 (<0,05)					
Hosmer ve Lemeshow ki kare: 11,296 (p=0,185>0,05)					
Serbestlik derecesi: 8					

6. SINIRLILIKLAR

Bu çalışmanın da bazı sınırlılıkları bulunmaktadır. Bu çalışmada kapsamında sadece yaya kazalarının şiddetine etkide eden faktörler incelenmiştir. Bu nedenle elde edilen sonuçlar ile yaya kazalarının sıklığı ilişkilendirilmemelidir. Örnek olarak, bu çalışmanın sonuçlarına bakılarak, yatay kurlar daha çok yaya kazasına neden oluyor şeklinde bir çıkarım yapılmamalıdır. Çalışmadaki modele bakarak sadece yatay kurların yaya kazalarının şiddetini arttırdığı şeklinde bir yorum yapılabilir.

Türkiye’de yaya kazalarının ölümlü ve yaralanmalı olarak iki seviyede raporlanması çalışmanın en önemli sınırlılığıdır. Buna ek olarak, düşük hızlarda gerçekleşen ve herhangi bir yaralanmanın yaşanmadığı bazı yaya kazaları kayıt altına alınmamaktadır. Bu çalışmadaki modelin ölüm ve yaralanma şeklinde iki seviyeli olmasını zorunlu hale gerektirmiştir. Literatür incelendiğinde, bazı ülkelerde yayalarının yaralanma şiddetinin yaralanmamış, muhtemel yaralanma, kapasite kısıtlamayan yaralanma, kapasite kısıtlayan yaralanma ve ölüm gibi farklı seviyelerde raporlandığı görülmektedir. Bu durum farklı model alternatiflerinin kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Böyle durumlarda hafif yaralanma (yaralanmamış, muhtemel yaralanma, kapasite sınırlamayan yaralanma seviyelerinin birleşimi), kapasite kısıtlayan yaralanma (ciddi yaralanma) ve ölüm şeklinde 3 seviyeli model geliştirebilmektedir [2,51]. Benzer şekilde, hafif yaralanma (yaralanmamış, muhtemel yaralanma, kapasite sınırlamayan yaralanma seviyelerinin birleşimi) ve ağır yaralanma/ölüm (kapasite sınırlayan yaralanma ve ölüm seviyelerinin birleşimi) şeklinde 2 seviyeli yaklaşımlar da kullanılmıştır [87].

Belirtildiği üzere, çalışmadaki modelin bağımlı değişkeninde şeklinde iki seviye (yaralı ve ölü) kullanılmak zorunda kalınmıştır. Böyle bir durumda, geliştirilen modelde hangi noktadaki yaralanma kayıtlarının kullanıldığı önem kazanmaktadır. Kaza noktasındaki kayıtların kullanıldığı durumda, kaza noktasında yaralı olarak kayıt altına alınan ağır yaralı yayaların kaza sonrası süreçte hayatını kaybetme olasılığı göz ardı edilmiş olacaktır. Bunun sonucunda, bu yayalar modelde yaralı olarak kullanılmış olacaktır. Böyle bir duruma düşmemek için, bu çalışmada yayaların kaza sonrasındaki 30 günlük sürecin sonucundaki yaralanma seviyeleri kullanılmıştır. Türkiye’de trafik kazalarının raporlanmasında kullanılan yaralanma seviyelerinin artırılması durumunda, literatürdekilere benzer yaklaşımlar geliştirilebilecektir. Buna ek olarak, trafik kazalarında toplanan verilerin çeşitliliğinin artırılması, bu konuda ileride yapılacak çalışmaların modelleme aşamasına zenginlik katacaktır.

7. ÖNERİLER

Bu çalışmada ikili lojistik regresyon modeli kullanılarak Mersin’de gerçekleşen yaya kazalarında yaralanma şiddetine etki eden faktörler belirlenmeye çalışılmıştır. Bu kapsamda, 2015-2017 yılları arasında tek bir araç ve tek bir yayanın karıştığı 1.652 yaya kazasına ait detaylı veriler kullanılmıştır. Model sonuçları, kazalara 55 yaş ve üstü yayaların karışmasının, erkek yayaların karışmasının, kazalarda yaya kaynaklı kusur ve hız kusurunun bulunmasının, kaza noktasında yatay kurb bulunmasının, kazaların devlet yollarında ve gece meydana gelmesinin yaya kazalarının şiddetini arttırdığını göstermiştir. Yayalara motosikletlerin çarpması ise yaya kazalarının şiddetini azaltmaktadır.

Türkiye’de yakın zamandaki istatistikler incelendiğinde yaya ölümlerinin %20 oranında azaldığı görülmektedir. Buna rağmen yaya ölümleri halen trafik kazalarındaki ölümlerin %22’sini oluşturmaktadır. Bu noktada 2019 yılının “Öncelik Hayatın, Öncelik Yayanın” sloganıyla “Yaya Önceliği Yılı” ilan edilmesi, yaya güvenliğinin ve bu konudaki farkındalığın iyileştirilmesi açısından önemli bir gelişmedir. Mersin’de gerçekleştirilen bu çalışma, kentteki yerel yönetimlere ve emniyet birimlerine yaya güvenliğinin iyileştirilmesinde öncelik verilmesi gereken noktalar konusunda yardımcı olabilecektir. Çalışmanın sonuçları yaya güvenliğinde 55 yaş ve üstü yayalara, erkek yayalara, hız yönetimi ve denetimine öncelik verilmesi gerektiğini göstermektedir. Çalışmada yayaların kusurlu olması kazaların şiddetini arttırdığını göstermiştir. Buna bağlı olarak, yaya güvenliği konusunda yapılacak eğitim kampanyalarında ve geliştirilecek stratejilerde sadece sürücülerin değil yayaların da trafik kurallarına uymalarının sağlanması hedeflenmelidir. Hız kusurunun bulunduğu kazaların ölüm olasılığını artırması, kazaların yoğunlaştığı kesimlerde hız düşürücü önlemlerin gerekliliğini ortaya koymaktadır. Çalışma bulgularına göre kazalara 55 yaş ve üstü yayaların karışması ölüm olasılığını arttırmaktadır. Bu sonuç trafik ışıklarındaki yaya yeşil sürelerinin ayarlanmasında 55 yaş üstü bireylerin yürüme hızlarının da dikkate alınması gerekliliğini göstermektedir. Bunun yanı sıra, yol geometrisinin mümkün kıldığı noktalarda yol ortasına yerleştirilecek platformlarla yaşlı yayaların iki aşamada karşıdan karşıya geçebilmelerinin sağlanması gerekmektedir. Yatay kurların bulunduğu kesimlerde yayaların taşıtları, sürücülerin ise yayaları algılamaları zorlaştırmaktadır. Bu sorunun azaltılmasında taşıtların hızlarını düşürücü zemin işaretlemeleri etkili olabilir. Diğer yandan yaya geçitlerinin kurların başladığı/bittiği noktalardan yeterli mesafede düzenlenmesi önerilmektedir. Bunun yanı sıra yaya

işaretleme ve araçların algılanmasını kolaylaştıracak renk ve aydınlatma elemanlarının eklenmesi ölümlü kazaları azaltabilir. Literatürde benzer çalışmaların artırılması ile farklı kentlerin karşılaştırılması, bu çalışmadaki bulguların diğer kentlerdeki etkilerinin tespit edilmesi, ulusal düzeyde alınacak önlemler için daha kapsamlı çalışmaların yapılması yaya güvenliğinin iyileştirilmesinde etkili olacaktır.

Semboller

OR : Odds Oranı

Kaynaklar

- [1] Kim, S., Ulfarsson, G. F., Traffic Safety in an Aging Society: Analysis of Older Pedestrian Crashes. *Journal of Transportation Safety & Security*, 11(3), 323-332, 2019.
- [2] Abay, K. A., Examining Pedestrian-Injury Severity using Alternative Disaggregate Models. *Research in Transportation Economics*, 43(1), 123-136, 2013
- [3] Lee, I. M., Buchner, D. M., The Importance of Walking to Public Health. *Medicine & Science in Sports & Exercise*, 40(7), S512-S518, 2008.
- [4] Rothman, L., Howard, A. W., Camden, A., Macarthur, C., Pedestrian Crossing Location Influences Injury Severity in Urban Areas. *Injury prevention*, 18(6), 365-370, 2012.
- [5] Moudon, A. V., Lin, L., Jiao, J., Hurvitz, P., Reeves, P., The Risk of Pedestrian Injury and Fatality in Collisions with Motor Vehicles: A Social Ecological Study of State Routes and City Streets in King County, Washington. *Accident Analysis & Prevention*, 43(1), 11-24, 2011.
- [6] Islam, S., Jones, S. L., Pedestrian At-Fault Crashes on Rural And Urban Roadways in Alabama. *Accident Analysis & Prevention*, 72, 267-276, 2014.
- [7] Kim, M., Kho, S. Y., Kim, D. K., Hierarchical Ordered Model for Injury Severity of Pedestrian Crashes in South Korea. *Journal of safety research*, 61, 33-40, 2017.
- [8] Niebuhr, T., Junge, M., Rosén, E., Pedestrian Injury Risk and the Effect of Age. *Accident Analysis & Prevention*, 86, 121-128, 2016.
- [9] Elvik, R., *The Handbook of Road Safety Measures*, 2004.
- [10] Pucher, J., Dijkstra, L., Promoting Safe Walking and cycling to Improve Public Health: Lessons from the Netherlands and Germany. *American Journal of Public Health*, 93(9), 1509-1516, 2003.
- [11] Sullman, M. J., Gras, M. E., Font-Mayolas, S., Masferrer, L., Cunill, M., Planes, M., The Pedestrian Behaviour of Spanish Adolescents. *Journal of Adolescence*, 34(3), 531-539, 2011.
- [12] World Health Organization, *Global Status Report on Road Safety 2015*. World Health Organization, 2018.

- [13] European Road Safety Observatory, Traffic Safety Basic Facts 2018: Pedestrians. European Road Safety Observatory, 2018.
- [14] Zhang, G., Yau, K. K., Zhang, X., Analyzing Fault and Severity in Pedestrian–Motor Vehicle Accidents in China. *Accident Analysis & Prevention*, 73, 141-150, 2014.
- [15] Sze, N. N., Wong, S. C., Diagnostic Analysis of the Logistic Model for Pedestrian Injury Severity in Traffic Crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 39(6), 1267-1278, 2007.
- [16] Kong, C., Yang, J., Logistic Regression Analysis of Pedestrian Casualty Risk in Passenger Vehicle Collisions in China. *Accident Analysis & Prevention*, 42(4), 987-993, 2010.
- [17] Ulfarsson, G. F., Kim, S., Booth, K. M., Analyzing Fault in Pedestrian–Motor Vehicle Crashes in North Carolina. *Accident Analysis & Prevention*, 42(6), 1805-1813, 2010.
- [18] Türkiye İstatistik Enstitüsü. Karayolu Trafik Kaza İstatistikleri, 2018. Türkiye, 2019. <http://www.tuik.gov.tr/PreHaberBultenleri.do?id=30640>
- [19] Hoşkal, D., 2003-2004 Yıllarında Diyarbakır İlinde Meydana Gelen Yaralanmalı Yaya Kazalarının İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 2006.
- [20] Kaygısız, Ö., Yıldız, A., Duzgun, S., Spatio-Temporal Pedestrian Accident Analysis to Improve Urban Pedestrian Safety: The Case of The Eskisehir Motorway. *Gazi University Journal of Science*, 28(4), 623-630, 2015.
- [21] Avcı, C., Durduran, S. S., Analysis of Pedestrian Accidents Using a Geographical Information System (GIS) in Konya City, Turkey. *WIT Transactions on the Built Environment*, 134, 495-501, 2013.
- [22] Cınarbaş Akın, S., Ankara Şehir İçinde Meydana Gelen Yaralanmalı Yaya Kazalarının Konumsal Olarak İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 2002.
- [23] Özkan, K., Ankara'da Meydana Gelen Yaya Kazalarına Uygun Denetim Politikasının Tespiti, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 2002.
- [24] Yüksekol, İ., Evaluation of Pedestrian Safety Around Bus Stops Using Geographic Information Systems, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, 2012.
- [25] Ozen, M., Sayin, C. G., Yuruk, Y., Analysis of the Pedestrian Accidents in Turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 2(3), 100-109, 2017.
- [26] Baltés, M. R., Descriptive Analysis of Crashes Involving Pedestrians in Florida, 1990–1994. *Transportation Research Record*, 1636(1), 138-145, 1998.
- [27] Jensen, S., Pedestrian Safety in Denmark. *Transportation Research Record*, 1674(1), 61-69, 1999.
- [28] Graham, D. J., Glaister, S., Spatial Variation in Road Pedestrian Casualties: The Role of Urban Scale, Density and Land-Use Mix. *Urban Studies*, 40(8), 1591-1607, 2003.
- [29] Martinez, K. L. H., Porter, B. E., The Likelihood of Becoming a Pedestrian Fatality and Drivers' Knowledge of Pedestrian Rights and Responsibilities in the Commonwealth

- of Virginia. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 7(1), 43-58, 2004.
- [30] Ballesteros, M. F., Dischinger, P. C., Langenberg, P., Pedestrian Injuries and Vehicle Type in Maryland, 1995–1999. *Accident Analysis & Prevention*, 36(1), 73-81, 2004.
- [31] Roudsari, B. S., Mock, C. N., Kaufman, R., Grossman, D., Henary, B. Y., Crandall, J., Pedestrian Crashes: Higher Injury Severity and Mortality Rate for Light Truck Vehicles Compared with Passenger Vehicles. *Injury Prevention*, 10(3), 154-158, 2004.
- [32] Eluru, N., Bhat, C. R., Hensher, D. A., A Mixed Generalized Ordered Response Model for Examining Pedestrian and Bicyclist Injury Severity Level in Traffic Crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 40(3), 1033-1054, 2008.
- [33] Mabunda, M. M., Swart, L. A., Seedat, M., Magnitude and Categories of Pedestrian Fatalities in South Africa. *Accident Analysis & Prevention*, 40(2), 586-593, 2008.
- [34] Zegeer, C. V., Zegeer, S. F., 1988. Pedestrians and Traffic-Control Measures, Report No: 139, 1988.
- [35] Aidoo, E. N., Amoh-Gyimah, R., Ackaah, W., The Effect of Road and Environmental Characteristics on Pedestrian Hit-and-Run Accidents in Ghana. *Accident Analysis & Prevention*, 53, 23-27, 2013.
- [36] Colucci, B., Valle, D., Characterization of Motor Vehicle–Pedestrian Fatalities in Urban Arterial Corridor, In *Transportation Research Board 93rd Annual Meeting*, Transportation Research Board of the National Academies, 2014.
- [37] Liu, J., Hainen, A., Li, X., Nie, Q., Nambisan, S., Pedestrian Injury Severity in Motor Vehicle Crashes: An Integrated Spatio-Temporal Modeling Approach. *Accident Analysis & Prevention*, 132, 105272, 2019.
- [38] Federal Highway Administration, KABCO Injury Classification Scale and Definitions, 2019.
https://safety.fhwa.dot.gov/hsip/spm/conversion_tbl/pdfs/kabco_ctable_by_state.pdf
- [39] Campbell, B. J., Zegeer, C. V., Huang, H. H., Cynecki, M. J., A Review of Pedestrian Safety Research in the United States and Abroad, Publication No: FHWA-RD-03-Federal Highway Administration, United States, 2003.
- [40] Holland, C., Hill, R., The Effect of Age, Gender and Driver Status on Pedestrians’ Intentions to Cross the Road in Risky Situations. *Accident Analysis & Prevention*, 39(2), 224-237, 2007.
- [41] Clifton, K. J., Burnier, C. V., Akar, G., Severity of Injury Resulting from Pedestrian Vehicle Crashes: What Can We Learn From Examining the Built Environment?. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(6), 425-436, 2009.
- [42] Rosén, E., Sander, U., Pedestrian Fatality Risk as a Function of Car Impact Speed. *Accident Analysis & Prevention*, 41(3), 536-542, 2009.
- [43] Lee, C., Abdel-Aty, M., Comprehensive Analysis of Vehicle–Pedestrian Crashes at Intersections in Florida. *Accident Analysis & Prevention*, 37(4), 775-786, 2005.

- [44] Kim, J. K., Ulfarsson, G. F., Shankar, V. N., Kim, S., Age and Pedestrian Injury Severity in Motor-Vehicle Crashes: A Heteroskedastic Logit Analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 40(5), 1695-1702, 2008.
- [45] Kim, J. K., Ulfarsson, G. F., Shankar, V. N., Mannering, F. L., A Note on Modeling Pedestrian-Injury Severity in Motor-Vehicle Crashes with the Mixed Logit Model. *Accident Analysis & Prevention*, 42(6), 1751-1758, 2010.
- [46] Sklar, D. P., Demarest, G. B., McFeeley, P., Increased Pedestrian Mortality among the Elderly. *The American journal of emergency medicine*, 7(4), 387-390, 1989.
- [47] Fontaine, H., Gourlet, Y., Fatal Pedestrian Accidents in France: A Typological Analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 29(3), 303-312, 1997.
- [48] Salon, D., McIntyre, A., Determinants of Pedestrian and Bicyclist Crash Severity by Party at Fault in San Francisco, CA. *Accident Analysis & Prevention*, 110, 149-160, 2018.
- [49] Zajac, S. S., Ivan, J. N., Factors Influencing Injury Severity of Motor Vehicle–Crossing Pedestrian Crashes in Rural Connecticut. *Accident Analysis & Prevention*, 35(3), 369-379, 2003.
- [50] Henary, B. Y., Ivarsson, J., Crandall, J. R., The Influence of Age on the Morbidity and Mortality of Pedestrian Victims. *Traffic injury prevention*, 7(2), 182-190, 2006.
- [51] Tay, R., Choi, J., Kattan, L., Khan, A., A Multinomial Logit Model of Pedestrian–Vehicle Crash Severity. *International Journal of Sustainable Transportation*, 5(4), 233-249, 2011.
- [52] Loo, B. P., Tsui, K. L., Pedestrian Injuries in an Ageing Society: Insights from Hospital Trauma Registry. *Journal of Trauma and Acute Care Surgery*, 66(4), 1196-1201, 2009.
- [53] Watanabe, R., Katsuhara, T., Miyazaki, H., Kitagawa, Y., Yasuki, T., Research of the Relationship of Pedestrian Injury to Collision Speed, Car-Type, Impact Location and Pedestrian Sizes using Human FE Model (THUMS Version 4), Report No: 2012-22-0007, SAE Technical Paper, 2012.
- [54] Jang, K., Park, S. H., Kang, S., Song, K. H., Chung, S., Evaluation of Pedestrian Safety: Geographical Identification of Pedestrian Crash Hotspots and Evaluating Risk Factors for Injury Severity. In *Transportation Research Board 92nd Annual Meeting*, Transportation Research Board of the National Academies, 2013.
- [55] Aziz, H. A., Ukkusuri, S. V., Hasan, S., Exploring the Determinants of Pedestrian–Vehicle Crash Severity in New York City. *Accident Analysis & Prevention*, 50, 1298-1309, 2013.
- [56] Harruff, R. C., Avery, A., Alter-Pandya, A. S., Analysis of Circumstances and Injuries in 217 Pedestrian Traffic Fatalities. *Accident Analysis & Prevention*, 30(1), 11-20, 1998.
- [57] Islam, S., Hossain, A. B., Comparative Analysis of Injury Severity Resulting from Pedestrian–Motor Vehicle and Bicycle-Motor Vehicle Crashes on Roadways in Alabama. *Transportation research record*, 2514(1), 79-87, 2015.

- [58] Li, D., Ranjitkar, P., Zhao, Y., Yi, H., Rashidi, S., Analyzing Pedestrian Crash Injury Severity under Different Weather Conditions. *Traffic injury prevention*, 18(4), 427-430, 2017.
- [59] Oxley, J., Fildes, B., Ihsen, E., Charlton, J., Day, R., Differences in Traffic Judgements between Young and Old Adult Pedestrians. *Accident Analysis & Prevention*, 29(6), 839-847, 1997.
- [60] Maring, W., Van Schagen, I., Age Dependence of Attitudes and Knowledge in Cyclists. *Accident Analysis & Prevention*, 22(2), 127-136, 1990.
- [61] DeLucia, P. R., Bleckley, M. K., Meyer, L. E., Bush, J. M., Judgments about Collision in Younger and Older Drivers. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 6(1), 63-80, 2003.
- [62] Dommès, A., Cavallo, V., Vienne, F., Aillerie, I., Age-Related Differences in Street-Crossing Safety before and after Training of Older Pedestrians. *Accident Analysis & Prevention*, 44(1), 42-47, 2012.
- [63] Harrell, W. A., Precautionary Street Crossing by Elderly Pedestrians. *The International Journal of Aging and Human Development*, 32(1), 65-80, 1991.
- [64] Wazana, A., Rynard, V. L., Raina, P., Krueger, P., Chambers, L. W. Are Child Pedestrians at Increased Risk of Injury on One-Way Compared to Two-Way Streets?. *Canadian Journal of Public Health*, 91(3), 201-206, 2000.
- [65] Yasmin, S., Eluru, N., Ukkusuri, S. V., Alternative Ordered Response Frameworks for Examining Pedestrian Injury Severity in New York City. *Journal of Transportation Safety & Security*, 6(4), 275-300, 2014.
- [66] Haleem, K., Alluri, P., Gan, A., Analyzing Pedestrian Crash Injury Severity at Signalized and Non-Signalized Locations. *Accident Analysis & Prevention*, 81, 14-23, 2015.
- [67] Sarkar, S., Tay, R., Hunt, J. D., Logistic Regression Model of Risk of Fatality in Vehicle-Pedestrian Crashes on National Highways in Bangladesh. *Transportation Research Record*, 2264(1), 128-137, 2011.
- [68] Öström, M., Eriksson, A., Pedestrian Fatalities and Alcohol. *Accident Analysis & Prevention*, 33(2), 173-180, 2001.
- [69] DaSilva, M. P., Smith, J. D., Najm, W. G., Analysis of Pedestrian Crashes, Publication No: DOT-VNTSC-NHTSA-02-02, U.S. Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, United States, 2003.
- [70] Sciortino, S., Chiapello, E., Environmental, Behavioral, and Demographic Factors that Affect the Severity of Pedestrian Injuries. *AAP*, 37, 357-68, 2005.
- [71] Spainhour, L. K., Wootton, I. A., Modeling Fault in Fatal Pedestrian Crashes by Using Various Data Sources. *Transportation Research Record*, 2002(1), 64-71, 2007.
- [72] Struik, M., Alexander, K., Cave, T., Fleming, A., Lyttle, J., Stone, A., Pedestrian Accident Project Report No. 4: Literature Review of Factors Contributing to Pedestrian Accidents (No. GR/88/8), 1988.

- [73] Oxley, J., Lenné, M., Corben, B., The Effect of Alcohol Impairment on Road-Crossing Behaviour. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 9(4), 258-268, 2006.
- [74] Lefler, D. E., Gabler, H. C., The Fatality and Injury Risk of Light Truck Impacts With Pedestrians in The United States. *Accident Analysis & Prevention*, 36(2), 295-304, 2004.
- [75] Matsui, Y., Effects of Vehicle Bumper Height and Impact Velocity on Type of Lower Extremity Injury in Vehicle–Pedestrian Accidents. *Accident Analysis & Prevention*, 37(4), 633-640, 2005.
- [76] Pasanen, E., Salmivaara, H., Driving Speeds and Pedestrian Safety in the City of Helsinki. *Traffic Engineering and Control*, 34(6), 308-310, 1993.
- [77] Davis, G. A., Relating Severity of Pedestrian Injury to Impact Speed in Vehicle-Pedestrian Crashes: Simple Threshold Model. *Transportation Research Record*, 1773(1), 108-113, 2001.
- [78] Leden, L., Gårder, P., Johansson, C., Safe Pedestrian Crossings for Children and Elderly. *Accident Analysis & Prevention*, 38(2), 289-294, 2006.
- [79] Starnes, M., Longthorne, A., Child Pedestrian Fatality Rates by Striking Vehicle Body Type: A Comparison of Passenger Cars, Sport Utility Vehicles, Pickups, and vans, Publication No: HS-809 640, United States 2003.
- [80] Cuerden, R., Richards, D., Hill, J., Pedestrians and Their Survivability at Different Impact Speeds. In *Proceedings of the 20th International Technical Conference on the Enhanced Safety of Vehicles*, Lyon, France, Paper No: 07-0440, 2007.
- [81] Leaf, W. A., Preusser, D. F., Literature Review on Vehicle Travel Speeds and Pedestrian Injuries. US Department of Transportation, National Highway Traffic Safety Administration, 1999.
- [82] Limpert, R., Motor Vehicle Crash Reconstruction and Cause Analysis, Michie Company, United States, 1994.
- [83] Rosén, E., Stigson, H., Sander, U., Literature Review of Pedestrian Fatality Risk as A Function of Car Impact Speed. *Accident Analysis & Prevention*, 43(1), 25-33, 2011.
- [84] Oh, C., Kang, Y. S., Kim, B., Kim, W., Analysis of pedestrian-vehicle crashes in Korea. In 84th Annual Meeting, Transportation Research Board of the National Academies, 2005.
- [85] Anderson, R. W., McLean, A. J., Farmer, M. J. B., Lee, B. H., Brooks, C. G., Vehicle Travel Speeds and the Incidence of Fatal Pedestrian Crashes. *Accident Analysis & Prevention*, 29(5), 667-674, 1997.
- [86] Pour-Rouholamin, M., Zhou, H., Investigating the Risk Factors Associated with Pedestrian Injury Severity in Illinois. *Journal of Safety Research*, 57, 9-17, 2016.
- [87] Verzosa, N., Miles, R., Severity of Road Crashes Involving Pedestrians in Metro Manila, Philippines. *Accident Analysis & Prevention*, 94, 216-226, 2016.

- [88] Garber, N. J., Lienau, T., Traffic and Highway Geometric Characteristics associated with Pedestrian Crashes in Virginia, Report No: 96-R29, Virginia Transportation Research Council, United States, 1996.
- [89] LaScala, E. A., Gerber, D., Gruenewald, P. J., Demographic and Environmental Correlates of Pedestrian Injury Collisions: A Spatial Analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 32(5), 651-658, 2000.
- [90] Zahabi, S. A. H., Strauss, J., Manaugh, K., Miranda-Moreno, L. F., Estimating Potential Effect of Speed Limits, Built Environment, and other Factors on Severity of Pedestrian and Cyclist Injuries in Crashes. *Transportation Research Record*, 2247(1), 81-90, 2011
- [91] Ivan, J. N., Garder, P. E., Zajac, S. S. Finding Strategies to Improve Pedestrian Safety in Rural Areas, 2001.
- [92] Ukkusuri, S., Miranda-Moreno, L. F., Ramadurai, G., Isa-Tavarez, J., The Role of Built Environment on Pedestrian Crash Frequency. *Safety Science*, 50(4), 1141-1151, 2012.
- [93] Abdel-Aty, M., Keller, J., Exploring The Overall and Specific Crash Severity Levels at Signalized Intersections. *Accident Analysis & Prevention*, 37(3), 417-425, 2005.
- [94] Siddiqui, N. A., Chu, X., Guttenplan, M., Crossing Locations, Light Conditions, and Pedestrian Injury Severity. *Transportation Research Record*, 1982(1), 141-149, 2006.
- [95] Pitt, R., Guyer, B., Hsieh, C. C., Malek, M., The Severity of Pedestrian Injuries in Children: An Analysis of the Pedestrian Injury Causation Study. *Accident Analysis & Prevention*, 22(6), 549-559, 1990.
- [96] Agran, P. F., Winn, D. G., & Anderson, C. L., Differences in Child Pedestrian Injury Events by Location. *Pediatrics*, 93(2), 284-288, 1994.
- [97] Tulu, G. S., Washington, S., Haque, M. M., King, M. J., Injury Severity of Pedestrians Involved in Road Traffic Crashes in Addis Ababa, Ethiopia. *Journal of Transportation Safety & Security*, 9(1), 47-66, 2017
- [98] Miles-Doan, R., Alcohol Use among Pedestrians and the Odds of Surviving an Injury: Evidence from Florida Law Enforcement Data. *Accident Analysis & Prevention*, 28(1), 23-31, 1996.
- [99] Sullivan, J. M., Flannagan, M. J., Differences in Geometry of Pedestrian Crashes in Daylight and Darkness. *Journal of Safety Research*, 42(1), 33-37, 2011.
- [100] Tarko, A., Azam, M. S., Pedestrian Injury Analysis with Consideration of the Selectivity Bias in Linked Police-Hospital Data. *Accident Analysis & Prevention*, 43(5), 1689-1695, 2011.
- [101] Marshall, W. E., Garrick, N. W., Hansen, G., Reassessing On-Street Parking. *Transportation Research Record*, 2046(1), 45-52, 2008.
- [102] Noland, R. B., Quddus, M. A., Analysis of Pedestrian and Bicycle Casualties with Regional Panel Data. *Transportation Research Record*, 1897(1), 28-33, 2004.

- [103] Savolainen, P. T., Mannering, F. L., Lord, D., Quddus, M. A., The Statistical Analysis of Highway Crash-Injury Severities: A Review and Assessment of Methodological Alternatives. *Accident Analysis & Prevention*, 43(5), 1666-1676, 2011.
- [104] Krull, K. A., Khattak, A. J., Council, F. M., Injury Effects of Rollovers and Events Sequence in Single-Vehicle Crashes. *Transportation Research Record*, 1717(1), 46-54, 2000.
- [105] Toy, E. L., Hammitt, J. K., Safety Impacts of SUVs, Vans, and Pickup Trucks in Two-Vehicle Crashes. *Risk Analysis: An International Journal*, 23(4), 641-650, 2003.
- [106] Rifaat, S. M., Tay, R., Effects of Street Patterns on Injury Risks in Two-Vehicle Crashes. *Transportation Research Record*, 2102(1), 61-67, 2009.
- [107] Haleem, K., Abdel-Aty, M., Examining Traffic Crash Injury Severity at Unsignalized Intersections. *Journal of Safety Research*, 41(4), 347-357, 2010.
- [108] Greene, W. H. *Econometric Analysis*. Pearson Education India, 2003.
- [109] Türkiye İstatistik Enstitüsü. Nüfus İstatistikleri. Türkiye, 2019. http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1059
- [110] Peduzzi, P., Concato, J., Kemper, E., Holford, T. R., Feinstein, A. R., A Simulation Study of the Number of Events per Variable in Logistic Regression Analysis. *Journal of clinical epidemiology*, 49(12), 1373-1379, 1996.
- [111] Moons, K. G., de Groot, J. A., Bouwmeester, W., Vergouwe, Y., Mallett, S., Altman, D. G., ... Collins, G. S., Critical Appraisal and Data Extraction for Systematic Reviews of Prediction Modelling Studies: The CHARMS Checklist. *PLoS Medicine*, 11(10), 2014.
- [112] Pavlou, M., Ambler, G., Seaman, S., De Iorio, M., Omar, R. Z., Review and Evaluation of Penalised Regression Methods for Risk Prediction in Low-Dimensional Data with Few Events. *Statistics in Medicine*, 35(7), 1159-1177, 2015.
- [113] Vittinghoff, E., McCulloch, C. E. Relaxing the Rule of Ten Events per Variable in Logistic and Cox Regression. *American journal of epidemiology*, 165(6), 710-718, 2007.

Nanokil/Polimer/Bitüm Nanokompozit Hazırlama Yönteminin Asfalt Karışım Performansı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması

Erol İSKENDER¹
Atakan AKSOY²

ÖZ

Bu çalışmanın amacı, nanokil/polimer/bitüm nanokompozitlerin üretim süreçlerinin asfalt karışım performansı üzerindeki etkilerini araştırmaktır. Çalışmada nanokil (NC) ile stiren bütadiyen stiren (SBS) elastomerik polimeri ve etilen vinil asetat (EVA) plastomerik polimerleri katılma önceliği değiştirilerek bitüme ilave edilmiştir. Polimer modifiye asfalt nanokompozitlerle üretilen asfalt karışımlar dolaylı çekme mukavemeti, modifiye Lottman yöntemi, tekrarlı sünme deneyi ve Fransız tekerlek izi testleri ile değerlendirilmiştir. EVA/nanokil/bitüm nanokompozitler için öncelikle EVA polimerinin eklenmesi durumunda su hasarı, deformasyon ve çatlama dirençlerinde artış gözlenmiştir. SBS'li nanokompozitler kullanıldığında önce nanokil ilavesi genelde daha iyi sonuçlar vermiştir.

Anahtar Kelimeler: Asfalt karışım, nanokompozit, polimer, su hasarı, tekerlek izi, çatlama.

ABSTRACT

Investigation of the Effects of Nanoclay/Polymer/Bitumen Nanocomposite Preparation Method on Asphalt Mixture Performance

The aim of this study is to investigate the effects of the production processes of nanoclay/polymer/bitumen nanocomposites on the performance of the asphalt mixture. In the study, styrene butadiene styrene (SBS) and ethylene vinyl acetate (EVA) with nanoclay (NC) were added to the bitumen by changing the priority of adding. Asphalt mixtures produced with polymer modified asphalt nanocomposites were evaluated by indirect tensile strength, modified Lottman method, repeated creep test and LCPC French rutting test. For EVA/nanoclay/bitumen nanocomposites, when EVA polymer was added to bitumen before

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 11 Şubat 2020 günü ulaşmıştır. 28 Eylül 2020 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2021 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.686346>

1 Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon - eiskender@ktu.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0001-7934-839X>

2 Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Trabzon - aaksoy@ktu.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0001-5232-6465>

nanoclay, higher water damage, cracking and deformation resistances were obtained. For SBS/nanoclay/bitumen nanocomposites, better results were revealed by adding NC before.

Keywords: Asphalt mixture, nanocomposite, polymer, water damage, deformation.

1. GİRİŞ

Asfalt kaplamalar servis ömrü süresince ağır ve tekrarlı trafik yükleri ile doğal çevre koşullarının etkilerine maruz kalmaktadır. Sanayi ve teknolojinin gelişmesi ile daha fazla taşımacılığa ihtiyaç duyulması, nüfusun ve hareketliliğin artması, trafiğe çıkan araç sayısının yükselmesi gibi nedenlerle yükleme koşulları her geçen gün daha da ağırlaşmakta, buna bağlı olarak da asfalt kaplamaların performansının yükseltilmesi gerekmektedir [1].

Modifiye bitümler, asfalt karışımlarının uzun dönem performansını artırırken, kaplama bozulmalarını azaltmada önemli rol oynamaktadırlar. Modifiye bitüm üretiminde çeşitli modifikasyon katkıları kullanılabilir de polimerler en çok tercih edilen katkı maddelerinin başında yer almaktadır. Polimer modifikasyonu, bitümlü bağlayıcının fiziksel ve reolojik özelliklerini iyileştirmede etkili bir yöntem olarak sunulmaktadır [2-6].

Polimer modifiye bitüm kullanımı ile asfalt kaplamanın yorulma direnci artarken çatlama ve tekerlek izi oluşum potansiyeli azalmaktadır. Polimer katkı maddeleri stiren / bütadiyen, doğal ve kırıntı kauçukları içeren elastomerik polimerler ve polipropilen ve polietilen gibi plastomerik polimerler olmak üzere iki ana gruba ayrılmaktadırlar [3]. Asfalt kaplama performansının iyileştirilmesinde stiren-bütadiyen-stiren (SBS) ve etilen vinil asetat (EVA) en çok tercih edilen elastomerik ve plastomerik polimerlerdir [4]. Yine de bitüm ile polimer arasındaki uyumsuzluktan kaynaklanabilen depolama stabilitesi gibi problemlerden dolayı polimerlerinin mükemmel olarak nitelendirilebilecek performans göstermedikleri ifade edilmektedir [5-6].

Son zamanlarda, bitümün modifiye edilmesindeki problemler nedeni ile polimerler yanında ikincil malzemeler de kullanılmaya başlanmıştır. Karbon nanotüp, titanyum dioksit, nanokil (organik montmorillonit), nanokalsiyumtrioksokarbonat, nanosilikon oksit ve nanoçinko oksit bu alanda üzerinde çalışılmaya başlanan nano malzemelerdir. Bitüm modifikasyonu için nanomalzeme/polimer kompozit modifikasyonu polimer modifikasyonuna en iyi alternatif olarak sunulmaktadır [7]. Nanomalzeme/polimer/bitüm kompoziti, polimer modifiye asfalt nanokompozit (PMAN) olarak adlandırılmaktadır. Asfalt karışımlarda polimer modifiye asfalt nanokompozit kullanımı nanomalzeme ve polimer miktarını azaltılabileceğinden dolayı genellikle daha ekonomik olarak değerlendirilmektedir [8]. Nanokiller maliyet-etkin oluşları ve kolay elde edilebildiklerinden daha çok tercih edilmektedirler [8-9].

SBS'in yapısı, camsı stiren yapılarının esnek bütadiyenik fazda dağıldığı ve fiziksel bir elastomerik ağına birleştirdiği, iki fazlı, uyumlu olmayan bloklardan oluşur. Asfalt ile karıştırıldığında, maltenlerin emilmesiyle SBS şişerek uzaysal bir ağ oluşumu sağlar. Bununla birlikte SBS'in mikro yapısı korunur. Organik kökenli nano parçacıklar, bitümlü bağlayıcının termo mekanik özelliklerini geliştirmek, bariyer özelliklerini (su geçirmez asfalt durumunda) iyileştirmek için polimer matrisine eklenebilmektedirler. Nanokil ilavesi ile polimerlerin de özellikleri geliştirilebilmektedir. Nanopartikül/polimer modifikasyonunun başarısı nano partiküllerin karakterine, boy-en oranına, organik modifiye ediciye, polimerik

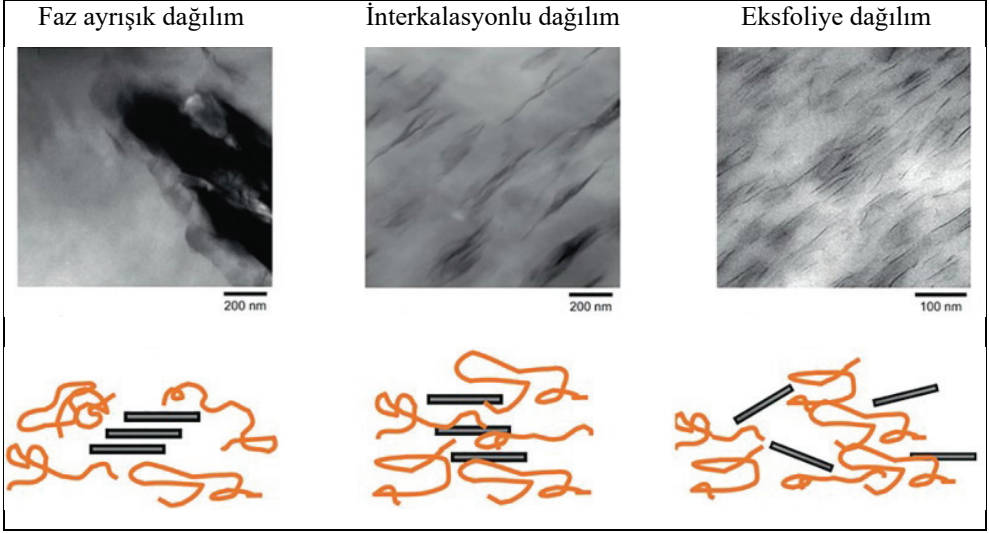
matrise ve modifikasyon sürecine bağlıdır [10]. Polimer modifiye asfalt nanokompozitlerde nanokilin varlığı, polimer ile bitüm yoğunluğu arasındaki farkı azaltmakta, depolama stabilitesini ve bitüm-polimer arasındaki uyumu arttırmaktadır [11].

Katmanlı silikatlar, polimer modifiye bitümdeki farklı fazları birbirine bağlamak için yüzey aktif madde olarak kullanılmaktadır. PMAN içinde nanotabakaların dağılımında, polimer zincirlerinin nanokil katmanlarının ara tabakasına girmesiyle belirgin bir gelişme kazanılmaktadır. Nanokil malzemesi asfalt ve polimer arasında uyumlaştırıcı gibi etki göstermektedir. Nanokil polimer ile daha fazla etkileşime girdiğinde, daha iyi bir dağılıma yol açarak morfolojik ve reolojik özellikleri etkilemektedir [12]. PMAN için istenilen morfolojinin elde edilmesinde modifikasyon yöntemi anahtar parametredir [13-15]. Karışım tasarımından önce bu tür bireysel sistemlerin çalışılması önemlidir. Çeşitli yöntemler olmakla beraber sıcak ekleme ve çözelti yöntemi bitüm modifikasyonunda daha çok tercih edilmektedir. Çözelti yönteminde silikatları şişirebilen ve polimeri çözen çözücüler kullanılır. Bu şekilde, zayıf ara tabaka kuvvetlerine sahip katmanlı silikatlar kolayca dağılır ve polimer zincirleri, silikat ara katmanındaki çözücünün yerini alır. Elde edilen çözelti bitüme ilave edildikten sonra ısıtılarak çözücü buharlaştırdığında, PMAN elde edilmiş olur. Sıcak ekleme yönteminde ise bitüm ve polimerin eriyebileceği bir sıcaklığa kadar (genellikle 150°C-180°C sıcaklık aralığı) ısıtma yapıldıktan sonra yüksek kesme etkili mikser ile nanokil ve polimer doğrudan bitüme ilave edilir, ya da önce nanokil/polimer birlikteliği kurulur ve daha sonra bitüme ilave edilerek nanokompozit oluşturulur [10].

Polimer nanokompozitler, temel olarak en az bir polimerin nanokil ve karbon nanotüp gibi çeşitli nanomalzemeler ile belirli koşullarda karıştırılmasıyla elde edilmektedir. Polimer/kil nanokompozitler (tabakalı silikat nanokompozitler) dağılmış fazda en az bir boyutta nanometrik seviyede olan polimerin kil içerisinde dağıldığı bir sistemdir. [16-17]. Tabakalı silikat nanokompozitlerde üç tip yapısal dağılım mümkündür: faz ayrışık (mikro kompozit) (immiscible/floculated) dağılım, aralanmış (interkalasyonlu) (intercalated) dağılım ve eksfoliye (exfoliye) dağılım. Şekil 1'de mümkün dağılım türleri gösterilmiştir. Şekil 1'de birinci satırda elektron mikroskobu görüntüleri ikinci satırda ise silikat tabakaları ve polimer matrisi şematik olarak görülmektedir. Görüntülerde koyu renkli bölgeler silikat tabakalarını göstermektedir. Eksfoliye nanokompozitlerde bireysel kil tabakaları sürekli polimer fazı içerisinde dağılır ve kil yüküne bağlı bir mesafede yerleşir. Kil tabakaları düzensiz bir yapıda homojen dağılır. İnterkalasyonlu yapılarda polimer kil tabakaları arasına girer fakat kil tabakaları tamamen dağılmaz. Tabakalar arasında önemli bir etkileşim vardır ancak tamamen eksfoliye bir yapı gözlenmez. Faz ayrışık nanokompozitlerde ise hidrosillenmiş uçların etkileşiminden dolayı polimer kil katmanları arasına giremez ve bazı silikat tabakaları polimer matrisi içerisinde kümeler halinde dağılır. Bu dağılım şekli ayrışık faz görünümünü oluşturur [18]. Eksfoliye nanokompozitler, diğer yapılara kıyasla daha iyi fiziksel özelliklere sahip malzemelerdir [19].

Polimer modifiye bitümlere (PMB) üçüncü bileşen olarak nispeten daha az miktarlarda nanokilin eklenmesinin etkisinin değerlendirildiği bir çalışmada bitüm/nanokil ve polimer/nanokil etkileşimleri kurularak polimer ve nanokil ayrı ayrı ve mastır karışım hazırlanarak bir arada bitüme ilave edilerek araştırılmıştır. Çalışma sonuçları, polimer modifiye asfalt nanokompozitin reolojik davranışının bu hazırlanma yönteminden ve bileşenlerin eklenme sırasından önemli derecede etkilendiğini göstermektedir [20]. Asfalt bağlayıcıların mekanik özellikleri üzerinde, bitüm ağırlığına göre %2-%4 oranlarında nanokil

ilavesinin etkisinin araştırıldığı bir çalışmada polimer modifiye bitümlere üçüncü bileşen olarak nanokil ilavesinin tekerlek izi direncini ve düşük sıcaklık çatlama dirençlerini arttırdığı ancak karıştırma prosedürlerinin çok önemli olduğu vurgulanmıştır [3]. Modifikasyon işleminde bileşenlerin ilave edilme sırası, PMAN üretim sürecinde uygun sıralamanın tam olarak anlaşılması için araştırılması gereken bir konu olarak değerlendirilmektedir [21].



Şekil 1 - Polimer/tabakalı silikat nanokompozitlerde farklı dağılım tiplerinin gösterimi [19]

Literatürde, PMAN hazırlama sürecinde nanokil ve polimerlerin bitüme ilave edilme sırasının nihai asfalt karışım performansına etkisinin araştırıldığı yeterince çalışma bulunmamaktadır. Mevcut çalışmalar çoğunlukla modifiye bitümün özelliklerinin değerlendirilmesine odaklandırılmıştır. PMAN kullanılarak hazırlanan asfalt karışımların nihai performanslarının nanokompozit hazırlama yöntemine bağlı olarak araştırılması önemli bir konu olarak görülmektedir. Bu çalışmanın amacı, elastomerik (SBS) ve plastomerik (EVA) polimerler kullanılarak sıcak ekleme yöntemi ile asfalt nanokompozit üretiminde nanokil ve polimer ilave edilme sırasının nihai asfalt karışımın mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin araştırılmasıdır. Polimerlerin ve nanokilin bitüme katılma sıraları değiştirilerek üretilen modifiye bitümlü karışımlar modifiye Lottman yöntemi, tekrarlı yük sünme deneyi, Fransız tekerlek izi deneyi ve dolaylı çekme mukavemeti deneyi ile değerlendirilmiştir.

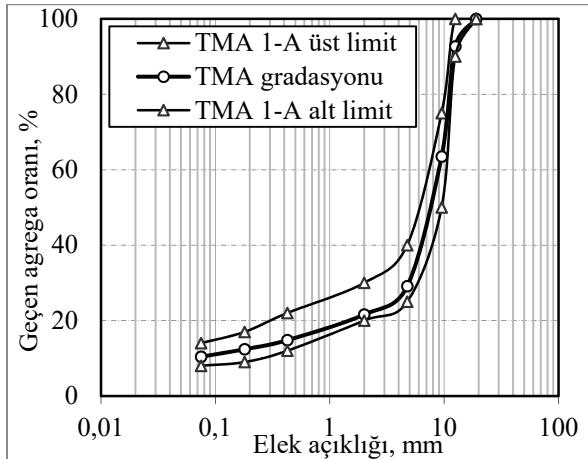
2. MATERYAL

2.1. Agrega

Yüksek durabilite, düşük permeabilite, düşük trafik gürültü kirliliği, yansıma çatlaklarına ve tekerlek izlerine karşı yüksek direnç sağlamasından dolayı taş mastik asfalt karışımlar tercih konusu olmaktadır [22]. Çalışmada bazalt agregası kullanılarak karayolları teknik

Tablo 1 - Bazalt agregasının mühendislik özellikleri

Özellik	Deney	Değer	Şartname limiti
Özgül ağırlık (Kaba agrega)	ASTM C 127		
Hacim		2.684	
Zahiri		2.744	
Özgül ağırlık (İnce agrega)	ASTM C 128		
Hacim		2.656	
Zahiri		2.754	
Özgül ağırlık (filler)		2.821	
Kaba agrega özellikleri			
Parçalanma direnci (Los Angeles), (%)	TS EN 1097-2	12	≤25
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık (MgSO ₄ ile kayıp), %	TS EN 1367-2	8	≤14
Yassılık indeksi (%)	BS 812	14	≤25
Cilalanma değeri, %	TS EN 1097-8	63	≥50
Su emme (%)	TS EN 1097-6	0.81	≤2.0
Kırılmışlık, ağırlıkça, %	TS EN 933-5	100	≥100
Kil toprakları ve ufalanabilir daneler, %	AASHTO T112	Yok	Bulunmayacak



Şekil 2 - TMA için agrega gradasyon eğrisi

şartnamesine (KTŞ 2013) [23] göre taş mastik asfalt (TMA) Tip 1 A tasarımı yapılmıştır. Agregaların mühendislik özellikleri ve agrega gradasyonu Tablo 1 ve Şekil 2’de gösterilmiştir. Kaba agrega oranı %70.9, ince agrega oranı %18.7 ve filler oranı da %10.4 olarak oluşmuştur. Tablo 1’den agrega özelliklerinin şartname limitlerine uygun olduğu görülmektedir.

2.2. Asfalt Çimentosu

Asfalt çimentosu olarak geleneksel test sonuçları Tablo 2’de verilen 50/70 penetrasyon dereceli bitümlü bağlayıcı kullanılmıştır.

Tablo 2 - Saf ve modifiye bitümlerin temel özellikleri

Test	Test Yöntemi	Birim	Saf bitüm	Nanokil modifiye bitüm	SBS modifiye bitüm
Özgül ağırlık (25°C)	TS EN 15326	gr/cm ³	1.025	1.027	1.017
Yumuşama noktası	TS EN 1427	°C	52	57	64
Penetrasyon (25°C)	TS EN 1426	0.1mm	63	60	56
Düktilite (25°C)	TS EN 12592	%	99.6	96.3	100+

2.3. Katkı Maddeleri

SBS elastomeri (Kraton D1192 ESM) ve EVA plastomeri (ELVAX 420) polimer katkı maddeleri olarak kullanılmıştır. SBS ve EVA katkılarının üretici firma verileri sırasıyla Tablo 3 ve Tablo 4’te verilmiştir. Bitüm modifikasyonu için optimum polimer oranı literatürde %4-%6 aralığında önerilmektedir. Katkı maddesi oranı %6’nın üzerine çıkarıldığında, modifiye bitüm özelliklerinde kayda değer bir kazanç sağlanmadığı belirtilmektedir [24]. Bu çalışmada, her iki polimer de ağırlıkça %5 oranında kullanılmıştır.

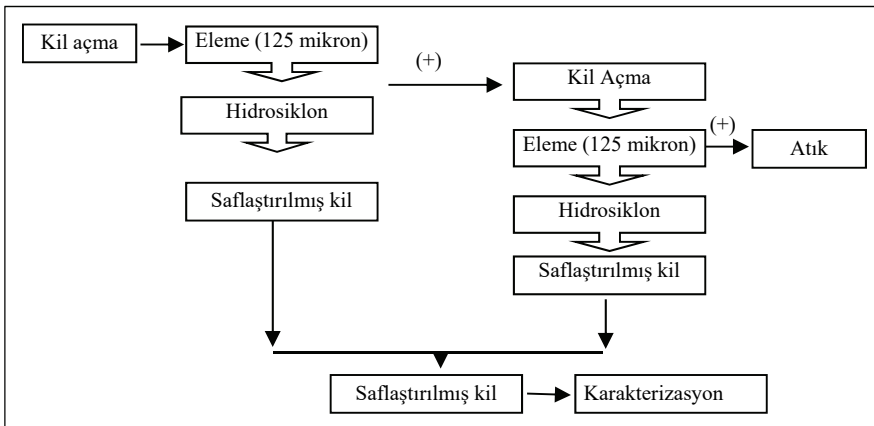
Tablo 3 - SBS katkı maddesinin genel özellikleri [25].

Özellik	Değer
Moleküler yapı	Lineer
Moleküler ağırlık, kg/mol	138-162
Polistiren içeriği, %	28.5-32.5
Vinil içeriği, %	≥35
Triblok içeriği	≥90
Uçucu madde, %	≤0.3
Antioksidan içeriği, %	≥0.16
Özgül ağırlık, gr/cm ³	0.94
Erime akış hızı, 200°C/5kg, g/10dak.	<1
Kopma uzaması, %	1000
Çekme mukavemeti, MPa	33

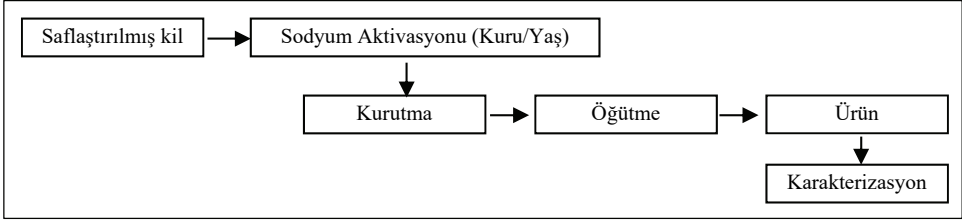
Modifikasyonun etkisini arttırmak için, SBS ve EVA katkılarına ek olarak bentonit kilinden üretilen nanokil (esanNANO 1-140) (NC) bitüme ilave edilerek asfalt nanokompozitler oluşturulmuştur. Nanokil katkı maddesi Eczacıbaşı Esan firması tarafından Demirli bentonitinden üretilmiştir. Saflaştırma süreci killerin su ile açıldıktan sonra 32 mikronluk elekten elenmesi ve filter preslerden süzülmesi şeklinde gerçekleştirilmiştir. Hidrosiklon ile saflaştırılan kil sodyum ile aktivasyon edildikten sonra tekrar öğütülmüştür. Na-aktive saflaştırılmış kilin yüzey modifikasyonu “dimethyl dehydrogenated tallow quaternary ammonium” organik modifiye edici ile yapılmıştır. Hidrosiklon ile saflaştırma ve sodyum aktivasyon akış şemaları Şekil 3 ve Şekil 4’te gösterilmiştir. Nanokilin kimyasal analiz sonuçları Tablo 5’te, taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) görüntüsü ve lazer difraktometresi ile yapılan boyut analizi Şekil 5 ve Şekil 6’da verilmiştir. Nanokilin tabakalar arası mesafesi X ışını difraktometresi ile 38.62Å olarak ölçülmüştür. Birim yüzey alanı ise 2512m²/kg olarak belirlenmiştir. Nanokilin nano boyutlara ulaştığı anlaşılmaktadır. Nanokil ağırlıkça %3 oranında kullanılmıştır. Süzülme önleyici katkı maddesi olarak ta selülozik elyaf %3 oranında agrega karışımına ilave edilmiştir.

Tablo 4 - EVA katkı maddesinin genel özellikleri [26].

Özellik	Değer
Yoğunluk, gr/cm ³	0.937
Vinil asetat komonomer içeriği, %	18 (kütlece)
Erime akış hızı, 190°C/2.16kg, g/10dak.	150
Erime noktası, °C	73
Donma noktası, °C	53
Maksimum işleme sıcaklığı, °C	235
Termal stabilizer	bütül hidroksi toluen



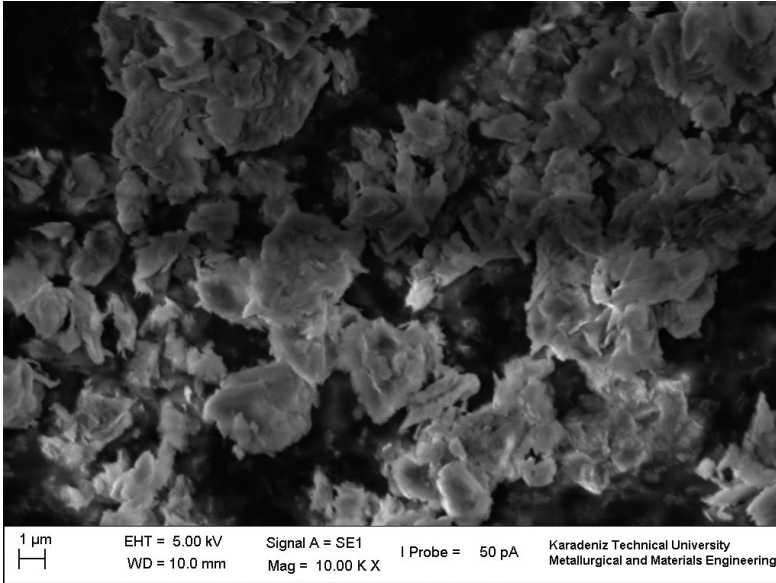
Şekil 3 - Eleme ve hidrosiklon ile saflaştırma akış şeması



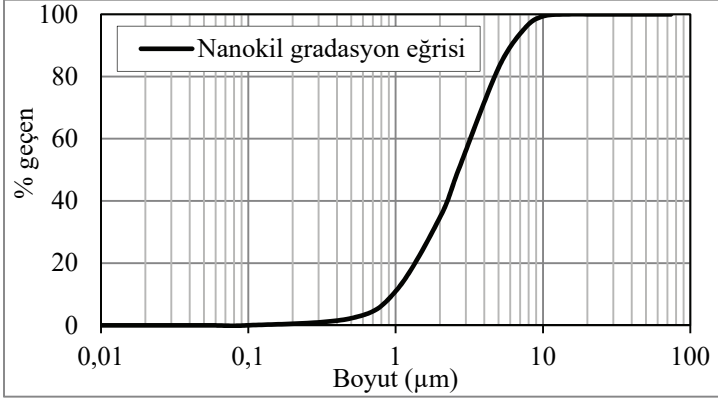
Şekil 4 - Sodyum aktivasyonu akış diyagramı

Tablo 5 - Kullanılan nanokilin anaoksit içerikleri [27]

Oksit adı	İçerik (%)	Oksit adı	İçerik (%)
Al ₂ O ₃	8.394	Nb ₂ O ₅	0.005885
CaO	0.1531	NiO	0.01105
Cl	0.4869	P ₂ O ₅	0.008532
CuO	0.007995	Rb ₂ O	0.002243
Fe ₂ O ₃	0.5189	SO ₃	0.04875
GeO ₂	0.003939	SiO ₂	42.99
K ₂ O	0.1672	TiO ₂	0.04296
MgO	2.174	ZnO	0.007696
MnO	0.01927	ZrO ₂	0.004362
Na ₂ O	0.2342	Kızdırma kaybı	44.72



Şekil 5 - Nanokil katkısının SEM görüntüsü [27]



Şekil 6 - Nanokil katkı maddesinin lazer difraktometresi ile boyut analizi

3. YÖNTEM

3.1. Polimer/Nanokil/Bitüm Nanokompozit (PMAN) Üretimi

PMAN üretiminde nanokil ile birlikte SBS elastomeri ve EVA plastomeri olmak üzere iki polimer kullanılmıştır. Nanokil ve polimerin bitüme katılma sıraları değiştirilerek Nanokil/SBS ve Nanokil/EVA modifiye bitümleri üretilmiştir. Hazırlanan nanokompozitler katılma sırasına göre NC (nanokil modifiye bitüm), NC+EVA (bitüme önce nanokil sonra EVA ilave edilmiştir), EVA+NC (bitüme önce EVA sonra nanokil ilave edilmiştir), NC+SBS (bitüme önce nanokil sonra SBS ilave edilmiştir) ve SBS+NC (bitüme önce SBS sonra nanokil ilave edilmiştir) adlandırılarak kontrol bitüm ile birlikte asfalt karışım örneği hazırlamada kullanılmıştır. Son yıllarda, nanokil modifiye bitüm üretiminde seçilen modifikasyon değişkenlerinin değerlendirildiği çalışmada modifikasyon parametrelerinin çok değişken olduğu, bununla birlikte literatürde yer alan çalışmalarda karıştırma sıcaklıklarının 150°C ile 160°C aralığında, karıştırma hızının 4000rpm-5000rpm aralığında yoğunlaştığı belirtilmektedir. Yine aynı çalışmadan, ifade edilen sıcaklık ve karıştırma hızı seviyelerinde karıştırma sürelerinin genellikle 40-60dk olarak uygulandığı, nanokil oranının çoğunlukla %3 olarak seçildiği görülmektedir [18]. Bir diğer çalışmada, nanokil oranının ağırlıkça %3 oranının üzerine çıkarılması durumunda eksfoliye dağılımın sağlanamayabileceği [28] ve nanokompozitin özelliklerinin olumsuz etkilenebileceği [29] ifade edilmektedir. Önceki tecrübelerden [27] yüksek nanokil oranının (%5) mekanik deney sonuçlarında tutarsızlığa neden olduğu anlaşılmış, bu çalışmada nanokil ağırlıkça %3 oranında kullanılmıştır.

Modifikasyon yüksek kesme etkili mikserde, 155°C sıcaklıkta, 5000rpm karıştırma hızında her bir katkı maddesi için 20 dakika olmak üzere toplam 40 dakika süre ile uygulanmıştır. İkinci katkı maddesinin ilavesine, karıştırmaya ara verilmeden devam edilmiştir. Karşılaştırma yapabilmek için bitüme yalnızca nanokil ilave edilen seçenekte 40 dakika karıştırma yapılmıştır. Modifiye bitüm üretimi 1500gr bitüm kullanılarak yapılmıştır.

Asfalt karışım tasarımı Marshall tasarım metoduna göre kontrol bitüm ile yapılmıştır. Optimum bitüm içeriği %3 hava boşluğunu veren bitüm oranı olarak alınmış ve %6.1 olarak

bulunmuştur. Asfalt karışımların karıştırma ve sıkıştırma sıcaklıkları Karayolları Teknik Şartnamesine (KTSŞ 2013) [23] uygun olarak yapılmıştır. Modifiye bitümler 155°C ve agregalar 175°C sıcaklıkta ısıtılarak karışım hazırlanmıştır. Sıkıştırma işlemi 145°C sıcaklıkta, briketin her iki yüzeyine 50 darbe uygulanarak yapılmıştır. Optimum bitüm içeriğinde kontrol ve modifiye bitümler ile bitümlü sıcak karışımlar üretilmiştir.

3.2. Modifiye Lottman Deneyi

Polimer/nanokil/bitüm nanokompozitlerle üretilen asfalt karışımların su hasarına karşı dirençleri Modifiye Lottman (AASHTO T283) [30] yöntemiyle değerlendirildi. Nicel bir test yöntemi olan AASHTO T283 metodunun asfalt karışımların sudan kaynaklanan bozulmaları değerlendirmede en etkin deney yöntemlerinden biri olduğu ifade edilmektedir [31-23]. Bu yöntem ile hem soyulma eğilimli malzemelerin belirlenebileceği hem de su hasarı önleyici katkıların etkililiklerinin saptanabileceği savunulmaktadır [34]. Deneyde, üçer örnekten oluşan koşullandırılmış ve koşullandırılmamış briket grupları kullanılmaktadır. Koşullandırılmış gruptaki örneklerin çekme mukavemetlerinin ortalaması koşullandırılmamış gruptaki örneklerin çekme mukavemetlerinin ortalamasına oranlanarak çekme mukavemeti oranı (TSR) elde edilmektedir. Daha büyük TSR değerleri asfalt karışımın su hasarına karşı daha dirençli olduğu anlamına gelmektedir. Su hasarına karşı dirençli bir karışım için en az 0.8 TSR değeri önerilmektedir [35].

3.3. Fransız Tekerlek İzi Deneyi

Asfalt karışımların tekerlek izi dirençleri Fransız tekerlek izi deneyi (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées wheel tracker) ile belirlendi. Yöntem, sıkıştırılmış asfalt karışımların kalıcı deformasyon potansiyellerinin belirlenmesinde araç tekerleklerinin oluşturmuş olduğu etkiyi laboratuvarında simüle edebilmektedir. Fransa'da, ağır trafik koşullarına maruz kalan karışımları test etmekte kullanılmaktadır[36]. Deney cihazında 0.60 ± 0.03 MPa basınca kadar şişirilmiş, karşılıklı iki adet pnömatik kauçuk tekerlek kullanılarak 500mm uzunluğunda, 180mm genişliğinde, 50mm veya 100mm kalınlığında briketler test edilebilmektedir. Deney sıcaklığı 30°C - 70°C aralığında seçilebilmektedir. Bu çalışmada test sıcaklığı 60°C ve tekerlek yükü 5000N olarak uygulanmıştır. Asfalt briketleri deneye başlamadan önce 12 saat test sıcaklığında bekletilmiştir. Deney 50,000 tekerlek devir sayısı ile sonlandırılmıştır.

3.4. Tekrarlı Yük Sünme Deneyi

Asfalt karışımların tekerlek izi dirençleri tekrarlı yük sünme deneyi ile de değerlendirildi. Tekrarlı yük sünme deneyi uygulamada oluşan tekerlek izleri ile yüksek korelasyonlu sonuçlar verebilmektedir [37]. Deney istenilen sıcaklıkta, önceden belirlenmiş gerilme ve yükleme sayılarında yapılabilir. Deneyde karot örnekleri kullanılabilirdiği gibi 100mm veya 150mm çaplı Marshall briketleri de kullanılabilir. Bu çalışmada deney sıcaklığı 40°C, koşullandırma gerilmesi 10kPa, koşullandırma süresi 2 dakika, test gerilmesi 100kPa, yükleme periyodu 1000ms, yüklü süre 500ms, yüksüz süre 500ms ve deneyi sonlandıran yükleme sayısı 21,600 olarak seçilmiştir.

3.5. Düşük Sıcaklık Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi

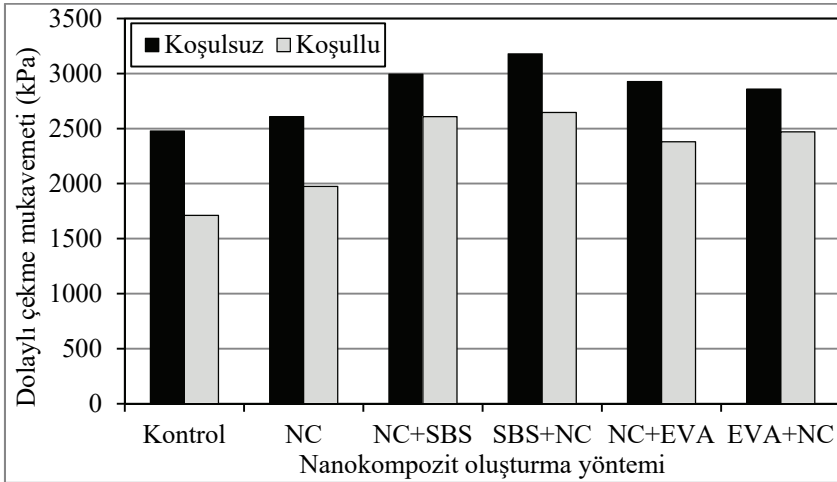
Asfalt betonunun çekme mukavemeti özelliği, çatlak veya deformasyon türü bozulma söz konusu olduğunda önemli bir konudur; öte yandan, asfalt betonunun durabilitesi söz konusu olduğunda, asfalt betonunun çevresel değişikliklere duyarlılığı hayati önem taşımaktadır. Dolaylı çekme mukavemeti testi, asfalt betonunda, kaplamanın daha çok çatlama özellikleri ile ilişkili olabilen çekme davranışını belirlemek için kullanılabilir [38-39]. Testin gerçekleştirilmesi kolaydır ve malzemelerin temel özellikleri bakımından karakterize edilmesinde etkili olduğu düşünülmektedir [40]. Çevre koşulları asfalt kaplamanın performansını etkileyen en önemli faktörlerden biridir. Hava sıcaklığı asfalt kaplamanın bozulmasına yol açabilir. Aşırı düşük sıcaklıklarda çatlama problemi gelişebilir ve bazı bölgelerde düşük sıcaklık çatlama birincil bozulma türü olarak görülebilir [41].

Deney -10°C sıcaklıkta her seçenekten üç örneğe yapılmıştır. Deneyden önce sıcaklığı kontrol altına alabilmek için örnekler çevresel koşullandırma kabininde, -10°C sıcaklıkta 6 saat bekletildikten sonra test gerçekleştirilmiştir.

4. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

4.1. AASHTO T 283 Su Hasarı Değerlendirmesi

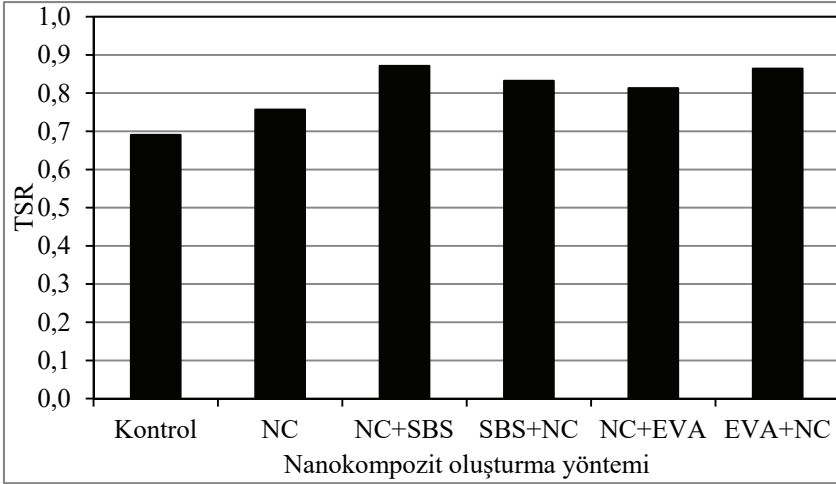
AASHTO T283 yöntemi asfalt karışımların su hasarına karşı direncinin belirlenmesi için bütün karışım seçeneklerine uygulanmıştır. Koşullandırılmış ve koşullandırılmamış karışımların çekme mukavemetleri Şekil 7’de ve çekme mukavemetleri oranları da Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 7 - Nanokompozit oluşturma yöntemine göre koşullandırılmış ve koşullandırılmamış karışım örneklerin çekme mukavemetlerinin değişimi

Şekil 7’den, asfalt karışım örneklerinin dolaylı çekme dayanımlarının modifiye edici katkı tipinden ve nanokompozit oluşturma yönteminden etkilendiği görülmektedir. Kontrol

karışımlar referans alındığında, bitümün nanokil ile modifiye edilmesi durumunda çekme mukavemetlerinin koşullandırılmamış örneklerde yaklaşık %5 oranında, koşullandırılmış örneklerde de yaklaşık %15 oranında arttığı görülmüştür. NC katkısı, SBS ve EVA polimerleri ile ikili fayda sağlayarak yalnızca NC modifikasyonuna göre çok daha yüksek çekme mukavemeti değerleri oluşturmuştur. Modifiye Lottman koşullandırmasına tabi tutulmuş SBS içeren modifikasyonlarda kontrol karışıma göre %50'nin üzerinde, EVA içerenlerde ise %39'dan daha fazla dayanım artışı görülmüştür. Ancak koşullandırılmamış karışımlarda çekme mukavemetlerindeki artış azalmıştır. SBS/nanokil/bitüm seçenekleri için %20'den daha fazla, EVA/nanokil/bitüm seçenekleri için %15'ten daha fazla artışlar görülmüştür. Nanokompozit hazırlama sürecinde, polimer ve nanokil katkılarının bitüme katılma sırasının nihai asfalt karışımın çekme mukavemetleri üzerinde etkili olduğu görülmüştür. SBS polimeri ile hazırlanan nanokompozitlerde, bitüme önce SBS katkısının katılması durumunda, EVA polimerinin kullanıldığı durumlarda ise önce NC katkısının eklendiği seçenekte daha yüksek çekme mukavemeti elde edilmiştir.



Şekil 8 - Polimer/nanokil/bitüm nanokompozit hazırlama yöntemi – TSR ilişkisi

Su hasarı direnci açısından değerlendirildiğinde (Şekil 8), NC modifikasyonunun su hasarı direncini kontrol karışımlara kıyasla yaklaşık %10 oranında arttırdığı, ancak 0.80 eşik değeri göz önüne alındığında su hasarına karşı yeterli direncin sağlanamadığı görülmüştür.

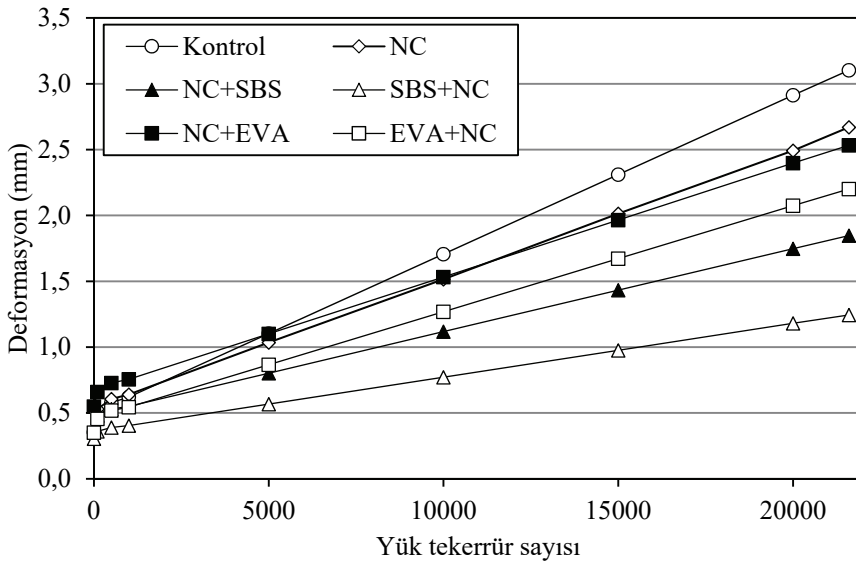
Bununla birlikte, polimer/nanokil/bitüm nanokompozitlerle hazırlanan bütün karışımlarda 0.80 TSR kriterinin sağlandığı görülmüştür. Katkılı seçeneklerin özellikle koşullandırılmış durumda kontrol karışımlara göre daha yüksek dayanımlar vermesi TSR değerlerinin artmasını sağlamıştır. Su hasarı açısından, nanokompozit oluşturma aşamasında, SBS-nanokil-bitüm nanokompozitlerde bitüme önce NC'in katılmasının %4 daha yüksek TSR değeri, EVA-nanokil-bitüm nanokompozitlerde, önce EVA'nın eklenmesinin de %5 daha yüksek TSR değeri oluşturduğu görülmüştür.

Asfalt karışımlarda nanokil modifikasyonunun su hasarı hassasiyetini iyileştirdiği bilinmektedir [42]. Nano partiküllerin polimerlerle birlikte kullanımının polimerin ve

nanokilin sağladığı performans artışından daha fazlasını sağladığı ifade edilmektedir. Farklı oranlarda SBS ve nano- SiO₂ katkılarının bitüm modifikasyonunda kullanılması yoluyla asfalt karışımların mekanik özellikleri değerlendirilmiş ve %1nano-SiO₂/%5SBS kombinasyonunun en iyi performansı sergilediği görülmüştür [43]. Nanokil ve karbon mikrofiber kullanımının asfalt karışımların su hasarı direnci üzerindeki etkisinin araştırıldığı bir çalışmada, asfalt karışım örnekleri hem su hem de çeşitli konsantrasyonlardaki buzlanma önleyici çözeltiler ile yedi döngüden oluşan ağırlaştırılmış koşullandırmaya tabi tutulmuş, nanokil oranının artmasıyla koşullu örneklerin çekme mukavemetlerinin ve su hasarı direncinin arttığı görülmüştür [44].

4.2. Tekrarlı Yük Sünme Deneyi

Polimer ve nanokil ekleme sırası değiştirilerek hazırlanan nanokompozitlerle üretilen asfalt karışımların kalıcı deformasyon davranışları tekrarlı yük sünme deneyi ile değerlendirilmiştir. Deneylerde her seçenek için AASHTO T283 yöntemine göre koşullanmış üç Marshall briketi kullanılmıştır. Deneyden elde edilen sünme deformasyonu eğrileri Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9 - Kontrol ve modifiye karışımlar için sünme deformasyonu eğrileri

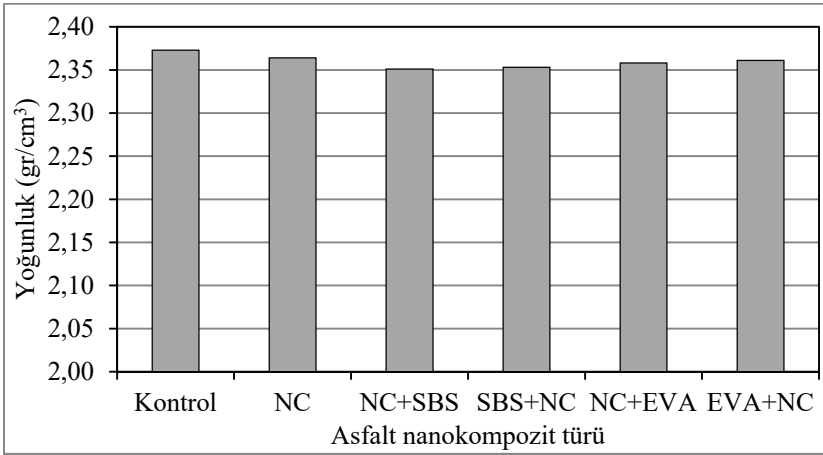
Şekil 9'da sunulan deformasyon eğrileri değerlendirildiğinde, gerek nanokil modifikasyonu ve gerekse polimerlerle elde edilen nanokompozit uygulamasının kontrol karışımlara kıyasla daha yüksek deformasyon dirençleri ortaya koyduğu görülmüştür. 21,600 yükleme tekrür sayısından sonra oluşan deformasyonlar göz önüne alındığında; kontrol karışımlara göre NC modifikasyonunda %14, EVA ile hazırlanan nanokompozitlerde en az %18 ve SBS ile hazırlanan nanokompozitlerde de en az %40 azalma görülmüştür. Aynı zamanda tekrarlı yük

test sonuçlarının polimer-nanokil-bitüm hazırlama sürecinde polimer ve nanokilin katılma sırasından etkilendiği anlaşılmıştır. Bitüme öncelikle polimerin daha sonra nanokilin ilave edilmesi ile daha yüksek deformasyon dirençlerinin olduğu görülmüştür. Koşullandırma işlemi uygulanmış örnekler üzerinde katkıların etkinlikleri daha iyi yorumlanabilmektedir. Koşullandırılmamış örneklerde birbirine çok yakın değerler verebilen karışımların koşullandırma ile birlikte performans farklılıkları da artabilmektedir. Bu deney kapsamında koşullandırılmış örneklerin kullanılması sünme eğrileri arasındaki alanların büyümesine ve buna bağlı olarak farklılığın kolaylıkla yorumlanabilmesine yardımcı olduğu düşünülmektedir.

4.3. Fransız Tekerlek İzi Deneyi

Asfalt karışımların tekerlek izi potansiyelleri tekrarlı yük sünme deneyine ek olarak Fransız tekerlek izi deneyi ile de değerlendirilmiştir. Deneyde kullanılan örneklerin yoğunlukları Şekil 10’da ve deformasyon eğrileri Şekil 11’de sunulmuştur.

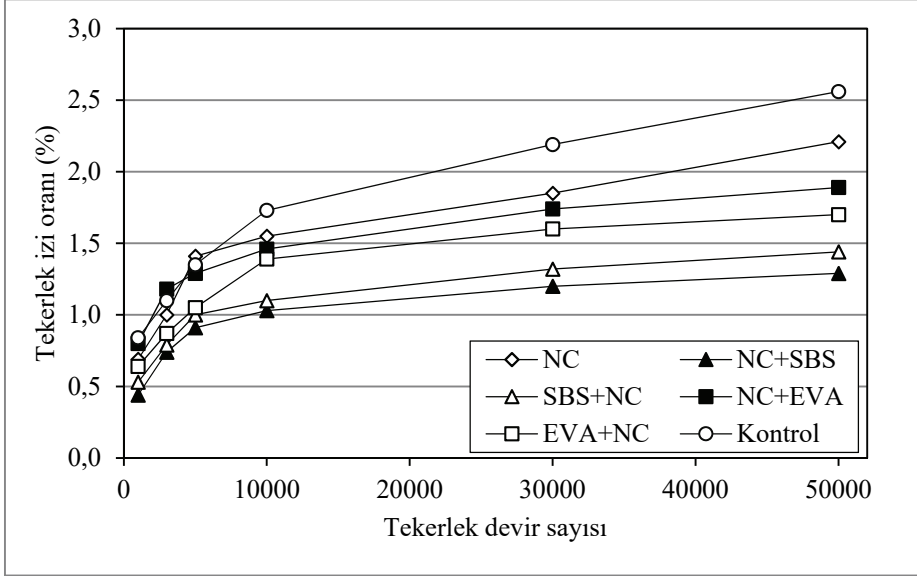
Fransız tekerlek izi testinde sıkıştırılan örneklerin yoğunluk değerleri birbirine çok yakındır. Modifikasyonun etkisiyle, bitüme ilave edilen NC ve polimer katkıları bitümün viskozitesini arttırdığından sıkıştırmadan kaynaklanan, yoğunluk değerlerinde çok küçük azalmalar görülmüştür.



Şekil 10 - Asfalt karışım örneklerinin yoğunluk değerleri

KGM teknik şartnamesine göre 30,000 devir sayısında en fazla %6 tekerlek izi oranı kabul edilmektedir. Şartname kriterine göre kontrol karışımlar da dahil olmak üzere bütün karışımların deformasyon koşulunu sağladığı görülmüştür. Gerek nanokil kullanımında ve gerekse polimer-nanokil/bitüm nanokompozit kullanımında kontrol karışımlara göre tekerlek izi oranının azaldığı görülmüştür. 50,000 devir sayısında kontrol karışımlar %2.56, NC modifiye bitümlü karışımlar %2.21, EVA ile oluşturulan nanokompozitler en fazla %1.89 ve SBS ile oluşturulan nanokompozitli karışımlar ise en çok %1.44 tekerlek izi oranları ortaya koymuştur. SBS/nanokil/bitüm nanokompozitler EVA/nanokil/bitüm nanokompozitlere göre

deformasyon direnci açısından daha yüksek performans sergilemiştir. Bununla birlikte, SBS ile hazırlanan nanokompozitlerde bitüme önce nanokil katıldığı durumda, EVA ile hazırlanan nanokompozitlerde ise bitüme önce EVA plastomerinin katıldığı durumda daha yüksek tekerlek izi dirençleri görülmüştür.



Şekil 11 - Kontrol ve nanokompozit modifiye asfalt karışımlar için tekerlek izi oranları

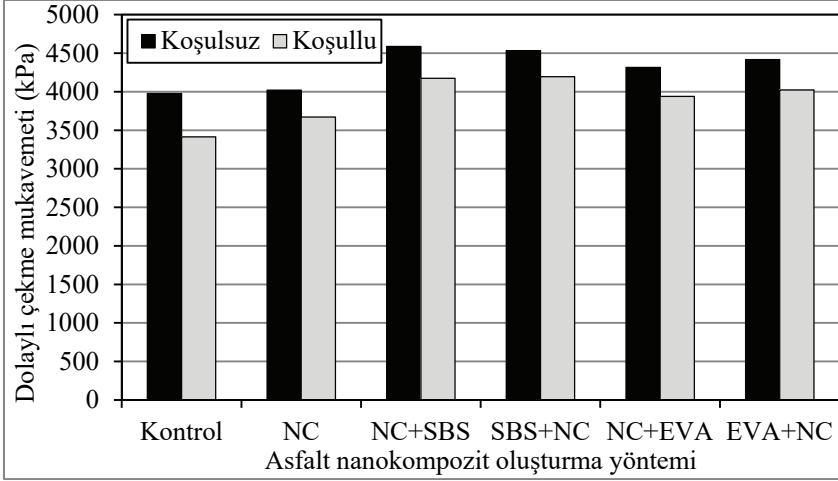
SBS modifiye bitümlere üçüncü bileşen olarak sıcak karıştırma yöntemi ile nanokil ilavesinin etkisinin araştırıldığı bir çalışmada nanokil ilavesi ile modifiye bitümün viskozitesinin arttığı, daha yüksek kompleks modül ve daha düşük faz açısının oluştuğu ve böylece deformasyon direnci daha yüksek ve daha elastik bağlayıcı elde edilebilmektedir. Nanokil/SBS modifiye asfalt karışımlar kontrol karışımlara göre daha yüksek tekerlek izi dayanımı göstermektedir [45]. Bir başka çalışmada da EVA modifiye bitüm ile EVA nanokompozitler karşılaştırılmış ve nanokompozit oluşturulması durumunda daha iyi mekanik özellikler elde edilmiştir [46].

Polimer/nanokil/bitüm üçlü kombinasyon kullanımı asfalt karışım modifikasyonu için yeni bir konudur. Polimer modifiye asfalt nanokompozit olarak adlandırılan bu kombinasyonda polimer ve nanokil bitüme ayrı ayrı katılabildiği gibi birlikte de katılabilmektedir. Karıştırma yöntemleri reolojik özellikleri önemli derecede etkilemektedir [20].

4.4. Düşük Sıcaklık Dolaylı Çekme Mukavemeti Deneyi

Asfalt karışımların düşük sıcaklık çatlama özelliklerinin değerlendirilebilmesi için dolaylı çekme mukavemeti deneyi -10°C sıcaklıkta yapılmıştır. Deneyde koşullandırılmamış ve

AASHTO T283 sistemine göre koşullandırılmış Marshall briketleri kullanılmıştır. Deneysel sonuçları Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12 - Nanokompozit oluşturma yönteminin düşük sıcaklık çatlama direnci üzerindeki etkisi

Nanokil modifiye karışımlar kontrol karışımlarla karşılaştırıldığında, koşullandırılmamış durumda çekme mukavemetlerinde çok küçük artış sağlamıştır. Koşullandırma ile birlikte modifikasyonun etkisi daha iyi görünmüştür. Bütün polimer/nanokil/bitüm nanokompozit seçenekleri yalnızca nanokil modifikasyonu ve kontrol bitüm seçeneklerinden daha yüksek çekme mukavemetleri dolayısıyla daha yüksek çatlama dirençleri göstermiştir. SBS ile hazırlanan nanokompozitlerde, bitüme önce NC katıldığı durumda koşullandırılmamış örnekler daha yüksek çekme mukavemetleri gösterirken koşullandırılmış durumda bitüme önce SBS ilave edilmesi ile daha yüksek değerler elde edilmiştir. EVA ile hazırlanan nanokompozitlerde ise hem koşullandırılmış hem de koşullandırılmamış durumda bitüme önce EVA polimerinin katılması çekme mukavemeti değerini arttırmıştır. SBS kullanılarak oluşturulan asfalt nanokompozitler EVA kullanılarak oluşturulan asfalt nanokompozitlerden oluşturulma yönteminden bağımsız olarak daha yüksek çatlama dirençleri göstermiştir.

Organik modifiye bentonit kilinin asfalt modifiyeri olarak çeşitli oranlarda çalışıldığı araştırmada sıcak ekleme yöntemi ile modifikasyon yapıldı. Modifiye bağlayıcının yumuşama noktası, viskozite ve duktilitesinin arttığı görüldü. Dinamik kesme reometresi test sonuçlarına göre, modifiye bağlayıcının deformasyon direncinin arttığı, kısa ve uzun dönem yaşlandırma prosedürlerinden sonra yapılan kırılgan eğilme reometresi test sonuçlarına göre çatlama direncinde önemli artış olduğu ifade edilmektedir [47].

Polimer modifiye asfalt nanokompozitlerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada kontrol bitüm ile karşılaştırıldığında depolama stabilitesi ve yaşlanma direncinin arttığı karışımın tekerlek izi ve termal çatlama direncinin iyileştiği görüldü [48]. Bitüm modifikasyonunda nanokil ilavesinin düşük sıcaklık çatlama üzerinde olumlu bir etkisi vardır. Aynı zamanda tekerlek izi direncini de arttırmaktadır [49]. Polimer modifiye asfalt

nanokompozitler nanokil modifikasyonuna ve polimer modifikasyonuna göre daha gelişmiş mekanik özellikler sunabilir. Ancak modifikasyon sürecinde nanokompozit oluşturma yöntemi, katılma sırası ve parametreleri, kullanılan polimer türü nihai asfalt karışımın mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu süreçlerin araştırılarak kontrol altında tutulması modifikasyon başarımını arttırabilir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, polimer modifiye asfalt nanokompozit (PMAN) üretiminde polimer ve nanokil eklenme sıralarının nihai asfalt karışım performansı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. SBS ve EVA polimerleri nanokil ile birlikte katılma sıraları değiştirilerek yüksek sıcaklıkta karıştırma tekniği ile bitüme ilave edilmiştir. Asfalt karışımlar su hasarı, tekerlek izi, düşük sıcaklık çatlama yönleriyle değerlendirilmiştir.

Polimer modifiye asfalt nanokompozitlerle hazırlanan asfalt karışımlar tekerlek izi direnci, su hasar direnci ve termal çatlama direnci açısından gerek modifiye edilmemiş bitümle ve gerekse nanokil ile modifiye edilmiş bitümle hazırlanan karışımlardan daha iyi özellikler göstermiştir. Nanokil modifiye bitümlü karışımlar modifiye edilmemiş bitümlü karışımlara göre daha yüksek su hasarı ve deformasyon direnci göstermiştir. Düşük sıcaklık çatlama açısından, modifiye edilmemiş bitüm ve nanokil modifiye bitüm ile hazırlanan koşullandırılmamış karışımlardan yaklaşık olarak eşdeğer sonuçlar elde edilmiş olmasına rağmen koşullandırılmış karışımlarda nanokil modifiye bitümlü karışımlar daha yüksek çatlama dirençleri göstermiştir. Bu özellikler literatürle benzerlik göstermektedir. Nanokil modifikasyonunun bitümün viskozitesini arttırması, penetrasyon ve düktilitesini azaltması bitümün sertleşmesine ve çekme dayanımının düşmesinde neden olarak çatlama direncini düşürebilir veya olumlu bir etki oluşturmayabilir [50-51]. Ancak nanokilin hidrofobik özelliği, modifiye edilmemiş bitümle karşılaştırıldığında, nanokil modifiye bitümlü karışımın koşullandırma prosedüründen daha az etkilenmesini sağlayarak koşullandırılmış durumda termal çatlaklara karşı daha yüksek dirençler oluşturmuş olabilir.

PMAN üretim sürecinde nanokil ve polimer bileşenlerinin bitüme katılma sıraları asfalt karışımların mekanik özelliklerini etkilemektedir. EVA kullanılarak üretilen PMAN seçeneklerinde bitüme önce EVA eklenmesi durumunda seçilen deney yöntemleri ile su hasarı, deformasyon ve düşük sıcaklık çatlama karşı daha yüksek dirençler oluşmaktadır. Deney sonuçlarına göre, önce bitüm EVA birlikteliğinin sağlanması ardından üçüncü bileşen olarak nanokil ilave edilmesi ile daha yüksek mekanik özellikler elde edilebilmektedir.

SBS ile hazırlanan PMAN kullanıldığında, nanokil ve SBS katkılarının bitüme katılma sıraları düşük sıcaklık çatlama direnci açısından önemli bir etki oluşturmamıştır. Su hasarı ve Fransız tekerlek izi deneyi ile yapılan tekerlek izi değerlendirmesine göre bitüme önce nanokilin ardından SBS'in katılması daha yüksek performans sağlamıştır. Bununla birlikte tekrarlı yük sünme deneyinde SBS'in önce katılması daha yüksek deformasyon dirençleri oluşturmuştur.

PMAN üretiminde SBS ve EVA polimerlerinin kullanılması nihai asfalt karışımın mekanik özellikleri açısından farklı sonuçlar ortaya koymuştur. Su hasarı, deformasyon ve termal çatlama dirençleri yönüyle en yüksek değerler SBS ile hazırlanan PMAN'lerden elde edilmiştir. Nanokil ve polimerin bitüme katılma sıralarının değiştirildiği her iki seçenekte de

SBS polimeri kullanılan seçenekler EVA polimeri kullanılan seçeneklerden daha yüksek termal çatlama ve tekerlek izi direnci göstermiştir.

Bu çalışmada, polimer ve nanokil katkılarının bitüme ilave edilme sıralarının nihai asfalt karışım üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Sonraki çalışmalarda, polimer ve nanokilin bitüme katılma sıraları değiştirilerek hazırlanacak polimer modifiye asfalt nanokompozitlerin reolojik ve morfolojik özellikleri ile depolama stabilitelerinin araştırılması ve değişik polimer ve nanokil türlerinin denenmesi araştırılabilir.

Semboller

AASHTO : Amerikan Devlet Karayolu ve Taşımacılık İdareleri Birliği

EVA : Etilen vinil asetat

LCPC : Köprü ve karayolları merkez laboratuvarı

NC : Nanokil

PMA : Polimer modifiye asfalt

PMAN : Polimer modifiye asfalt nanokompozit

SBS : Stiren bütadiyen stiren

TMA : Taş mastik asfalt

TSR : Çekme mukavemeti oranı

Teşekkür

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (Proje kodu: 9542) tarafından desteklenmiştir.

Kaynaklar

- [1] Tabatabaee, H. A., Bahia, H. U. Life cycle energy and cost assessment method for modified asphalt pavements. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 54, 1220-1231, 2012.
- [2] Golestani, B., Nama, B.H., Nejad, F.M., Fallah, S. Nanoclay application to asphalt concrete: Characterization of polymer and linear nanocomposite-modified asphalt binder and mixture, *Construction and Building Materials* 91, 32–38, 2015.
- [3] You, Z., Mills-Beale, J., Foley, J.M., Roy, S., Odegard, G.M., Dai, Q., Goh, S.W. Nanoclay-modified asphalt materials: Preparation and characterization, *Construction and Building Materials* 25, 1072–1078, 2011.
- [4] Şengöz, B., Topal, A., Işıkyakar, G. Morphology and image analysis of polymer modified bitumens, *Construction and Building Materials* 23, 1986–1992, 2009.

- [5] Durrieu, F., Farcas, F., Mouillet, V. The influence of UV aging of a styrene/butadiene/styrene modified bitumen: comparison between laboratory and on site aging, *Fuel* 86, 1446–1451, 2007.
- [6] Zhu, J., Birgisson, B., Kringos, N. Polymer modification of bitumen: advances and challenges, *European Polymer Journal* 54, 18–38, 2014.
- [7] Yusoff, N. I. M., Broom, A. A. S., Alattug, H. N., Hamim, A., Ahmad, J. The effects of moisture susceptibility and ageing conditions on nano-silica/polymer-modified asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 72, 139-147, 2014.
- [8] Bala, N., Kamaruddin, I., Napiyah, M., Sutanto, M.H. Polymer Nanocomposite - Modified Asphalt: Characterisation and Optimisation Using Response Surface Methodology, *Arabian Journal for Science and Engineering* 44, 4233–4243, 2019.
- [9] Oner, J. Examination of storage stability behaviour of polymer modified bitumen involving nanoclay. *Eurasian Journal of Civil Engineering and Architecture EJCAR*, 3, 49-55, 2019.
- [10] Jasso, M., Bakos, D., MacLeod, D., Zanzotto, L. Preparation and properties of conventional asphalt modified by physical mixtures of linear SBS and montmorillonite clay, *Construction and Building Materials* 38, 759–765, 2013.
- [11] Farias, L. G. A., Leitinho, J. L., Amoni, B. D. C., Bastos, J. B., Soares, J. B., Soares, S. D. A., de Sant'Ana, H. B. Effects of nanoclay and nanocomposites on bitumen rheological properties. *Construction and building materials*, 125, 873-883, 2016.
- [12] Mohammadiroudbari, M., Tavakoli, A., Aghjeh, M. K. R., Rahi, M. Effect of nanoclay on the morphology of polyethylene modified bitumen. *Construction and Building Materials*, 116, 245-251, 2016.
- [13] Galooyak, S. S., Dabir, B., Nazarbeygi, A. E., Moeini, A. Rheological properties and storage stability of bitumen/SBS/montmorillonite composites. *Construction and Building Materials*, 24(3), 300-307, 2010.
- [14] Golestani, B., Nejad, F. M., Galooyak, S. S. Performance evaluation of linear and nonlinear nanocomposite modified asphalts. *Construction and Building Materials*, 35, 197-203, 2012.
- [15] Sureshkumar, M. S., Filippi, S., Polacco, G., Kazatchkov, I., Stastna, J., Zanzotto, L. Internal structure and linear viscoelastic properties of EVA/asphalt nanocomposites. *European Polymer Journal*, 46(4), 621-633, 2010.
- [16] Alexander, M., Dubois, P. Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials. *Materials Science and Engineering: R: Reports* 28(1–2), 1-63, 2000.
- [17] Gupta, R.K., Pasanovic-Zujo, V., Bhattacharya, S.N. Shear and extensional rheology of EVA/layered silicate-nanocomposites. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 128(2–3), 116–25, 2005.

- [18] Martinho, F. C., Farinha, J. P. S. An overview of the use of nanoclay modified bitumen in asphalt mixtures for enhanced flexible pavement performances. *Road Materials and Pavement Design*, 20(3), 671-701, 2019.
- [19] Krishnamoorti, R., Yurekli, K. Rheology of polymer layered silicate nanocomposites. *Current Opinion in Colloid & Interface Science* 6(5-6), 464-470, 2001.
- [20] Polacco, G., Kříž, P., Filippi, S., Stastna, J., Biondi, D., Zanzotto, L. Rheological properties of asphalt/SBS/clay blends. *European Polymer Journal*, 44(11), 3512-3521, 2008.
- [21] Polacco, G., Filippi, S., Merusi, F., Stastna, G. A review of the fundamentals of polymer-modified asphalts: Asphalt/polymer interactions and principles of compatibility. *Advances in colloid and interface science*, 224, 72-112, 2015.
- [22] Austroads Technical Report. Stone mastic asphalt surfacing. AAP asphalt guide, 2002.
- [23] General Directorate of Highways of Turkey, Highway Technical Specifications, General Directorate of Highways of Turkey, Ankara, Turkey, 2013.
- [24] Airey, G. D. Rheological evaluation of ethylene vinyl acetate polymer modified bitumens. *Construction and Building Materials*, 16(8), 473-487, 2002.
- [25] Kraton, Kraton D1192 E Polymer Data Document, K0523 Europe, 2020. (<https://kraton.com/products/pdsDocs/polymer/D1192E.pdf?> (Erişim Tarihi: 16.06.2020))
- [26] DOW Chemical Company, ELVAX™ 420 Ethylene Vinyl Acetate Copolymer Technical Data Sheet, Version 215.0, 2019.
- [27] Iskender, E. Evaluation of mechanical properties of nano-clay modified asphalt mixtures. *Measurement*, 93, 359-371, 2016.
- [28] Goh, K. L., Thomas, S., De Silva, R. T., Aswathi, M. K. *Interfaces in Particle and Fibre Reinforced Composites: Current Perspectives on Polymer, Ceramic, Metal and Extracellular Matrices*. Woodhead Publishing, 2019.
- [29] Ezzat, H., El-Badawy, S., Gabr, A., Zaki, E. S. I., Breakah, T. Evaluation of asphalt binders modified with nanoclay and nanosilica. *Procedia Engineering*, 143, 1260-1267, 2016.
- [30] AASHTO. Standard method of test for resistance of compacted hot mix asphalt (HMA) to moisture-induced damage. AASHTO guide, 2007.
- [31] Gandhi, T., Xiao, F., Amirhanian, S. N. Estimating indirect tensile strength of mixtures containing anti-stripping agents using an artificial neural network approach. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2(1), 1-12, 2009.
- [32] Lin, J., Chen, M., Wu, S. Utilization of silicone maintenance materials to improve the moisture sensitivity of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 33, 1-6, 2012.
- [33] Asphalt Institute. Mix design methods for asphalt concrete, manual series no. 2, (MS-2), 6th ed., US, 1993.

- [34] Khodaii, A., Tehrani, H. K., Haghshenas, H. F. Hydrated lime effect on moisture susceptibility of warm mix asphalt. *Construction and Building Materials*, 36, 165-170, 2012.
- [35] Aksoy, A., Şamlioglu, K., Tayfur, S., Özen, H. Effects of various additives on the moisture damage sensitivity of asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 19(1), 11-18, 2005.
- [36] Özen, H. Rutting evaluation of hydrated lime and SBS modified asphalt mixtures for laboratory and field compacted samples, *Construction and Building Materials*, 25(2), 756-765, 2011.
- [37] Irfan, M., Ali, Y., Iqbal, S., Ahmed, S., Hafeez, I. Rutting evaluation of asphalt mixtures using static, dynamic, and repeated creep load tests. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(10), 5143-5155, 2018.
- [38] Sarsam, S., Al-Delfi, K. Assessing Tensile Strength and Temperature Susceptibility of Asphalt Concrete. *Applied Research Journal ARJ*, 1, 279-287, 2015.
- [39] Krcmarik, M., Varma, S., Emin Kutay, M., Jamrah, A. Development of predictive models for low-temperature indirect tensile strength of asphalt mixtures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(11), 04016139, 2016.
- [40] SHRP. Standard Practice for Simulating the Short-Term Ageing of Bituminous Mixtures Using Forced Draft Oven, SHRP No. 1025, Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D.C., 1992.
- [41] Sarsam, S. I., Alwan, A. H. Impact of Aging on Shear, Tensile Strength and Permanent Deformation of Superpave Asphalt Concrete. *International Journal of Scientific Research in Knowledge*, 2(10), 487-496, 2014.
- [42] Hossain, Z., Zaman, M., Hawa, T., Saha, M. C. Evaluation of moisture susceptibility of nanoclay-modified asphalt binders through the surface science approach. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27(10), 04014261, 2015.
- [43] Ghasemi, M., Marandi, S. M., Tahmooresi, M., Kamali, J., Taherzade, R. Modification of stone matrix asphalt with nano-SiO₂. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 2(2), 1338-1344, 2012.
- [44] Goh, S. W., Akin, M., You, Z., Shi, X. Effect of deicing solutions on the tensile strength of micro- or nano-modified asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 25(1), 195-200, 2011.
- [45] Yu J, Wang L, Zeng X, Li B. Effect of montmorillonite on properties of styrene-butadiene-styrene copolymer modified bitumen. *Polymer Engineering Science*;47(9), 1289-1295, 2007.
- [46] La Mantia, F. P., Dintcheva, N. T. EVA copolymer-based nanocomposites: Rheological behavior under shear and isothermal and non-isothermal elongational flow. *Polymer testing*, 25(5), 701-708, 2006.

- [47] Zare-Shahabadi, A., Shokuhfar, A., Ebrahimi-Nejad, S. Preparation and rheological characterization of asphalt binders reinforced with layered silicate nanoparticles, *Construction and Building Materials*, 24(7), 1239–1244, 2010.
- [48] Abdullah, M.E., Zamhari, K.A., Hainin, M.R., Oluwasola, E.A., Hassan, N.A., Yusoff, N.I. Engineering properties of asphalt binders containing nanoclay and chemical warm-mix asphalt additives, *Construction and Building Materials* 112, 232–240, 2016.
- [49] Khodary, F., Abd El-Sadek, M.S., El-Shshtawy, H.S. CaO/bitumen nanocomposite: synthesis and enhancement of stiffness properties for asphalt concrete mixtures, *International Journal of Scientific & Engineering Research* 6 (1), 444–448, 2015.
- [50] Jahromi, S., Ghaffarpour, K. A. Effects of nanoclay on rheological properties of bitumen binder. *Construction and Building Materials*, 23, 2894, 2009.
- [51] Ouyang, C., Wang, S., Zhang, Y., & Zhang, Y. Preparation and properties of styrene–butadiene–styrene copolymer/kaolinite clay compound and asphalt modified with the compound. *Polymer Degradation and Stability*, 87, 309–317, 2005.

TEKNIK NOT

Prefabrike Yapıların Tasarım, Üretim, Depolama, Nakliye ve Yapım Süreçlerini Etkileyen Faktörler

İlhami AY¹
Gülden GÜMÜŞBURUN AYALP²

ÖZ

Prefabrikasyon, inşaat sektöründe sanayileşmenin başlangıcı olarak kabul edilir ve bu süreçleri makineleşme, otomatik kontrol ve üretim takip etmektedir. Prefabrik inşaat teknolojisi, binaların daha kolay ve hızlı, daha düşük maliyet, daha başarılı kalite kontrol ve daha az malzeme israfı ile yapılmasına da olanak tanımaktadır. Prefabrike sistemlerin birçok avantajı olmasına rağmen, Türkiye’de prefabrike yapı sistemlerin kullanımı çok düşük seviyelerdedir. Bu araştırmanın amacı, Türkiye’de prefabrik yapı sistemlerinin yaygın kullanımını etkileyen faktörleri tespit etmektir. Bu amaçla mimarlardan, prefabrik eleman üretimi yapan firma çalışanlarından ve yüklenicilerden anket yöntemiyle veri toplanmış; toplanan verilere SPSS 22 programı aracılığı ile güvenilirlik analizi ve açıklayıcı faktör analizi uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda Türkiye’de prefabrike yapım sistemlerinin yaygın kullanımını etkileyen dokuz ana faktör belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Prefabrikasyon, proje ve yapım yönetimi, Türk inşaat sektörü.

ABSTRACT

Factors Affecting the Design, Manufacturing, Storage, Transportation, and Construction Processes of Prefabricated Buildings

Prefabrication is considered as the beginning of industrialization in the construction sector and these processes are followed by mechanization, automatic control and production. Prefabricated construction technology allows the building to be made easier and faster, with lower cost, more successful quality control and less material waste. Although there are many advantages of prefabricated systems, the use of prefabricated building systems in Turkey is at very low levels. The main objective of this research is to identify factors affecting the prevalent use of prefabricated building systems in Turkey. In order to reach the aim using

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu’na 15 Kasım 2019 günü ulaşmıştır. 17 Ağustos 2020 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 31 Temmuz 2021 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.647272>

1 Hakkari Üniversitesi, Çölemerik Meslek Yüksek Okulu, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Hakkari
ilhamiyay@hakkari.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-3506-3234>

2 Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Mimarlık Bölümü, Gaziantep - gulden.ayalp@hku.edu.tr
<https://orcid.org/0000-0002-7989-5569>

questionnaire data obtained from architects, employees of prefabricated element manufacturers and contractors. Reliability analyze and exploratory factor analyze were conducted using SPSS 22.0 software on obtained data. As a result of the study nine main factors that affect the use of prefabricated construction systems in Turkey was found.

Keywords: Prefabrication, construction management, Turkish construction industry.

1. GİRİŞ

Prefabrikasyon üretimde amaç “önceden hazırlanmış olan prefabrikte elemanlar ile hızlı bir şekilde birleşim yaparak, inşaatı kolaylaştırmak, ekonomik kazanç sağlamak, zamandan kazanmak ve gereken konforu sağlamaktır” [1]. Diğer bir ifade ile şantiyeye en az sayıda iş bırakacak şekilde fabrikadaki işçilik kalitesini ve kapasitesini kontrol ederek çalışma şartlarında belirli bir kalite düzeyini sağlamak ve standartlaşmayı artırmak prefabrikasyonun genel amacıdır.

Bir bina projesinin yapımında prefabrikte betonarme yapı elemanlarının kullanılması, proje toplam maliyetinin azaltılması, projenin hızlı bir şekilde tamamlanması, yapı elemanlarında istenilen kalite ve mukavemetin sağlanması, malzeme israfının azaltılması, modülerizasyon ve standardizasyon olanaklarının artırılması ve şantiyede meydana gelebilecek iş kazası sayısını önemli ölçüde azaltılabileceği gibi birçok yarar sağlamaktadır [2,3]. Avrupa ve Asya ülkelerinde prefabrikte betonarme yapı sistemleri yarım asrı aşkın bir süredir yaygın bir şekilde başarı ile kullanılmakta iken, Türkiye’de söz konusu yapı sistemlerinin kullanımı yaygınlaşmakla beraber hala düşük oranlarda tercih edilmektedir [4-7]. Bu durumun nedeninin prefabrikte yapıların yaşam döngüsü süreçlerinin her aşamasında karşılaşılan sorunlar olduğu düşünülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, Türk inşaat sektöründe prefabrikte yapıların yapım üretim sürecini etkileyen faktörlerin belirlenmesi amaçlanmıştır.

Prefabrikte yapı sistemlerinin sağladığı avantajlar pek çok araştırmacının dikkatini çekmiştir ve ilgili literatür incelendiğinde son yıllarda konuyla ilgili pek çok çalışmanın yapıldığı görülmektedir [8-16]. Söz konusu çalışmalar incelendiğinde araştırmaların prefabrikte sistemlerin yapısal analizleri, fayda-maliyet analizleri veya temiz üretim konuları üzerine yoğunlaştığı görülmektedir. Daha önceki yıllarda yapılmış çalışmalar incelendiğinde ise prefabrikte yapı sistemlerinin, tasarım sürecinden başlayarak uygulama sürecine kadar tüm aşamaları etkileyebilecek kriterlerin bir arada ele alınarak prefabrikte yapı sistemlerinin kullanımını etkileyen faktörlerin belirlendiği bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yapılmış önceki çalışmalarda iki farklı yöntem izlenmiştir. Bir grup çalışmada prefabrikte yapı sistemlerine yönelik süreçleri etkileyen kriterler ele alınmış, alan çalışması yapılmış ve elde edilen veriler yüzde, frekans ve ortalama değerlerine göre yorumlanmıştır [2, 5-7, 19, 21, 26]. Diğer grup çalışmalarda ise prefabrikte yapı sistemlerinin sadece bir sürecine odaklanarak süreci olumsuz etkileyen kriterler belirlenmiş ve söz konusu kriterlere faktör analizi uygulanmıştır [4]. Yapılan bu çalışmada prefabrikte yapıların tasarım, yapı elemanlarının üretim, depolama, nakliye ve uygulama süreçlerini etkileyen kriterler bir arada ele alınarak faktör analizi uygulanmıştır. Prefabrikte yapıların üretimindeki tüm süreçleri etkileyen ana faktörlerin belirlenmesi çalışmayı diğer araştırmalardan farklılaştırmaktadır.

Birçok yapı üretim sisteminde olduğu gibi prefabrikte yapıların üretim sürecinde de pek çok paydaş bir arada çalışmaktadır. Yapıların tasarım sürecinde mimarlar, prefabrikte yapı

elemanlarının üretim sürecinde ilgili yapı elemanının üretimine katkı koyan üretici firmalar ve montaj ve uygulamayı gerçekleştiren yükleniciler prefabrike yapıların tasarım, üretim ve uygulama süreçlerinde başrol üstlenmektedirler. Bu nedenle, çalışmanın ana amacına ulaşılmasında her üç gruptaki katılımcılardan görüş alınmıştır. Prefabrike bir yapının tasarım aşamasından başlayıp yapım aşamasının sonuna kadar olan tüm süreçlerde karşılaşılabilecek değişkenlerin araştırmaya dahil edilmesi çalışmanın değerini oluşturmaktadır.

2. PREFABRİKE YAPILARIN TASARIM, ÜRETİM, DEPOLAMA, NAKLİYE VE YAPIM SÜREÇLERİNİ ETKİLEYEN KRİTERLERİN BELİRLENMESİ

Prefabrike yapıların tasarımı, bu yapılarda kullanılacak yapı elemanlarının üretimi, depolama ile nakliye süreçleri ile bu yapıların yapım süreçlerini etkileyen faktörlerin belirlenebilmesi için faktörlere kaynaklık edecek nedenlerin/kriterlerin belirlenmesi önem arz etmektedir. Çalışma kapsamında yapılan literatür taraması sonucunda adı geçen süreçleri etkileyen 46 kriter elde edilmiştir. Çalışma kapsamında ele alınan kriterler ve ilgili literatür Çizelge 1’de görülmektedir.

Çizelge 1 - Prefabrike yapım sistemlerinin yaygın kullanımına etkileyen kriterler

SÜREÇLER	Madde Kodu	Kriterler	Kaynak
TASARIM SÜRECİ KRİTERLERİ	T1	Prefabrike betonarme yapı elemanlarının çeşitliliğinin az olması tasarımı kısıtlamaktadır.	[4],[6],[17]
	T2	Prefabrike betonarme yapı elemanlarının dinamik yükler altındaki performansı tasarımları olumsuz etkilemektedir.	[6],[17],[18],[19]
	T3	<i>Prefabrike betonarme yapı elemanları çeşitliliğinin az olması tasarımlardaki yaratıcılığı olumsuz etkilemektedir.</i>	[4],[5],[6],[8]
	T4	Prefabrike betonarme yapı elemanları konusunda yeterli bilgi düzeyine sahip olunmaması tasarım sürecini olumsuz etkilemektedir.	[4],[6],[17]
	T5	Tasarım sürecinde paydaşlar arası (inşaat mühendisi, müteahhit, üretici firma vs.) bilgi akışının yetersiz olması tasarım sürecini olumsuz etkilemektedir.	[5],[6],[12],[20]
	T6	Tasarımcıların, üretici firmalara prefabrike elemanın tasarım aşamasında danışmanlık yapmaması üretim sürecini olumsuz etkilemektedir.	[6],[20]
	T7	Paydaşlar arası (inşaat mühendisi, müteahhit, üretici firma vs.) periyodik toplantılar yapılmaması tasarım sürecini olumsuz etkilemektedir.	[6],[17]
	T8	Prefabrike yapı sistemlerinin esnek tasarımlara imkan vermemesi tasarımları kısıtlamaktadır.	[4],[17]
	T9	<i>Prefabrik yapı elemanı boyutları, ekonomik ağırlığı ve tekrar eden panel sayısının dikkate alınmaması tasarımı olumsuz etkilemektedir.</i>	[4],[5]
	T10	Prefabrike yapı elemanlarının kullanıldığı bina projelerinin tasarımında uzmanlaşmış mühendis/mimar sayısının az olması tasarım sürecini olumsuz etkilemektedir.	[5],[19]
ÜRETİM SÜRECİ KRİTERLERİ	Ü1	Üretim sürecinde gerekli olan nitelikli iş gücü temininin sağlanmaması süreci olumsuz etkilemektedir.	[5],[6],[19]
	Ü2	Üretim sürecinde kalite-kontrol sisteminin kurulamaması süreci olumsuz etkilemektedir.	[5],[21],[22]
	Ü3	Prefabrik yapı elemanının tasarım sürecinde yapılan hatalar, ilgili prefabrik elemanın hatalı/eksik üretilmesi üretilmesine neden olmaktadır.	[6]
	Ü4	Üretici firmalar teknik çizime uygun üretim yapmamaktadır.	[21],[22]

Çizelge 1 - Prefabrikte yapılmayan sistemlerinin yaygın kullanımına etkileyen kriterler (devam)

SÜREÇLER	Madde Kodu	Kriterler	Kaynak
ÜRETİM SÜRECİ KRİTERLERİ	Ü5	Üretici firmalarda teknik çizim okuma ve uygulama yapmayan bilmeyen elemanların sayıca çok olması ve/veya istihdam edilmesi üretim sürecini olumsuz etkilemektedir.	[4],[5],[19]
	Ü6	Prefabrik yapı elemanın üretim sürecinde kullanılan betonun vibrasyonu yeterli düzeyde yapılmamaktadır.	[23]
	Ü7	Prefabrik yapı elemanlarının hatalı üretilmesi işin teslim sürecini geciktirmektedir.	[23]
	Ü8	Montaj işleminin iş programına uygun olarak yapılamaması süreci olumsuz etkilemektedir.	[5],[23]
	Ü9	Prefabrik yapı elemanın üretim sürecinde korozyona uğramış donatı veya ön gerilim teli kullanılmaktadır.	[23]
	Ü10	<i>Prefabrik yapı elemanın üretim sürecinde nitelik ve boyut olarak uygun agrega kullanılmaktadır.</i>	[23]
	U11	Kalıplardaki deformasyon kaynaklı hatalar üretim sürecini olumsuz etkilemektedir.	[23]
	U12	Prefabrik yapı elemanın üretim sürecinde teknik şartnamelere uygun üretim yapılmamaktadır.	[5]
DEPOLAMA SÜRECİ KRİTERLERİ	D1	Prefabrik yapı elemanlarının yanlış biçimde depolanması yapı elemanlarının fiziksel hasarlarına sebep olmaktadır.	[24],[25],[26]
	D2	Prefabrik yapı elemanlarının depolanma sürecinde korunmaması elemanlarda, boyutsal ve işlevsel hasarlar oluşuna neden olmaktadır.	[24],[25]
	D3	Depo alanlarının prefabrik yapı elemanlarının özelliklerine ve boyutlarına uygun olmaması, elemanlarda hasara sebep olmaktadır.	[24],[25],[26]
	D4	Depolama sürecinin iş programlarına uygun olarak planlanmaması eleman hasarlarına ve ekonomik kayıplara neden olmaktadır.	[24],[25],[26]
	D5	Depolama alanı ve stok kontrolünün deneyimli olmayan kişilerin sorumluluğunda ve denetiminde olması ekonomik, organizasyonel ve zamanla ilgili sorunlara yol açmaktadır.	[5],[6],[26]
	D6	Sipariş için uygun zaman belirlenmemesi optimum süreyi olumsuz etkileyerek gecikmelere neden olmaktadır.	[20],[25],[26]
NAKLIYE SÜRECİ KRİTERLERİ	N1	Üretilen prefabrik yapı elemanlarının nakliye sürecinde karayollarının getirmiş olduğu yasal sınırlılıklar prefabrik yapı kullanımını olumsuz etkilemektedir.	[4],[6],[24],[25],[26]
	N2	Üretilen yapı elemanlarının yükleme yapılan tesis ile şantiye arasındaki taşıma mesafesinin fazla olması sorunlara sebep olmaktadır.	[4],[5],[6],[19],[24],[25],[26]
	N3	Taşıma işlemi yapılacak yolların fiziksel durumu prefabrik yapı elemanın zarar görmesine sebep olmaktadır.	[6],[26]
	N4	Nakliye sırasında yeterli özenin gösterilmemesi prefabrik elemanlara fiziksel zarar vermektedir.	[6],[23],[26]
	N5	Taşıma aracının doğru seçilmemesi prefabrik yapı elemanlarına hasar vermektedir.	[6],[26]
	N6	Taşıma yönteminin doğru seçilmemesi prefabrik yapı elemanlarına hasar vermektedir.	[6],[19],[26]
	N7	Nakliye planının iş programına uygun yapılmaması ya da hiçbir plana uygun yapılmaması yapım sürecini olumsuz etkilemektedir.	[6],[25],[26]
MONTAJ/YAPIM SÜRECİ KRİTERLERİ	M1	Prefabrik yapı elemanlarında kolon-kiriş birleşimiyle ilgili sorunlar montaj sürecini olumsuz etkilemektedir.	[4],[19],[27]
	M2	Prefabrik yapı elemanlarında kolon-duvar birleşimiyle ilgili sorunlar montaj sürecini olumsuz etkilemektedir.	[4],[19],[27]
	M3	Prefabrik yapı elemanlarında kolon-kolon birleşimiyle ilgili sorunlar montaj sürecini olumsuz etkilemektedir.	[4],[19],[27]
	M4	Prefabrik yapı elemanlarında temel-kolon birleşimiyle ilgili sorunlar montaj sürecini olumsuz etkilemektedir.	[4],[19],[27]
	M5	Prefabrik yapı elemanlarında kiriş-kiriş birleşimiyle ilgili sorunlar montaj sürecini olumsuz etkilemektedir.	[4],[19],[27]

Çizelge 1 - Prefabrikte yapı m sistemlerinin yaygın kullanımına etkileyen kriterler (devam)

SÜREÇLER	Madde Kodu	Kriterler	Kaynak
MONTAJ/YAPIM SÜRECİ KRİTERLERİ	M6	Yapılan montajlarda denetiminde görev alacak prefabrikte yapı m sisteminde uzmanlaşmış/bilgi sahibi mimar/mühendis sayısının az olması yapı m sürecini olumsuz etkilemektedir.	[5],[6],[19],[21],[22],[27]
	M7	Yapım sürecinde yer alacak nitelikli iş gücünün temin edilememesi süreci olumsuz etkilemektedir.	[4],[5],[6],[27]
	M8	Montaj işleminin iş programına uygun olarak yapı lamaması süreci olumsuz etkilemektedir.	[28]
	M9	Şantiye planı yapı lırken vinçlerin hareket düzeninin dikkate alınmaması yapı m sürecini olumsuz etkilemektedir.	[4],[5],[24],[27]
	M10	Yapılan montajların kalite-kontrol planı dâhilinde denetlenmemesi yapı m sürecini olumsuz etkilemektedir.	[5],[21],[22],[27],[29],[30]
	M11	Yapılan montajların periyodik olarak takip edilmemesi yapı m sürecini olumsuz etkilemektedir.	[21],[22],[27],[31]

T: Tasarım Ü: Üretim N: Nakliye D: Depolama M: Montaj

3. ARAŞTIRMANIN YÖNTEMİ

Çalışmanın amacı doğrultusunda, çalışma prefabrikte yapı ların tasarım, yapı elemanlarının üretimi, depolama, nakliye ve montaj aşamalarını olumsuz etkileyebilecek değişkenleri belirlemek için kapsamlı bir literatür taraması ile başlamıştır. Literatür taraması sonucunda tasarım sürecine yönelik 10 [4-6,8,12,17-20], üretim süreci için 12 [4-6, 19, 21-23], depolama süreci için 6 [5, 6, 20, 24-26], nakliye süreci için 7 [4-6, 19, 23-26] ve son olarak montaj/uygulama süreci için 11 [4-6, 19, 19, 21, 22, 27-31] olmak üzere toplam 46 kriter belirlenmiştir. Belirlenen kriterler 5'li Likert ölçeği ile anket sorusu olarak düzenlenmiştir. Likert ölçeği ile hazırlanan anket sorularının içsel tutarlıklarının ölçülmesi gerekmektedir [32]. Bu nedenle, Likert ölçeği ile hazırlanan 46 maddeye/kritere güvenilirlik analizi uygulanmıştır. Çalışmanın amacına ulaşabilmek için aynı yapı yı ölçen çok sayıda değişkenden, az sayıda ve tanımlanabilir nitelikte anlamlı değişkenler elde etmeye yönelik çok değişkenli bir istatistik olan açıklayıcı faktör analizi [33] kullanılmıştır.

Türk inşaat sektöründe prefabrikte yapı ların tasarım sürecinde bulunan mimarlar, prefabrikte yapı elemanlarının üretim sürecinde yer alan üretici firma çalışanları ve prefabrikte yapı ların uygulama sürecinden sorumlu yükleniciler bu çalışmanın hedef popülasyonunu oluşturmaktadır. Belirlenen popülasyon içerisinde her bir ana kitleden basit rastgele örneklem seçimi yöntemi ile çalışmanın örnekle mi belirlenmiştir. Hazırlanan anket formları çevrimiçi hale getirilerek Türkiye Prefabrik Birliğine üye olan 35 üretici firma yetkilisine e-posta yoluyla ulaştırılmış ve firma çalışanlarına da anket formunun ulaştırılması için destek alınmıştır. Anketlerin ülke genelinde mimarlara ve yüklenicilere ulaştırılmasında profesyonel organizasyonlardan destek alınmıştır. Ayrıca çevrimiçi hale getirilen anketler, Türkiye genelinde meslek odalarına ve birliklere bağlı üyelere de internet ortamında ulaştırılarak mimarların ve yüklenicilerin katılımı sağlanmıştır. Anketler katılımcılara Kasım 2018 – Ocak 2019 tarihleri arasında ulaştırılmıştır. Türk inşaat sektöründe aktif şekilde faaliyet gösteren prefabrikte yapı ların tasarımını yapan 51 mimar, üretici firma çalışanı 34 teknik eleman ve prefabrikte yapı ların uygulama sürecinde görev alan 45 yüklenici çalışanın örneklemini oluşturmaktadır.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Örnekleme grubundan anket yöntemiyle toplanan veriler istatistiksel yöntemlerle analiz edilmiştir. Bu kapsamda madde güvenilirlik analizi ve açıklayıcı faktör analizi kullanılmıştır. Çalışma kapsamında ilk olarak algıya dayalı verilere güvenilirlik analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda Cronbach Alfa değerinin $\alpha=0,960$ olarak olduğu görülmektedir. Cronbach Alfa katsayısı (α) 0 ile 1 arasında değer almaktadır. Yaygın kabul edilen yaklaşıma göre α katsayısı 0,5'den küçük ise ölçeğin güvenilirliği kabul edilemez; $0,5 \leq \alpha < 0,6$ ise zayıf; $0,6 \leq \alpha < 0,7$ kabul edilebilir; $0,7 \leq \alpha < 0,9$ iyi; $\alpha \geq 0,90$ mükemmel güvenilirlik göstermektedir [34]. Bu değere göre anketin yüksek derecede güvenilir olduğu söylenebilir. Anketin içsel tutarlığı sağlandıktan sonra açıklayıcı faktör analizi uygulanmıştır. Faktör analizi sonucunda faktör yükü 0,4'ün altında olan üç soru araştırma dışı bırakılmış ve 43 sorudan elde edilen verilerle analizler tekrarlanmıştır. Faktör analizi sonucu faktörler altında toplanan maddelerin faktör yükleri ve bu maddelerin içeriğine göre adlandırılmış faktörler Çizelge 2'de görülmektedir.

Çizelge 2 - Açıklayıcı faktör analizi

Faktörler	Madde Kodları	Faktör Yükleri	Faktör Açıklayıcıları	Faktör Güvenilirlikleri
FAKTÖR 1- Nakliye ve Depolama Süreçleri ile İlgili Bilgi Eksikliği	N5	0,809		
	N7	0,759		
	N6	0,745		
	D1	0,736		
	D5	0,720		
	D4	0,698	16,645	0,944
	D6	0,693		
	N4	0,628		
	D3	0,586		
	D2	0,581		
FAKTÖR 2- Prefabrike Yapı Elemanları Arasındaki Uyumsuzluklar	M2	0,805		
	M1	0,799		
	M3	0,791		
	M5	0,787	11,844	0,908
	M4	0,617		
	Ü3	0,512		
FAKTÖR 3- Uygulama Sürecinde Planlama, Organizasyon ve Denetim Eksikliği	M11	0,770		
	M6	0,713		
	M10	0,703		
	M8	0,693	10,232	0,881
	M9	0,660		
	T8	0,565		

Çizelge 2 - Açıklayıcı faktör analizi (devam)

Faktörler	Madde Kodları	Faktör Yükleri	Faktör Açıklayıcıları	Faktör Güvenilirlikleri
<i>FAKTÖR 4- Tasarım Sürecinde Paydaşlar Arası Koordinasyon Eksikliği</i>	Ü4	0,774		
	T6	0,645		
	N1	0,626	10,151	0,866
	Ü6	0,589		
	T7	0,534		
	T5	0,455		
<i>FAKTÖR 5- Konu ile ilgili Uzman Mimar ve Mühendis Sayısının Yetersizliği</i>	T4	0,773		
	Ü2	0,752	7,435	0,787
	Ü1	0,653		
	T10	0,619		
<i>FAKTÖR 6- Kısıtlı çeşit türü, dinamik yükler altındaki performans ve teknik şartnameye uygun üretim yapılmaması</i>	T1	0,734		
	T2	0,622	6,613	0,779
	Ü12	0,586		
<i>FAKTÖR 7- Uygunsuz malzeme kullanımı</i>	Ü11	0,740		
	Ü9	0,655	5,806	0,815
	Ü7	0,627		
	Ü8	0,506		
<i>FAKTÖR 8- Yapı Elemanlarının Üretim ve Montaj Süreçlerinde Teknik, Teorik ve Uygulama Bilgisi Eksikliği</i>	M7	0,646	4,483	0,705
	Ü5	0,602		
<i>FAKTÖR 9- Nakliye Süreci ile İlgili Yasal Kısıtlamalar</i>	N2	0,838	4,173	0,725
	N3	0,468		
Açıklanan Toplam Varyans:		77,382		
Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) Ölçek Geçerliliği:		0,650		
Bartlett Küresellik Değerleri	Ki-Kare			6693,500
	Sd:			903
	p:			0,000

T: Tasarım Ü: Üretim N: Nakliye D: Depolama M: Montaj

Faktör analiz sonucunda, örneklem büyüklüğünün faktör analizi için uygunluğunu test eden KMO değeri 0,650 ve Bartlett Küresellik değeri $p=0.000$ olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre örneklem büyüklüğünün faktör analizi için yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Açıklayıcı faktör analizinde Özdeğer ve Varimax döndürme yöntemi kullanılarak, Özdeğeri 1'den büyük 9 adet faktör elde edilmiştir. Türk inşaat sektöründe prefabriğe yapım sistemlerinin yaygın kullanılmasına neden olan 43 madde 9 faktör altında toplanmış ve bu 9 faktör toplam varyansın %77,382'ini açıkladığı belirlenmiştir. Faktörlerin içsel tutarlılığının hesaplanmasında, Cronbach Alpha değeri kullanılmıştır. Faktörlerin Cronbach Alpha

değerleri (faktör güvenilirlikleri) 0,70'in üzerinde olduğundan güvenilirliğin yüksek olduğu belirlenmiştir.

Birinci faktör, toplam varansın %16,645'ini açıklamış ve altında 10 madde toplamıştır. Maddelerin içeriği incelenerek birinci faktör "Nakliye ve depolama süreçleri ile ilgili bilgi eksikliği" olarak isimlendirilmiştir. Diğer faktörler ise altında toplanan maddelerin içeriği incelenerek sırasıyla "Prefabrike yapı elemanları arasındaki uyumsuzluklar"; "Uygulama sürecinde planlama, organizasyon ve denetim eksikliği"; "Tasarım sürecinde paydaşlar arası koordinasyon eksikliği"; "Konu ile ilgili uzman mimar ve mühendis sayısının yetersizliği"; "Kısıtlı çeşit türü, dinamik yükler altındaki performans ve teknik şartnameye uygun üretim yapılmaması"; "Uyumsuz malzeme kullanımı"; "Yapı elemanlarının üretim ve montaj süreçlerinde teknik, teorik ve uygulama bilgisi eksikliği"; "Nakliye süreci ile ilgili yasal kısıtlamalar" olarak adlandırılmıştır.

Türk inşaat sektöründe prefabrike yapım sistemlerinin yaygın kullanılmasını etkileyen dokuz ana faktörün ilki "Nakliye ve depolama süreçleri ile ilgili bilgi eksikliği" olarak belirlenmiştir. Çalışmanın bu bulgusunun literatürde yapılmış çalışmalarla [5, 6, 19, 20, 23-26] tutarlılık gösterdiği görülmektedir.

"Prefabrike yapı elemanları arasındaki uyumsuzluklar" ikinci faktör olarak belirlenmiştir. Jaillon ve Poon [2]'un prefabrike yapım sistemlerini avantaj ve dezavantajlarını belirledikleri çalışmada prefabrike yapı elemanları arasındaki uyumsuzlukların sistemin önemli bir kısıtlayıcısı olması dikkat çekmektedir. Polat [19]'ın çalışma sonucuna göre ise prefabrike yapı elemanları arasındaki uyumsuzluklar adı geçen sistemin yaygın kullanılmaması için önemli bir kriter olarak belirlenmiştir.

Çalışma bulgusunda belirlenen "Uygulama sürecinde planlama, organizasyon ve denetim eksikliği" faktörü konuyla ilgili yapılmış çalışmalarda ayrıntılı olarak ele alınmamıştır. Oysaki yönetimin fonksiyonlarından olan planlama, organizasyon ve denetim yapı üretim sürecinin etkin bir şekilde gerçekleştirilebilmesi için önemli gerekliliklerdir. Mevcut çalışmanın bu sonucunun literatürdeki boşluğu dolduracağı düşünülmektedir.

"Tasarım sürecinde paydaşlar arası koordinasyon eksikliği" konuyla ilgili yapılmış önceki çalışmalarda da ele alınan önemli bir faktördür [5-7,17, 20-23]. Çalışmanın bu bulgusunun literatürdeki çalışma sonuçlarıyla uyum gösterdiği söylenebilir.

"Konu ile ilgili uzman mimar ve mühendis sayısının yetersizliği" ve "Yapı elemanlarının üretim ve montaj süreçlerinde teknik, teorik ve uygulama bilgisi eksikliği" yapılmış çalışmalarda da sıklıkla ele alınan kriterlerdendir [4-7]. Bu bulgular ile hem ülkemizde hem de farklı ülkelerde (Hong Kong, Singapur, Malezya) prefabrike yapım sistemlerinin tasarım ve uygulanması aşamalarında görev alan mimar ile mühendislerin ve prefabrike yapı elemanlarının üretim sürecinde bulunan ara teknik elemanların konuyla ilgili yeterli seviyede bilgi sahibi olmadığı sonucuna ulaşılmıştır.

5. SONUÇLAR

Türk inşaat sektöründe prefabrike yapıların yaygın kullanılmasını engelleyen faktörlerin belirlenmesinin amaçlandığı bu çalışmada prefabrike yapıların tasarım, yapı elemanlarının üretim, depolama, nakliye ve montaj süreçlerinde görev alan mimar, yüklenici ve üretici

firma çalışanlarından anket yöntemiyle veri toplanmıştır. Örneklem grubundan elde verilere açıklayıcı faktör analizi uygulanarak prefabrikte yapım sistemlerinin yaygın kullanımına neden olan dokuz faktör belirlenmiştir.

Prefabrikte yapım sistemlerinin Türk inşaat sektöründe yaygın kullanılmasını engelleyen faktörler incelendiğinde, sektörde çalışan mimar ile mühendislerin ve ara teknik elemanların bu konuda yeterli bilgi düzeyine sahip olmamalarından kaynaklandığı ifade edilebilir. Bununla birlikte, prefabrikte yapım sistemlerinin yapısına uygun yönetim fonksiyonlarının yerine getirilmemesi ve yasal düzenlemelerdeki kısıtlamalar kaynaklı olduğu dikkat çekmektedir.

Türkiye’de prefabrikte yapıların daha yaygın bir şekilde kullanılabilmesi için söz konusu süreçlerde görev alan her teknik elemanın çeşitli meslek içi eğitimlerle konuyla ilgili bilgilenmesinin sağlanması; prefabrikte yapım sisteminin karakterine uygun organizasyon yapılarının oluşturulması ve özellikle yapı elemanlarının nakliyesi için gerekli yasal düzenlemelerin güncelleştirilmesi önerilmektedir.

Bu çalışmanın prefabrikte yapıların tasarım, üretim ve uygulama süreçlerine odaklandığı göz önüne alındığında daha sonra yapılacak çalışmaların prefabrikte yapıların kullanım sürecini etkileyen faktörlerin üzerine yoğunlaşması düşünülebilir.

Kaynaklar

- [1] Aydemir, B., Prefabrikte Betonarme İskelet Sistemlerle İnşa Edilen Endüstri Yapılarında Prefabrikte Döşeme Bileşenlerinin Yük ve Açıklık Kriterleri Açısından İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, 2005.
- [2] Jaillon, L., Poon, C.S., Advantages and Limitations of Precast Concrete Construction in High-Rise Buildings: Hong Kong Case Studies. CIB World Building Congress, Cape Town, 2504-2514, 2007.
- [3] Li, Z., Shen, G. Q., Xue, X., Critical Review of The Research on The Management of Prefabricated Construction. Habitat International, 43, 240-249, 2014.
- [4] Jaillon, L., Poon, C.S., Design Issues of Using Prefabrication in Hong Kong Building Construction, Construction Management and Economics, 28, 1025-1042, 2010.
- [5] Adel, M. B., Heiza, K. M., El-Nawawy, O., Hussein, A., Factors Affecting Over Economy of Prefabricated Construction Systems. International Journal of Advanced Scientific Research and Management, 1(10), 51-63, 2016.
- [6] Arditi, D., Ergin, U., Günhan, S., Factors Affecting the Use of Precast Concrete Systems. Journal of Architectural Engineering, (6) 3, 79-86, 2000.
- [7] Polat, G., Factors Affecting the Use of Precast Concrete Systems in the United States. Journal of Construction Engineering and Management, 134(3), 169-178, 2008.
- [8] Hong, J., Shen, G. Q., Li, Z., Zhang, B., Zhang, W., Barriers to Promoting Prefabricated Construction in China: A Cost-Benefit Analysis. Journal of Cleaner Production, 172, 649-660, 2018.

- [9] Rausch, C., Nahangi, M., Haas, C., Liang, W., Monte Carlo Simulation for Tolerance Analysis in Prefabrication and Offsite Construction. *Automation in Construction*, 103, 300-314, 2019.
- [10] Li, X., Shen, G. Q., Wu, P., Yue, T., Integrating Building Information Modeling and Prefabrication Housing Production. *Automation in Construction*, 100, 46-60, 2019.
- [11] Wuni, Y. I., Shen, G. Q., Critical Success Factors for Management of the Early Stages of Prefabricated Prefinished Volumetric Construction Project Life Cycle. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2020.
- [12] Sherif, M., Ki, P. K., Vivian, W. Y. T. Payam, R. Exploring the Status, Benefits, Barriers and Opportunities of Using BIM for Advancing Prefabrication Practice. *International Journal of Construction Management*, 20(2), 146-156, 2020.
- [13] Hao, J. L., Cheng, B., Lu, W., Xu, J., Wang, J., Bu, W., Guo, Z., Carbon Emission Reduction in Prefabrication Construction During Materialization Stage: A BIM-Based Life-Cycle Assessment Approach, *Science of the Total Environment*, 723, 137870, 2020.
- [14] Jiang, W., Huang, Z., Peng, Y., Fang, Y., Cao, Y., Factors Affecting Prefabricated Construction Promotion in China: A Structural Equation Modelling Approach. *PLoS ONE*, 15(1), e0227787, 2020.
- [15] Yuan, Z., Ni, G., Wang, L., Qiao, Y., Sun, C., XU, N., Wang, W., Research on Barrier Analysis and Strength Measurement of a Prefabricated Building Design. *Sustainability*, 12, 2994, 2020.
- [16] Gündüz, L., Kalkan, Ş. O., Lightweight Cellular Hollow Concrete Blocks Containing Volcanic Tuff Powder, Expanded Clay and Diatomite for Non-Load Bearing Walls. *Teknik Dergi*, 31(6), 2020.
- [17] Leskovar, V. Z., Premrov, M., An Approach in Architectural Design of Energy Efficient Timber Buildings With a Focus on the optimal Glazing size in the Southoriented Façade. *Energy and Buildings*, 43, 3410-3418, 2011.
- [18] Şenel, Ş., Palanci, M., Kalkan, A., Yılmaz, Y., Mevcut Prefabrik Binaların Mafsallı Birleşimlerinin Kırma ve Devrilme Güvenliğinin Araştırılması. *Teknik Dergi*, 24 (119), 6505-28, 2013.
- [19] Polat, G., Precast Concrete Systems in Developing vs. Industrialized Countries, *Journal of Civil Engineering and Management*, 16(1), 85-94, 2010.
- [20] Ergen, E., Akinci, B., Formalization of the Flow of Component-Related Information in Precast Concrete Supply Chains. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134, 112-121, 2008.
- [21] Pan, W., Gibb, A. G., Dainty, A. R., Strategies for Integrating the Use of Offsite Production Technologies in House Building. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138, 1331-1340, 2012.

- [22] Yin, S. Y., Tserng, H. P., Wang, J., Tsai, S., Developing a Precast Production Management System Using RFID Technology. *Automation in Construction*, 18, 677-691, 2009.
- [23] Gönül, H., Tek Katlı Geniş Açıklıklı Betonarme Prefabrikte İskelet Sistemlerle Üretilen Endüstri Yapıları Sorunların Analizi ve Diyarbakır Birinci Organize Sanayi Bölgesi Örneği. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, 2000.
- [24] Jaillon, L., Poon, C.S., Life Cycle Design and Prefabrication in Buildings: A Review and Case Studies in Hong Kong. *Automation in Construction*, 39, 195-202, 2014.
- [25] Chan, W.-H., Lu, M., Materials Handling System Simulation in Precast Viaduct Construction: Modeling, Analysis, and Implementation. *Journal of Construction Engineering and Management*, 134, 300-310, 2008.
- [26] Marasini, R., Dawood, N. N., Hobbs, B., Stockyard Layout Planning in Precast Concrete Products Industry: A Case Study and Proposed Framework. *Construction Management & Economics*, 19, 365-377, 2001.
- [27] Manrique, J. D., Al-Hussein, M., Telyas, A., Funston, G., Constructing a Complex Precast Tilt-Up-Panel Structure Utilizing an Optimization Model, 3D CAD, and Animation. *Journal of Construction Engineering and Management*, 133, 199-207, 2007.
- [28] Marasini, R., Dawood, N., Innovative Managerial Control System (IMCS): An Application in Precast Concrete Building Products Industry. *Construction Innovation: Information, Process, Management*, 6, 97-120, 2006.
- [29] Fang, Y., Ng, S. T., Applying Activity-Based Costing Approach for Construction Logistics Cost Analysis. *Construction Innovation: Information, Process, Management*, 11, 259-281, 2011.
- [30] Vukovic, S., Trivunic, M., Site Management and Production Factors in Concrete Hall Assembly. *Building Research & Information*, 22, 272-276, 1994.
- [31] Shamsai, M., Whitlatch, E., Sezen, H., Economic Evaluation of Reinforced Concrete Structures with Columns Reinforced with Prefabricated Cage System. *Journal of Construction Engineering and Management*, 133, 864-870, 2007.
- [32] Nunnally, J.C., Bernstein, I.H., *Psychometric Theory*, New York. McGraw-Hill, 2007.
- [33] Büyükoztürk, Ş., Faktör Analizi: Temel Kavramlar ve Ölçek Geliştirmede Kullanımı. *Kuram ve Uygulamada Eğitim Yönetimi*, 32(32), 470-483, 2002.
- [34] George D., Mallery P., *SPSS for Windows Step by Step: A Simple Guide and Reference*, 11.0 update (4th ed.). Boston. Allyn & Bacon, 2003.

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

Kaynak Dengeleme Probleminin Arama Uzayını Paralel Programlama ile Tarayarak Kesin Çözümü.....	10767
Tuğba ERZURUM, Önder Halis BETTEMİR	
Jeoid Değişimlerinin ICESat Altimetre Verisi ile Hesaplanan Su Seviyelerine Etkisi	10807
Fatih SAKA, Ahmet Emre TEKELİ , Senayi DÖNMEZ	
İncelenmiş Uçlu Önüretimli Aşık Kirişlerinin Yük Taşıma Kapasitelerinin Deneysel ve Numerik Olarak İrdelenmesi ve Çözüm Önerileri	10823
Ceyhun AKSOYLU, Yasin Onuralp ÖZKILIÇ, Şakir YAZMAN, Lokman GEMİ, Musa Hakan ARSLAN	
Yaya Kazalarının Yaralanma Şiddetinin İncelenmesi: İkili Lojistik Regresyon Modeli Uygulaması.....	10859
Murat ÖZEN	
Nanokil/Polimer/Bitüm Nanokompozit Hazırlama Yönteminin Asfalt Karışım Performansı Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması	10885
Erol İSKENDER, Atakan AKSOY	
Teknik Not	
Prefabrike Yapıların Tasarım, Üretim, Depolama, Nakliye ve Yapım Süreçlerini Etkileyen Faktörler.....	10907
İlhami AY, Gülden GÜMÜŞBURUN AYALP	