



TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Teknik Dergi

Cilt 31 Sayı 5 Eylül 2020

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 31 Number 5 Semtember 2020*

Cilt 31 Sayı 5 Eylül 2020



**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
Cemal GÖKÇE

Yazı İşleri Müdürü:

Bahaettin SARI

Cilt 31 - Sayı 5 - Eylül 2020

İki ayda bir yayınlanır, yerel süreli yayın.

Baskı tarihi: 1 Eylül 2020 / 1.000 adet basılmıştır.

Yayın Kurulu'nun yazılı onayı olmaksızın alıntı yapılamaz.

ISSN: 1300-3453

Baskı

Berk Grup Matbaacılık Tanıtım Hizm. İth. İhr. San. ve Tic. Ltd. Şti.
Zübeyde Hanım Mah. Kazım Karabekir Cad. No: 31/104 Altındağ / Ankara
Tel: 0.312.342 19 13

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Teknik Dergi

Yayın Kurulu:

Süheyl AKMAN

İsmail AYDIN

Özer ÇİNİCİOĞLU

Metin GER

Gürkan Emre GÜRCANLI

Alper İLKİ

Cem OĞUZ

Kutay ORAKÇAL

Günay ÖZMEN

Baki ÖZTÜRK

İsmail ŞAHİN

Özkan ŞENGÜL

Tuğrul TANKUT

Editör:

Tuğrul TANKUT

Yardımcı Editörler:

İsmail AYDIN

Özer ÇİNİCİOĞLU

Metin GER

Gürkan Emre GÜRCANLI

Alper İLKİ

Kutay ORAKÇAL

İsmail ŞAHİN

Özkan ŞENGÜL

Yayın Sekreteri:

Cemal ÇİMEN

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.

Danışmanlar:

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

Ayda Şafak AĞAR ÖZBEK Perviz AHMEDZADE Ragıp AKBAŞ Sami Öguzhan AKBAŞ Rifat AKBİYİKLİ Özge AKBOĞA KALE Burcu AKÇAY ALDANMAZ Cihan Taylan AKDAĞ Cem AKGÜNER Adem AKPINAR Muhammad Vefa AKPINAR Atakan AKSOY Hafzullah AKSOY Gözün AKYILDIZ ALÇURA Zuhal AKYÜREK Fatih ALEMDAR Pelin ALPKÖKİN Sinan ALTIN Selim ALTUN Adlen ALTUNBAŞ Ahmet Can ALTUNIŞIK Egemen ARAS Fuat ARAS Davit ARDITI Ergin ARIOĞLU Deniz ARTAN İLTER Ali Osman ATAHAN Hakan Nuri ATAHAN Shady ATTIA Abdullah AVEY İsmail AYDIN Mustafa Tamer AYVAZ Ela BABALIK Can Elmar BALAS Lale BALAS Selim BARADAN Türkyay BARAN Bekir Ögüz BARTIN Cemal BAŞARAN Zeynep BAŞARAN BUNDUR Özgür BAŞKAN Cüneyt BAYKAL İdris BEDİRHANOĞLU Mehmet BERİLGEN Saadet Arzu BERİLGEN Niyazi Özgür BEZGİN Selçuk BİLDİK Senem BİLİR MAHÇİÇEK Bariş BİNİCİ Ahmet BİRİNCİ İlknur BOZBEY Zafer BOZKUŞ Burcu BURAK BAKIR Halil İbrahim BURGAN Yusuf CALAYIR Erdem CANBAY Zekai CELEP Cihan CENGİZ Halim CEYLAN Ömer CİVALEK Mustafa CÖMERT Ali Fırat ÇABALAR	Barlas Özden ÇAĞLAYAN Özgür ÇAKIR Melih ÇALAMAK Gülben ÇALIŞ Erkan ÇELEBİ Kutay ÇELEBİOĞLU Ahmet Ozan ÇELİK Oğuz Cem ÇELİK Osman Nuri ÇELİK Semet ÇELİK Hilmi Berk ÇELİKOĞLU Kemal Önder ÇETİN Mecit ÇETİN Reha ÇETINKAYA Gökhan ÇEVİKBİLEN Mesut ÇİMEN Safiye Fevza ÇİNİCİOĞLU Erdal ÇOKÇA Şevket ÇOKGÖR Atilla DAMCI Yakup DARAMA Kutlu DARILMAZ Cem DEMİR Uğur DEMİR Ender DEMİREL Mehmet Cüneyd DEMİREL Fatih DİKBAŞ Seyyit Ümit DİKMEN İrem DİKMEN TOKER Ali Ersin DİNÇER Ahmet Anıl DİNDAR Emrah DOĞAN Nurhan ECEMİŞ ZEREN Özgür EKİNCİOĞLU Alper ELÇİ Şebnem ELÇİ Murat Altuğ ERBERİK Saffet ERDOĞAN Esin ERGEN PEHLEVAN Aysen ERGİN Gökmen ERGÜN Ebru ERİŞ Esra Ece ESELLER BAYAT Tuğba ESKİŞAR TEFÇİ Burak FELEKOĞLU Okan FISTIKOĞLU Antonio FORMISANO Nuray GEDİK Abdullah GEDİKLİ Ergun GEDİZLİOĞLU Mohammad Ali GHORBANİ Konuralp GİRĞİN Zehra Canan GİRĞİN İlgin GÖKAŞAR Çağlar GÖKSU Burcu GÜLDÜR ERKAL Fazlı Erol GÜLER Hakan GÜLER İlgin GÜLER Zeynep GÜLERCE Taylan GÜNAY Necmettin GÜNDÜZ	Abdurrahman GÜNER Samet GÜNER Ülker GÜNER BACANLI Mehmet Şükrü GÜNEY Tuba GÜRBÜZ BÜYÜKKAYIKÇI Gürkan Emre GÜRCANLI Aslı Pelin GÜRGÜN İpek GÜRSEL DİNO Gürşans GÜVEN İŞİN Soner HALDENBİLEN Murat HAMDERİ Ufuk HANCILAR Ingo A. HANSEN Abdul HAYIR Nejan HUVAJ SARIHAN Metin HÜSEM Zeynep İŞİK Sabriye Banu İKİZLER Eren İNCİ Pınar İNCİ KOÇAK Erdal İRTEM Nihat KABAY Sedat KABDAŞLI Volkan KAHYA Mehmet Rifat KAHYAOĞLU Volkan KALPAKÇI Alper KANYILMAZ Murat KARACASU Tanay KARADEMİR Erhan KARAESMEN Ali KARAIPEKLİ Himmet KARAMAN Mustafa KARASHAHİN Zülküf KAYA İlker KAZAZ Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU Elçin KENTEL Mustafa Erol KESKİN Havvanur KILIÇ İsmail Emrah KILIÇ Sami And KILIÇ Fahriye KILINÇKALE Ufuk KIRBAŞ Veysel Şadan Özgür KIRCA Gökhan KIRKIL Niyazi Uğur KOÇKAL Önder KOÇYİĞİT Baha Vural KÖK Metek KÖKEN Fuat KÖKSAL Ali Ümran KÖMÜŞÇÜ Şerife Yurdagül KUMCU Akif KUTLU Semih KÜÇÜKARSLAN Abdullah KÜRKCÜ Hilmi LUŞ Kasım MERMERTAŞ Mehmet Murat MONKUL	Yetiş Şazi MURAT Elif OĞUZ Didem OKTAY Volkan OKUR Mehmet Hakkı OMURTAG Sema ONURLU Engin ORAKDÖĞEN Şeref ORUÇ Okan ÖNAL Akin ÖNALP Halil ÖNDER Aybike ÖNGEL Bihrat ÖNÖZ Ali Hakan ÖREN Bergüzar ÖZBAHÇEÇİ Ceyhan ÖZÇELİK İlker ÖZDEMİR Murat ÖZEN Pelin ÖZENER Abdullah Tolga ÖZER Eren Arman ÖZGÜVEN Hakkı Oral ÖZHAN Yener ÖZKAN M. Hulusi ÖZKUL Zeynep Huri ÖZKUL BİRGÖREN Beliz ÖZORHON ORAKÇAL Sadık ÖZTOPRAK Turan ÖZTURAN Baki ÖZTÜRK Hasan Tahsin ÖZTÜRK Mustafa ÖZUYMAL Tolga Yılmaz ÖZÜDOĞRU Polat ÖZYİĞİT Gülizar ÖZYURT TARAKÇIOĞLU Nilüfer ÖZYURT ZİHNİOĞLU Onur PEKCAN Bekir Yılmaz PEKMEZCİ Cengiz POLAT Şamil Şeref POLAT Gül POLAT TATAR Selim PUL Selçuk SAATÇI Selman SAĞLAM Mehmet SALTAN Altuğ SAYGILI Neslihan SEÇKİN Serdar SELAMET Alper SEZER Faiz Uddin Ahmed SHAIKH Osman SIVRIKAYA Serdar SOYÖZ Aleksandar STEVANOVIĆ Ayşe Filiz SUNAR Erol ŞADOĞLU Remzi ŞAHİN Yuşa ŞAHİN Mustafa ŞAHMARAN Nermin ŞARLAK Burak ŞENGÖZ Aynur ŞENSOY ŞORMAN Ali Arda ŞORMAN	Ali Ünal ŞORMAN Özcan TAN Ali Hamza TANRIKULU Kürşat TANRIOVEN Serhan TANYEL Taha TAŞKIRAN Gökmen TAYFUR İlker TEKİN Beytullah TEMEL Berrak TEYMUR H. Onur TEZCAN Mesut TİĞDEMİR Şahmat TİĞREK Vedat TOĞAN Nabi Kartal TOKER Nuray TOKYAY Ali TOPAL Cem TOPKAYA Selçuk TOPRAK Ahmet TORTUM Gökçe TÖNÜK Nursu TUNALIOĞLU Kağan TUNCAY Eda TURAN Gürsoy TURAN Kaan TÜRKER Cüneyt TÜZÜN Eren UÇKAN Latif Onur UĞUR Mehmet Fevzi UGURYOL Berna UNUTMAZ Volkan Emre UZ Deniz ÜLGEN Aslı ÜLKE KESKİN Cüneyt VATANSEVER Syed Tanvir WASTI Nazmiye YAHNİOĞLU Ahmet YAKUT Cem YALÇIN Aslı YALÇIN DASHYOOĞLU İsmail Özgür YAMAN A. Melih YANMAZ Mert Yücel YARDIMCI Ufuk YAZGAN Anıl YAZICI Halit YAZICI Kasım YENİGÜN İrem Zeynep YILDIRIM Mehmet YILDIRIMOĞLU Osman YILDIZ Çetin YILMAZ Fatih YILMAZ Koray Kamil YILMAZ M. Tuğrul YILMAZ Mehmet YILMAZ Murat YILMAZ Veysel YILMAZ Yüksel YILMAZ Fatih YONAR Recep YURTAL İsmail YÜCEL Ercan YÜKSEL Yeliz YÜKSELEN AKSOY Nabi YÜZER Ahmet Şahin ZAİMOĞLU
---	--	---	--	--

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Teknik Dergi

Cilt: 31 Sayı: 5 Eylül 2020

İÇİNDEKİLER

ENDER ARKUN

Kuraklık Riski Altındaki Havzalarda Gölet Haznelerinin Tasarımı:
Seyhan Havzası'nda Bir Uygulama 10189
Ali Demir KESKİNER, Mahmut ÇETİN, Mehmet ŞİMŞEK, Sabri AKIN

Akifer Parametrelerinin Optimizasyon Tabanlı Bir Eğri Çakıştırma Yaklaşımı
Kullanılarak Belirlenmesi 10211
M. Tamer AYVAZ, Gürhan GÜRARSLAN

Kanalizasyon Sistemlerinin Diferansiyel Evrim Algoritması Kullanılarak
Optimum Tasarımı 10229
Erhan TAN, Derya SADAK, M. Tamer AYVAZ

Mekanistik-Ampirik ve Geleneksel Beton Yol Tasarım Yöntemlerinin
Karşılaştırılması: Afyon-Emirdağ Deneme Kesimi 10251
Emin ŞENGÜN, Hande I. ÖZTÜRK, İ. Özgür YAMAN

TEKNİK NOT

Mimari Restorasyon ve Konservasyon Projelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği
Uygulamaları 10275
Mert UZUN, Deniz ÖZTÜRK, Gürkan Emre GÜRCANLI

ENDER ARKUN



23 Nisan 2020 günü aramızdan ayrılan değerli arkadaşımız ve meslektaşımız Ender Arkun'u sevgi ve saygıyla anıyoruz.

Ender Arkun, 1989 yılında Teknik Dergi'nin hayata geçirilmesini gerçekleştiren ekibin bir üyesi olarak yapmaya başladığı katkıları, aralıksız otuz yıl boyunca, Yayın Kurulu üyesi olarak sürdürmüştür. Ayrıca, Dergi'nin son üç yıldır benimsediği iki dilli yayın ilkesi süresince, İngilizce yazıların son düzeltmelerini gerçekleştirmekteydi.

Ender Arkun, babasının o sırada tabip olarak geçici görevle bulunduğu Afganistan'ın Kabul kentinde 23 Mart 1940 günü doğmuştur. Dört yaşındayken ailesiyle birlikte döndüğü İstanbul'da önce English High School'da ardından Robert College'da öğrenim görmüş, batı kültürünü bu sırada tanımış ve benimsemiştir. Daha sonra, inşaat mühendisliği eğitimi gördüğü Yıldız Teknik Üniversitesi'nden 1969'da mezun olmuştur.

Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) katıldığı 1971 yılına kadar E5 karayolu üzerindeki viyadüklerin tasarımı ve yapımı işini üstlenmiş olan bir İtalyan firmasında, tasarım mühendisi olarak görev yapmıştır. Ender Arkun'un TÜBİTAK'da çalıştığı süre boyunca (1971-1988 ve 2000-2004) üstlendiği başlıca görevler arasında, Yapı Araştırma Enstitüsü'nde Araştırmacılık ve Birim Başkan Vekilliği, Genel Sekreter Yardımcılığı ve İnşaat Teknolojileri Araştırma Grubu Yöneticiliği sayılabilir. Bu dönemde "Türkiye Bilim Politikası 1983-2003" belgesine de katkıda bulunmuştur. TÜBİTAK'daki iki görev dönemi arasında, on bir yıl süreyle özel sektörde çalışmış, Türkiye'nin önde gelen inşaat firmalarından birinde Genel Sekreterlik görevini yürütmüştür. TÜBİTAK'daki birinci görev dönemi sırasında, Türk Standardları Enstitüsü'ne de zaman ayıran Ender Arkun, İnşaat Hazırlık Grubu üyesi olarak görev yapmıştır.

2004 yılında TÜBİTAK'dan ayrılmasının ardından, Ender Arkun Türkiye Bilimler Akademisi'ne (TÜBA) katılmış, dört yıl süreyle Akademi Başkanı Danışmanlığı görevini yürütmüştür. Bu dönemde Prof. Bernard Lewis ile Princeton Üniversitesi'nde gerçekleştirdiği röportaj TÜBA'nın "Bilimi Aydınlatanlar" dizisinde önemli bir belgesel olarak yer almıştır.

Sünter Arkun ile yarım yüzyılı aşan mutlu bir evlilik sürdüren Ender Arkun'un bir kızı, bir oğlu ve bir torunu bulunmaktadır.

Ender Arkun, görgülü, iyi eğitilmiş, dengeli ve uygar bir kişi olarak bilinirdi. Hoşgörülü ve dostça tavır ve davranışları nedeniyle hem sosyal çevrelerde hem iş çevrelerinde sevilen, aranan bir kişiydi. Çalışkan oluşu ve güvenilir karakteri yanı sıra ince esprî anlayışı, onunla hem verimli hem keyifli iş birlikleri yapılabilmesini sağlardı.

Yayın Kurulu, Ender Arkun'un İMO Teknik Dergi'ye yaptığı paha biçilemez katkıları takdir ve teşekkürle dile getirirken, Arkun ailesine en içten başsağlığı dileklerini sunar.

Prof. Tuğrul Tankut
Yayın Kurulu Adına

Kuraklık Riski Altındaki Havzalarda Gölet Haznelerinin Tasarımı: Seyhan Havzası'nda Bir Uygulama

Ali Demir KESKİNER¹
Mahmut ÇETİN²
Mehmet ŞİMŞEK³
Sabri AKIN⁴

ÖZ

Gölet kapasitelerinin tasarımında, *M. Turc* yöntemi ile hesaplanan %50, %80 ve %90 olasılıklı havza su verimleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, kuraklığa eğilimli havzalarda gölet hazne tasarımları için uygun olasılık düzeyinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Meteoroloji gözlem istasyonlarının yıllık toplam yağış serilerine frekans analizi uygulanarak her istasyon için %50, %80 ve %90 olasılıklı beklenen yağışlar elde edilmiştir. İstasyonlara ait %50 olasılıklı yağış değerleri ile *Normalin Yüzdesi İndeksi (NYİ)* kuraklık sınıflarına karşılık gelen %65, %75 ve %85 kuraklık eşik yağış değerleri hesaplanmıştır. Bu değerler, *Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS)* ortamında *Ordinary Cokriging* yöntemi ile haritalanarak *M. Turc* yöntemine göre farklı olasılıklarda ve eşik değerlerde yüzey akış haritaları oluşturulmuştur. Yüzey(sel) akışların, hipsometrik eğrileri çizilmiştir. %80 ve %90 olasılıkla beklenen akımların hipsometrik eğrileri "*Hafif*" ve "*Orta Şiddette*" kuraklık sınıfına karşılık gelen eşik yağış akımlarını, %50 olasılıklı akımlar ise "*Normal ve Üzeri-Risk Yok*" kuraklık sınıfı eşik üstü akımları temsil etmiştir. Seyhan Havzası'nda gölet hazne tasarımlarında, %50 olasılıklı havza su verimlerinin kullanılmasında uygun bulunmamıştır. Maliyet azaltımı için, %80 veya %90 olasılıklı yüzey akışların kullanılması önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Normalin Yüzdesi İndeksi (NYİ), kuraklık, CBS, *M. Turc* yüzey akışı.

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 31 Aralık 2018 günü ulaşmıştır. 23 Aralık 2019 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 30 Kasım 2020 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://doi.org/10.18400/tekderg.505584>

1 Harran Üniversitesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Şanlıurfa - adkeskiner@harran.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-7930-9363>

2 Çukurova Üniversitesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Adana - mcet64@cu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-5751-0958>

3 Harran Üniversitesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Şanlıurfa- mehmetstimsek@harran.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-9552-1743>

4 Harran Üniversitesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, Şanlıurfa - sabriakin@harran.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-9196-3157>

ABSTRACT

Design of Small Earthen Dam Reservoirs Lying in Drought-Prone Areas: An Application to the Seyhan River Basin

Catchment water yields, calculated by *M. Turc* technique, having probability levels of 50%, 80% and 90% are used for the design of reservoir capacity of small earthen dams. This study aims to figure out the suitable probability levels to be used for the design of reservoirs of small earthen dams lying in drought-prone areas. After having performed frequency analysis technique on the yearly total precipitation series of each meteorological station, precipitations values with 50%, 80% and 90% probability levels were estimated for each meteorological station. By using precipitations at 50% probability level, precipitation threshold values corresponding to Percent of Normal Precipitation Index (*PNI*) drought categories of 65%, 75% and 85% were calculated for each station. These precipitation values were mapped in *Geographical Information Systems (GIS)* media by employing *Ordinary Cokriging* interpolation technique; then, runoff maps of *M. Turc* method were generated accordingly. Hypsometric curves of runoff values were developed for each runoff case. It was determined that hypsometric curves for 80% and 90% probability levels overlapped quite well with the curves of *PNI* drought category of "Mild Drought" and "Moderate Drought", respectively; and hypsometric curve of *M. Turc* runoff values with 50% probability level represented the curve relating to the runoff threshold values for *PNI* drought category of "Normal and Over, i.e. No Risk". Consequently, the use of *M. Turc* runoff values with 50% probability level was not found suitable for the capacity design of small earthen dams lying in the Seyhan River Basin prone to drought risk. Hence, it was suggested that runoff calculation for the design of reservoirs of small earthen dams should be done by using precipitation data having 80% or 90% probability levels in order to reduce construction costs.

Keywords: Percent of Normal Precipitation Index (PNI), drought, GIS, M. Turc runoff.

1. GİRİŞ

Su; biyolojik hayatın devamlılığı bakımından en önemli gereksinimdir [1]. Dünya nüfusunun 2/3'ünün 2025 yılına kadar su kıtlığı çeken bölgelerde yaşayacağı öngörülmektedir [2-5]. Devlet Su İşleri (DSİ) [6] tarafından, kişi başına su miktarı 10 000 m³ yıl⁻¹ olan ülkeler su potansiyeli bakımından zengin ülke olarak kabul edilmektedir. Türkiye'de ise kişi başına düşen su miktarı 1 430 m³ yıl⁻¹ 'dır [7, 8]. Türkiye nüfusunun 2040'lı yıllarda 100 milyona ulaşacağı dikkate alındığında; kişi başına düşen kullanılabilir yaklaşık su miktarının 1120 m³ yıl⁻¹ ile "su fakiri" bir ülke olacağı aşikardır.

Kuraklık; akış ve yağışların doğal olarak azalması nedeniyle su yönetimi ve canlılığın devamı açısından gerekli suyun sağlanamadığı zaman periyodudur [9]. Canlıların ihtiyaç duyduğu suyun miktarındaki azalmaya bağlı olarak ortaya çıkan kuraklık çeşitleri sırasıyla meteorolojik, tarımsal, hidrolojik ve sosyo-ekonomik kuraklık olarak adlandırılırlar. İklim değişikliğinin sıcak gün ve sıcak hava dalgalarının süre ve frekansını artırması, kuraklık şiddetinin artmasına neden olabilmektedir [10]. Zira, son on yıldır diğer doğal afetlere nazaran kuraklığın tekrarlanma sayısının arttığı görülmektedir [1]. Kuzey Afrika, Hindistan'ın bir kısmı, Kuzey Çin, Orta Doğu, Orta Asya, Güney Batı Avrupa, Avustralya, Kanada ve Batı Amerika'da kurak ve yarı kurak bölgelerde yaşayan nüfusun %40'ı periyodik

olarak kuraklıkla yüz yüzedir. Amerika Birleşik Devletlerinde yıllık ortalama 6-8 milyar \$ kuraklık nedeniyle ekonomik zarar oluşmaktadır [11, 12]. Avrupa’da, kuraklığın ekonomiye verdiği zarar son 30 yılda 116 milyar \$ dolayındadır. Ülkemizde ise; 2007’de meydana gelen kuraklığın verdiği zarar 2.5 milyar \$’dır [13]. Alınacak önlemlerle kuraklığın vereceği zararları azaltılabilmek mümkündür. Yağışlar sonucu oluşan yüzey(sel) akış sularının depolandığı su hasadı tekniklerinin uygulamaya konulması, kuraklık kaynaklı zararları karşı önleyici tedbirlerden sadece birisidir [14]. Göletler bir su hasadı tekniği olup; kış ve bahar aylarında boşa giden yüzey akış sularını depolayan, barajlara göre inşaat maliyeti daha az olan, genelde tarımsal ve hayvan içme suyu amaçlı su depolama tesisleridir [15-19]. Kişi başına düşen su miktarındaki azalmalar ve yakın gelecekte beklenen olası kuraklık riski, yarı kurak iklim kuşağında yer alan ülkemizdeki su depolama tesislerinin sayısının artırılması gerektiğini göstermektedir [20, 21]. Ayrıca, göletlerin rezervuar kapasitesinin yıl içindeki doluluk oranı dikkate alınarak kuraklık ile ilgili öngörülerde bulunmak mümkündür [22]. Ön etüd raporlarına göre yurdumuzda on bin göletin yapılabileceği belirlenmiştir [23]. Ancak, göletler çoğunlukla akım gözlemleri olmayan kuru dereler üzerine tesis edilmektedir [24]. Bu nedenle, ülkemizde DSİ ve İl Özel İdareler tarafından gölet kapasitesinin saptanmasında en önemli parametre olan yıllık toplam akışın hesaplanmasında en çok *M. Turc* empirik yöntemi kullanılmaktadır. Hesaplamalarda havzayı temsil ettiği varsayılan istasyonun %50, %80 ve %90 olasılıkla beklenen alansal yıllık toplam yağış ve yıllık ortalama sıcaklık serileri kullanılarak gölet rezervuar tasarımı yapılmaktadır [18, 25, 26]. Akım gözlemi olmayan dereler üzerinde planlanan göletlerin rezervuar hacminin hangi olasılık düzeyine göre tasarlanacağı ise, genellikle mühendislerin tecrübesine göre belirlenmektedir. Üstelik, bu olasılık değerlerine göre hesaplanan havza su verimlerinde kuraklık da dikkate alınmamaktadır. Oysa, tüm bölgelerde ve mevsimlerde oluşabilen meteorolojik, tarımsal ve hidrolojik kuraklık; 1970’lerin başından beri ülkemizde daha sık ve şiddetli [27-29] oluşabilmektedir. Türkiye’nin dünya üzerinde kuraklığın sürekli tehdit oluşturduğu yarı kurak bir kuşakta yer alması [30, 31], gölet tasarımına yönelik havza su verimi hesaplamalarında kuraklığın dikkate alınması gerekliliğini sorgulanır hale getirmiştir. Çünkü, havza su veriminin fazla hesaplanması gölet haznesinin boyutlarının gereksiz büyümesine neden olabilmektedir.

Seyhan Havzası’nda iklim değişikliğinin; kar depolaması, yüzey ve yer altı su potansiyelinde %30’a varan azalışlara neden olacağı tahmin edilmektedir [32, 33]. Havzada, beklenen yağışlarda %30-35 arasında bir azalma ve 2070 yılında hava sıcaklığının 2-3.5 °C arasında artacağı da öngörüler arasındadır [34]. Ayrıca, Seyhan Havzası’nda iki farklı küresel iklim modeli kullanılarak hesaplanan yıllık su akımının tüm havzada on yıllık periyotta %20 ile %30 arasında azalacağı ortaya konulmuştur [35]. Bir çok araştırma sonucunda; Seyhan Havzası’nda daha şiddetli kurak dönemlerin görülme olasılığının yüksek ve havzanın kuraklığa eğilimli olduğu vurgulanmıştır [36-41]. Dolayısıyla, Seyhan Havzası’nda akım gözlemi olmayan dereler üzerinde tasarlanacak göletlerin, ekonomik maliyet bakımından hangi olasılık düzeyine göre dizayn edilmesi proje mühendisinin çözmek zorunda olduğu problemlerden bir tanesidir. Bir örnek verilecek olursa; Osmaniye İli Bahçe İlçesi Yaylalık Göleti projesinde; 1.5 km²’lik havzadan %50, %80 ve %90 olasılıkla beklenen alansal yıllık toplam yüzey akış miktarları *M. Turc* yöntemiyle sayıldığı sıraya göre; 674311 m³ yıl⁻¹, 463930 m³ yıl⁻¹ ve 375561 m³ yıl⁻¹ olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere %50 ve %90 olasılıkla beklenen yıllık toplam havza su verimleri arasında yaklaşık 2 katına yakın fark vardır. Proje tasarımı için seçilen olasılık değeri gölet gövde yüksekliğini, gövde dolgu

hacmini, işçilik giderlerini dolayısıyla da maliyeti doğrudan etkilemektedir. DSİ tarafından 2015 yılında tamamlanan 1000 günde 1001 gölet (Göl-Su) projesinde ortalama büyük ölçekli bir sulama göletinin maliyeti 2018 yılı itibarıyla 1 090 153 \$'dır [42]. Hatay ve Osmaniye İl Özel İdareleri tarafından yapılan orta ölçekli sulama göletlerinin ortalama maliyeti ise yaklaşık 729 439 \$'dır. Gölet tasarımında maliyeti azaltabilmek için kurak dönemlerin dikkate alınması, ekonomik açıdan büyük tasarruf sağlayabilecektir. Bu nedenle; kuraklık riskini dikkate alarak %50, %80 ve %90 olasılıklı havza su verimi miktarlarından optimal gövde yüksekliğini verecek olasılık düzeylerinin ne olması gerektiğinin belirlenmesi büyük önem ve ihtiyaç arz etmektedir.

Bu çalışmada:

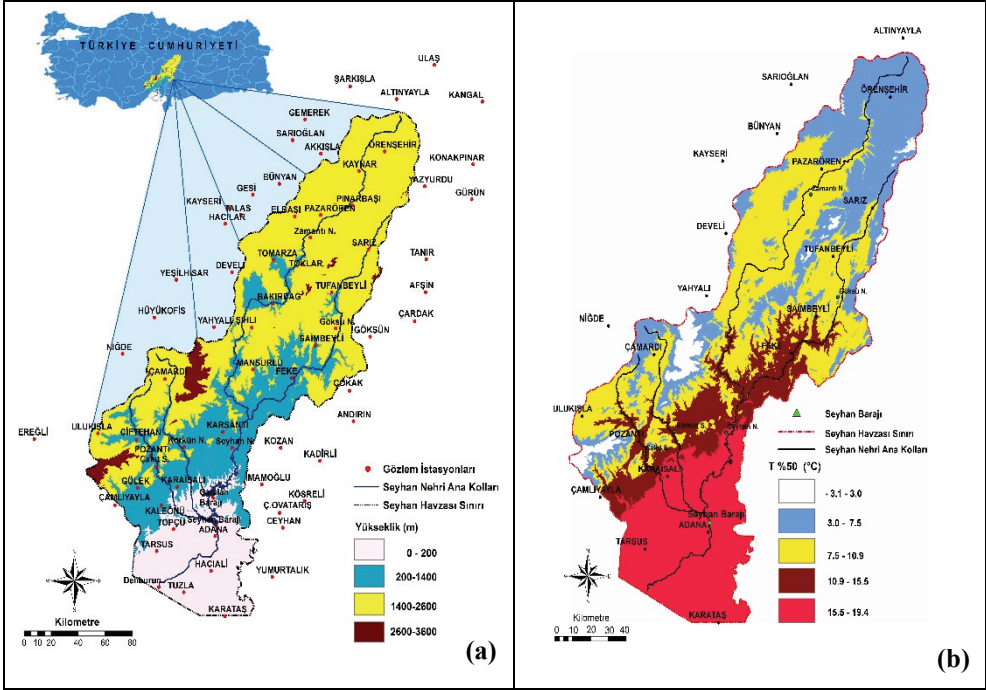
1. Meteorolojik kuraklığın izlenebildiği, yalnızca yağış verisine ihtiyaç duyan *Normalin Yüzdesi Kuraklık İndeksi (NYI)* yöntemi kullanılarak Seyhan Havzası'nda kuraklık sınıflaması yapılması; kuraklık riski olmayan “normal ve üzeri”, izlemeye başlanması gereken “hafif kurak”, uyarı “orta şiddette kurak” ve acil durumu ifade eden “şiddetli kurak” kategorileri için “kuraklık eşik yağış” değerlerinin saptanması; $NYI=65$, $NYI=75$ ve $NYI=85$ “kuraklık eşik yağış” esas alınarak istasyon bazında *M. Turc* yöntemiyle $Q_{NYI=65}$, $Q_{NYI=75}$ ve $Q_{NYI=85}$ eşik yüzey akış haritalarının geliştirilmesi,
2. Seyhan Havzası'nda istasyon bazında hesaplanan %50, %80 ve %90 olasılıkla beklenen toplam yağış değerleri kullanılarak Q_{50} , Q_{80} ve Q_{90} olasılıklı *M. Turc* yüzey akış haritalarının oluşturulması,
3. $Q_{NYI=65}$, $Q_{NYI=75}$ ve $Q_{NYI=85}$ eşik yüzey akış haritaları ile Q_{50} , Q_{80} ve Q_{90} olasılıklı yüzey akış haritalarına ilişkin “yüzey akış hipsometrik eğrileri”nin geliştirilmesi ve bu eğrilerin karşılaştırılması; karşılaştırma sonucuna göre, akım gözlemi olmayan kuraklığa eğilimli bölgelerde tasarlanacak göletlerin *havza su verimi* hesabında kullanılacak olasılık düzeyinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Çalışma Alanı, Kullanılan Veriler ve Verilerin Kaynağı

Bu araştırma; Türkiye'nin güneyinde yer alan Seyhan Havzası'nda yapılmıştır. Havza, 21 470.3 km² [43] genişliğinde ve kuzey-güney doğrultusundadır (Şekil 1a).

Araştırmada, Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne ait Seyhan Havzası içinde ve havza sınırına yakın kesimlerde yer alan, Şekil 1a'da gösterilen 63 adet meteoroloji gözlem istasyonunun uzun yıllık (1950-2006) toplam yağış serileri, havzanın sayısal yükseklik verileri ve %50 olasılıklı sıcaklık değerleri kullanılmıştır (Şekil 1b). Seyhan Havzasına ait Sayısal Yükseklik Modeli (*SYM*) haritası, 1/250 000 ölçekli topoğrafik haritalar sayısallaştırılarak [44] 250 m × 250 m çözünürlükte üretilmiş (Şekil 1a) ve *CBS* ortamında yapılan hesaplamalarda altlık olarak kullanılmıştır. Yüzey akış hesaplamalarında gereksinim duyulan %50 olasılıklı ortalama sıcaklık (T_{50}) verileri, 250 m × 250 m çözünürlükte Keskiner ve ark. [45] tarafından üretilen ve Şekil 1b'de verilen raster tabanlı haritadan elde edilmiştir.



Şekil 1 - a) Seyhan Havzası'nın konumu, b) %50 olasılıklı ortalama sıcaklık haritası

2.2. Yöntem

2.2.1. Regresyon Analizi

Araştırmada kullanılan yağış istasyonlarının yıllık toplam yağış (Y) serisinde yer alan eksik veriler, Eşitlik 1'deki Doğrusal, Kuadratik ve Kübik regresyon modellerinden biri kullanılarak Ryan ve Cryer [46] 'e göre tamamlanmıştır. Verisi tamamlanacak istasyonla en yüksek korelasyonu olan komşu istasyon; konum, istasyon yüksekliği, gözlem sürelerinin uygunluğu ve ara mesafeler dikkate alınarak belirlenmiştir. En yüksek korelasyona sahip iki istasyon kullanılarak, en uygun regresyon modeline, determinasyon katsayısı (R^2) esas alınarak karar verilmiştir.

$$\left. \begin{aligned} Y &= b_0 + b_1X + e \\ Y &= b_0 + b_1X + b_2X^2 + e \\ Y &= b_0 + b_1X + b_2X^2 + b_3X^3 + e \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Burada: Y , X , b_i ve e sırasıyla bağımlı ve bağımsız değişkeni; regresyon katsayılarını ve hata terimini göstermektedir.

2.2.2. Frekans Analizi

Araştırma alanındaki her istasyonun uzun yıllık toplam yağış serisinin frekans analizleri BestFit [47] ortamında yapılmıştır. Olasılık dağılımlarının uygunluk testleri, %5 güven düzeyinde Kolmogorov-Smirnov testi ile gerçekleştirilmiştir [48]. Belirlenen dağılımlara ilişkin “frekans faktör eşitliği” [49] kullanılmak suretiyle *M.Turc* yönteminde gereksinim duyulan %50, %80 ve %90 olasılıklı yağış değerleri her istasyon için ayrı ayrı kestirilmiştir (Eşitlik 2).

$$X_{p\%} = \bar{X} + K_{p\%}S \quad (2)$$

Burada: S , standart sapmayı; \bar{X} , frekans analizine tabi tutulan veri setinin ortalamasını; $X_{p\%}$, incelenen değişkenin belirlenen olasılık düzeyinde ($P_{\%}$) beklenen değerini ve $K_{p\%}$, frekans faktörünü göstermektedir.

2.2.3. Normalin Yüzdesi İndeksi (NYİ)

Şen [50] tarafından belirtildiği gibi, *NYİ* kuraklık indeksi; belirlenen zaman dilimi içinde gerçekleşen yağış miktarının ortalamasına bölünmesiyle hesaplanır (Eşitlik 3). *NYİ*: aylık, mevsimlik ya da yıllık periyotlarda gerçekleştirilen meteorolojik ve tarımsal kuraklıkla ilgili çalışmalarda kullanılmaktadır [51]. Normal dağılım göstermeyen çarpık dağılımlarla ifade edilen yağış serilerinin ortalamalarının proje kriteri olarak kullanılması, sakıncalı olup [50, 52, 53], yöntemin uygulanmasını kısıtlamaktadır. Bu nedenle; yıllık toplam yağış serilerinin frekans analizi sonucu bulunan %50 olasılıkla beklenen yağış değerleri, *NYİ* hesaplamalarında ortalama yağış yerine kullanılmaktadır [52]. *NYİ* yöntemine göre kuraklık sınıflaması, Çizelge 1’deki eşik değerlere (*NYİ*=%85, *NYİ*=%75 ve *NYİ*=%65) göre yapılmıştır. Kuraklık sınıflarına karşılık gelen eşik yağış değerleri ise, istasyonların %50 olasılıklı yağış değerlerinin Eşitlik 3’te kullanılmasıyla kestirilmiştir. Çizelge 1’de gösterilen *NYİ* değerleri; Ocak-Aralık periyodunu temsil eden 12 aylık zaman dilimi içindir.

$$NYI_{iy} = \left(\frac{P_{iy}}{P_{iort}} \right) 100 \quad (3)$$

Bu eşitlikte: i , gözlem istasyonunu; y , Çizelge 1’de verilen kuraklık kategorilerini ($y=1$ “Risk Yok”, $y=2$ “Hafif Kurak”, $y=3$ “Uyarı”, $y=4$ “Acil Durum”); NYI_{iy} , i istasyonu için y kuraklık kategorisini; P_{iy} , i istasyonunda y kuraklık kategorisine karşılık yıllık toplam yağış miktarını (mm); P_{iort} , i istasyonunda %50 olasılıkla beklenen yıllık toplam yağışı (mm) temsil etmekte olup, aritmetik ortalamanın yerine ikame edilmiştir.

Çizelge 1 - *NYİ* yöntemi kuraklık sınıflandırması [54]

Periyot	Normal ve Üzeri (Risk Yok)	Hafif Kurak (İzlemeye Başla)	Orta Şiddette Kurak (Uyarı)	Şiddetli Kurak (Acil Durum)
12	$NYI > \%85$	$\%75 < NYI \leq \%85$	$\%65 \leq NYI \leq \%75$	$NYI < \%65$

2.2.4. Jeostatistik Analiz

Ordinary Cokriging enterpolasyon yöntemi yardımıyla gözlemi olmayan bir noktanın olası değerinin kestiriminde, gözlem değerlerinin deneysel Covariogram yapısına uyan teorik Covariaogram modeli ve bu modelin parametreleri ile Cokriging tahmin parametreleri kullanılmaktadır. Hidroloji alanındaki çalışmalarda, gözlem alanı içerisindeki uzaysal bağımlılık yapısı genellikle *Küresel*, *Doğrusal* ve *Gauss* tip yarıvariogram modelleri ile temsil edilebilmektedir [55-58]. Yöntem ile tahmin yapılırken, gözlenen değerlerin yanı sıra yardımcı bir değişkenden daha faydalanılmaktadır [44]. Bu çalışmada, olasılıklı yağış değerlerinin haritalanmasında, Seyhan Havzası *SYM* görüntüsü hesaplamalara yardımcı değişken olarak dahil edilmiştir. Bu amaçla, Covariogram modeli ve parametreleri [59, 60] belirlenmiş; Cokriging tahminleri yapılmıştır. Covariogram ve Cokriging tahmin tekniklerine ilişkin matematiksel eşitlikler, Goovaerts [61]'de ayrıntılı olarak bulunabilir.

2.2.5. M. Turc Yöntemi

M. Turc, dünyanın bütün iklimlerinde ve 254 havza üzerinde yaptığı gözlemlere dayanarak bulunduğu akım açığı ve yüzey akışı (havza su verimini); Eşitlik 4'te verilen denklem takımı ile ifade etmiştir [24, 62]. CBS ortamında, *M. Turc* yöntemi kullanılarak amaçlanan yüzey akış haritalarını elde etmek için *ArcGIS* yazılımının *Map Algebra* modülü kullanılmıştır. Bu modül yardımıyla; $NYI=65$, $NYI=75$ ve $NYI=85$ kuraklık sınıflaması eşik yağış değerleri baz alınarak istasyon bazında *M. Turc* yöntemiyle $Q_{NYI=65}$, $Q_{NYI=75}$ ve $Q_{NYI=85}$ eşik yüzey akış haritaları elde edilmiştir. Ayrıca, Seyhan Havzası'nın istasyon bazında hesaplanan %50, %80 ve %90 olasılıkla beklenen toplam yağış değerleri kullanılmış; Q_{50} , Q_{80} ve Q_{90} olasılıklı *M. Turc* yüzey akış haritaları oluşturulmuştur. Yüzey akış haritalarının oluşturulabilmesi için havzadaki istasyonların ortalama sıcaklık değerleri yerine Şekil 1b'de verilen Seyhan Havzası'nın %50 olasılıkla beklenen ortalama sıcaklık (°C) haritasından faydalanılmıştır [45].

$$\left. \begin{aligned} D &= \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}} \\ L &= A + 25T + 0.05T^3, \quad Q = P - D \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Burada;

L: Sıcaklık (*T*) ve havzaya özgü *A* katsayısının bir fonksiyonu olup, Seyhan Havzası için *A* katsayısı 6 alınmaktadır [24],

D: Akım Açığı-Havzada Tutulan Su-Havzadaki Kayıp; *NYI* yöntemi %65, %75, %85 göstergesi olan eşik akım açığı ve %50, %80, %90 olasılıkla beklenen akım açığı değerleri (mm),

Q: Yüzey Akış-Havza Su Verimi; *NYI* yöntemi %65, %75, %85 göstergesi olan eşik yüzey akış ve %50, %80, %90 olasılıkla beklenen yüzey akış değerleri (mm),

P: Havzada *NYI* yöntemi %65, %75, %85 göstergesi olan eşik yağış ve %50, %80, %90 olasılıkla beklenen yıllık toplam yağış değerleri (mm),

T: Havzada %50 olasılıkla beklenen yıllık ortalama sıcaklıktır (°C).

2.2.6. Yüzey Akış Hipsometrik Eğrilerinin Grafikselsel Analizi

Yüzey akış hipsometrik eğrileri, yükseklik-alan dağılımında olduğu gibi [49], yüzey akış alan dağılımını tasvir etmektedir. Bu eğriler; yüzey akış ve yer altı suyu akışı ile ilgili çalışmalarda uyarlanabilmektedir [63]. Bu çalışmada, *M. Turc* yöntemiyle oluşturulan $Q_{NYI=\%65}$, $Q_{NYI=\%75}$, $Q_{NYI=\%85}$ eşik yüzey akış haritaları ile $Q_{\%50}$, $Q_{\%80}$, $Q_{\%90}$ olasılıkla beklenen yüzey akış haritalarının 250 m x 250 m çözünürlükteki raster formatındaki haritaları yüzey akış hipsometrik eğrilerinin geliştirilmesinde kullanılmıştır. Hipsometrik eğrilerin geliştirilmesinde, havzadaki piksellerdeki yüzey akış değerleri ve bu piksellerin alanlarından yararlanılmıştır.

3. ARAŞTIRMA BULGULARI

3.1. Regresyon Analizi Sonuçları

Havza içerisinde ve çevresinde yer alan 63 adet istasyondan kayıt uzunluğu 15 yıldan az olan istasyonlar tespit edilmiştir. Bu istasyonların eksik yıllık yağış verileri regresyon yöntemi ile komşu istasyon verileri kullanılarak serileri 15 yıla tamamlanmıştır. Örenşehir istasyonu, önemli bir konumda bulunduğundan, bu istasyonun 12 yıllık verisi tamamlanmıştır. Diğer istasyonların tamamlanan yıl sayısı 7 yıl ve daha küçük olup, 18 istasyon dikkate alındığında ortalama 4.8 yıllık veri tamamlanmıştır (Çizelge 2).

Çizelge 2 - Yıllık toplam yağış gözlem serilerindeki eksik verilerin tamamlanması işleminde regresyon model denkleminde kullanılan istasyonlar

No	Serisi Uzatılan Bağımlı Değişken Olarak Kullanılan İstasyonlar (Y)	Bağımsız Değişken Olarak Kullanılan İstasyonlar (X)	Mevcut Gözlem Süresi (Yıl)	Tamamlanan Süre (Yıl)	Model Determinasyon Katsayısı (%R ²)	Kullanılan Model (Eşitlik 1)
1	Altınyayla	Şarkışla	8	7	72.5	Kübik
2	Andırın	Feke	12	3	70.3	Doğrusal
3	Bünyan	Kayseri	13	2	61.6	Doğrusal
4	Ç.Ovatariş	Ceyhan	11	4	60.6	Kübik
5	Çamlıyayla	Karaisalı	10	5	93.8	Kuadratik
6	Çardak	Göksün	8	7	82.4	Kübik
7	Elbaşı	Kayseri	11	4	99.4	Kuadratik
8	Gesi	Bünyan	11	4	82.1	Doğrusal
9	Hacıali	Adana	14	1	84.5	Kuadratik
10	Hacılar	Kayseri	9	6	76.6	Doğrusal
11	Kadirli	Kozan	9	6	51.2	Doğrusal

Çizelge 2 - Yıllık toplam yağış gözlem serilerindeki eksik verilerin tamamlanması işleminde regresyon model denkleminde kullanılan istasyonlar (devam)

No	Serisi Uzatılan Bağımlı Değişken Olarak Kullanılan İstasyonlar (Y)	Bağımsız Değişken Olarak Kullanılan İstasyonlar (X)	Mevcut Gözlem Süresi (Yıl)	Tamamlanan Süre (Yıl)	Model Determinasyon Katsayısı (%R ²)	Kullanılan Model (Eşitlik 1)
12	Pazarören	Kayseri	9	6	87.2	Doğrusal
13	Örenşehir	Bünyan	3	12	99.5	Doğrusal
14	Saimbeyli	Tufanbeyli	10	5	91.2	Kuadratik
15	Tarsus	Adana	13	2	74.2	Doğrusal
16	Tuzla	Adana	11	4	84.2	Kuadratik
17	Yahyalı	Niğde	13	2	91.1	Kübik
18	Yeşilhisar	Develi	8	7	92.6	Kuadratik

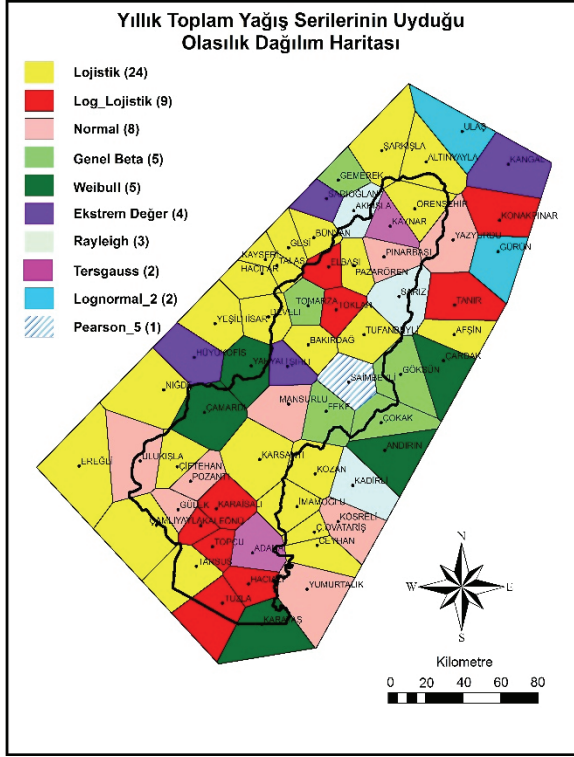
Serilerin tamamlanmasında ilişkilendirilecek istasyonların öncelikle Pearson korelasyon katsayısına bakılmıştır. Pearson korelasyon katsayısı dikkate alınarak, $r \geq 0.5$ koşulunu sağlayan istasyonların doğrusal, kuadratik ve kübik matematiksel ilişki modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modellerden standart sapması en küçük, determinasyon katsayısı (R^2) en büyük olan model, eksik serilerin uzatılmasında kullanılmıştır. Standart sapmaları bir birine yakın olan farklı modellerin olması durumunda, daha az parametre içeren modeller tercih edilmiştir. Bunun sebebi, doğrusal olmayan ilişkilerde parametre sayısının artması nedeniyle verilerdeki küçük değişimler, diğer istasyonun hesaplanan veri değerlerinde büyük farklılıklara neden olabilmektedir. Diğer bir ifadeyle; iyi bir ilişki modeli oluşturmak için benzer olasılık dağılımlarına sahip olan istasyonlar ve daha az parametrelili modeller kullanılarak daha gerçekçi tahminler yapılabilmektedir [64].

3.2. Frekans Analizi Sonuçları

Seyhan Havza içerisinde ve çevresinde yer alan 63 adet istasyonun frekans analizi yapılmıştır. Araştırmada kullanılan meteoroloji gözlem istasyonlarının etki alanları Thiessen poligonları ile belirlenmiş ve yıllık toplam yağış serilerinin uyduğu olasılık dağılımları Şekil 2'de verilmiştir.

Frekans analizi sonucunda yıllık toplam yağış serileri 10 farklı olasılık dağılımı ile temsil edilmiştir. İstasyonların; 24'ü Lojistik, 9'u Log-Lojistik, 8'i Normal, 5'i Genel Beta, 5'i Weibull, 4'ü Ekstrem Değer, 3'ü Rayleigh, 2'si Tersgauss, 2'si Lognormal_2 ve 1'i Pearson_5 dağılımları ile ifade edilmiştir. Bu sonuçlara göre; Seyhan Havzası içinde ve dışında bulunan 63 adet meteoroloji gözlem istasyonu arasında %38 oranıyla Lojistik dağılımın hakim olduğu görülmüştür. Seyhan Havzası'nın güneybatı-batı ve kuzeybatısında yer alan Tarsus, Çamlıyayla, Ereğli, Niğde, Hacılar, Bünyan vd. istasyonlar Lojistik dağılımla; düz ve düze yakın olan topoğrafyada yer alan istasyonlar (Tuzla, Hacıali, Topçu,

Kaleönü ve Karaisalı) ise ağırlıklı olarak Log-Lojistik dağılımla temsil edilmiştir. Buna karşın, yağış ve yüzey akışların en çok gözlemlendiği Gülek, Pozanti, Karsanti, Mansurlu, Feke, Saimbeyli, Şihli, Tufanbeyli, Sarız, Göksün, Çokak vd. istasyonların bulunduğu “Orta Bölge” 7 farklı olasılık dağılımı ile ifade edilmiştir. Bu durum; derin vadilerin bulunduğu “Orta Bölge”deki topoğrafyanın yağış dağılımlarının çeşitlenmesine neden olduğuna dair hipotezi güçlendirmiştir. Frekans analizi sonucunda belirlenen olasılık dağılım modellerinden elde edilen %50, %80 ve %90 olasılıkla beklenen yıllık toplam yağış değerleri Çizelge 3’te verilmiştir.



Şekil 2 - Yıllık toplam yağış serilerinin uyduğu olasılık dağılım modelleri

Çizelge 3 - İstasyonlarda %50, %80 ve %90 olasılıkla beklenen yağış değerleri

No	İstasyon	Yağış (P, mm)			No	İstasyon	Yağış (P, mm)		
		%50	%80	%90			%50	%80	%90
1	Kangal	395	333	306	33	Şihli	395	345	324
2	Konakpınar	390	294	257	34	Yahyalı	459	377	331
3	Yazyurdu	414	332	289	35	Hüyükofis	331	249	215
4	Ulaş	352	294	273	36	Niğde	332	289	264
5	Altunyayla	319	285	266	37	Çamardı	370	290	249

Çizelge 3 - İstasyonlarda %50, %80 ve %90 olasılıkla beklenen yağış değerleri (devam)

No	İstasyon	Yağış (P, mm)			No	İstasyon	Yağış (P, mm)		
		%50	%80	%90			%50	%80	%90
6	Şarkışla	322	269	239	38	Mansurlu	971	775	673
7	Gemerek	391	342	321	39	Feke	934	676	642
8	Sarıoğlan	378	329	307	40	Saimbeyli	833	707	659
9	Akkışla	420	370	349	41	Çokak	1472	1041	964
10	Kaynar	333	296	277	42	Andırın	1399	1151	1043
11	Örenşehir	311	240	199	43	Karsantı	1035	805	670
12	Gürün	305	255	230	44	Çiftelhan	493	345	258
13	Pınarbaşı	410	339	302	45	Ulukışla	321	268	240
14	Pazarören	391	347	322	46	Ereğli	293	249	222
15	Elbaşı	381	363	354	47	Pozantı	701	517	420
16	Bünyan	463	400	364	48	Gülek	868	667	563
17	Gesi	407	352	320	49	Çamlıyayla	1020	905	838
18	Talas	369	309	273	50	Karaisalı	898	725	632
19	Kayseri	394	332	296	51	İmamoğlu	675	548	474
20	Hacılar	513	449	412	52	Kösreli	661	539	475
21	Yeşilhisar	274	241	222	53	Ç.Ovatariş	806	685	615
22	Develi	368	318	289	54	Ceyhan	709	586	514
23	Tomarza	394	340	316	55	Yumurtalık	825	649	557
24	Toklar	381	331	310	56	Hacıali	612	530	499
25	Adana	623	509	468	57	Karataş	765	584	501
26	Sarız	507	435	405	58	Tuzla	634	501	447
27	Tanır	303	245	221	59	Tarsus	595	484	419
28	Afşin	436	371	333	60	Kozan	838	706	629
29	Çardak	562	493	456	61	Kadirli	709	562	501
30	Göksün	614	489	440	62	Kaleönü	841	750	708
31	Tufanbeyli	553	467	417	63	Topçu	646	527	467
32	Bakırdağ	345	299	272					

3.3. Normalin Yüzdesi İndeksi (NYİ) Kuraklık Analizi Sonuçları

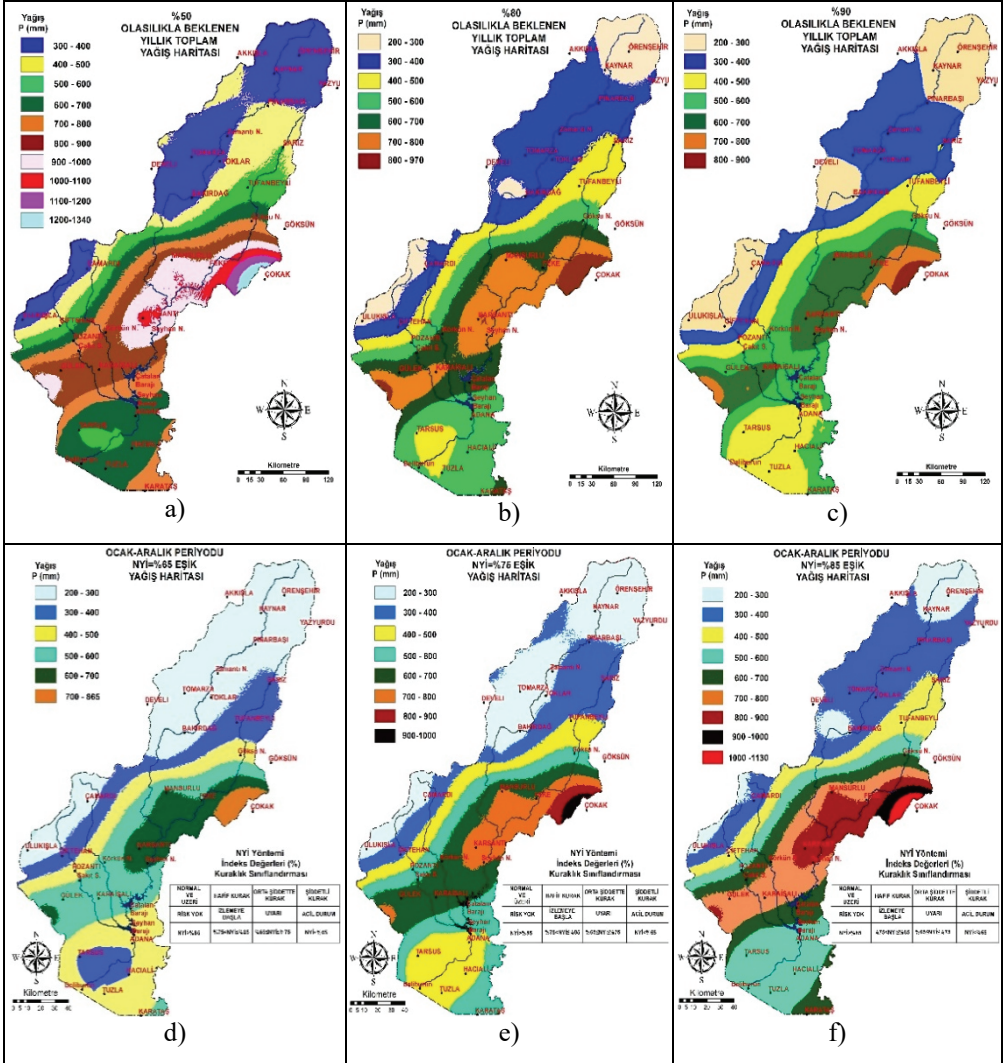
Frekans analizi sonucu bulunan yıllık toplam yağış serilerinin %50 olasılıkla beklenen toplam yağış değerleri, Eşitlik 3'te ortalama yağış değerine ikame olarak kullanılmış ve NYİ değerleri elde edilmiştir. Çizelge 1 ve Eşitlik 3 birlikte değerlendirilerek, her bir istasyonun NYİ=%85, NYİ=%75 ve NYİ=%65 değerlerine karşılık gelen "eşik yağış değerleri" istasyon bazında hesaplanmıştır (Çizelge 4).

Çizelge 4 - İstasyonların P=%50 olasılıklı yıllık toplam yağış değerlerinden hesaplanan NYİ kuraklık kategorilerinin (%65, %75, %85) eşik yağış değerleri (mm)

No	İstasyon	NYİ Kuraklık Kategorileri				No	İstasyon	NYİ Kuraklık Kategorileri			
		P %50	%65	%75	%85			P %50	%65	%75	%85
1	Kangal	395	257	296	336	33	Şihli	395	257	296	335
2	Konakpınar	390	254	293	332	34	Yahyalı	459	299	345	391
3	Yazyurdu	414	269	310	352	35	Hüyükofis	331	215	248	281
4	Ulaş	352	229	264	299	36	Niğde	332	216	249	283
5	Altınyayla	319	207	239	271	37	Çamardı	370	240	277	314
6	Şarkışla	322	209	241	273	38	Mansurlu	971	631	728	825
7	Gemerek	391	254	293	332	39	Feke	934	607	701	794
8	Sarıoğlan	378	246	284	322	40	Saimbeyli	833	541	624	708
9	Akkışla	420	273	315	357	41	Çokak	1472	957	1104	1251
10	Kaynar	333	217	250	283	42	Andırın	1399	909	1049	1189
11	Örenşehir	311	202	233	264	43	Karsantı	1035	673	776	879
12	Gürün	305	198	229	259	44	Çiftahan	493	321	370	419
13	Pınarbaşı	410	267	308	349	45	Ulukışla	321	209	241	273
14	Pazarören	391	254	293	332	46	Ereğli	293	191	220	249
15	Elbaşı	381	248	286	324	47	Pozantı	701	456	526	596
16	Bünyan	463	301	347	393	48	Gülek	868	564	651	738
17	Gesi	407	264	305	346	49	Çamlıyayla	1020	663	765	867
18	Talas	369	240	276	313	50	Karaisalı	898	583	673	763
19	Kayseri	394	256	295	335	51	İmamoğlu	675	439	506	574
20	Hacılar	513	333	385	436	52	Kösreli	661	430	496	562
21	Yeşilhisar	274	178	205	233	53	Ç.Ovatariş	806	524	604	685
22	Develi	368	239	276	313	54	Ceyhan	709	461	532	603
23	Tomarza	394	256	296	335	55	Yumurtalık	825	537	619	702
24	Toklar	381	248	286	324	56	Hacıali	612	398	459	520
25	Adana	623	405	467	530	57	Karataş	765	497	574	650
26	Sarız	507	329	380	431	58	Tuzla	634	412	476	539
27	Tanır	303	197	228	258	59	Tarsus	595	387	446	506
28	Afşin	436	284	327	371	60	Kozan	838	545	628	712
29	Çardak	562	365	422	478	61	Kadirli	709	461	532	603
30	Göksün	614	399	461	522	62	Kaleönü	841	547	631	715
31	Tufanbeyli	553	360	415	470	63	Topçu	646	420	484	549
32	Bakırdağ	345	224	259	293						

3.4. Jeostatistik Analiz Sonuçları

Yıllık toplam yağış serilerinin %50, %80, %90 olasılıkla beklenen yağış değerleri (Çizelge 3) ve *NYİ* yöntemi %65, %75, %85 göstergesi olan eşik yağış değerleri (Çizelge 4) jeostatistiksel yöntemle analiz edilmiştir. Bu bağlamda, havzanın raster tabanlı sayısal yükseklik modeli yardımcı değişken olarak kullanılmış ve deneysel covariogramlar elde edilmiştir. Dikkate alınan yağış veri setleri, küresel tip teorik covariogram modeli ile temsil edilmiştir. Seyhan Havzası'nda %50, %80, %90 olasılıkla beklenen yıllık toplam yağış değerleri ve *NYİ* yöntemine göre %65, %75, %85 eşik yağış değerleri *Ordinary Cokriging* yöntemi ile haritalanmıştır (Şekil 3).



Şekil 3 - Seyhan Havzası'nda farklı olasılıklı (%50, %80, %90) yıllık toplam yağış ve *NYİ* yöntemi farklı kuraklık sınıfları eşik (%65, %75, %85) yağış haritaları

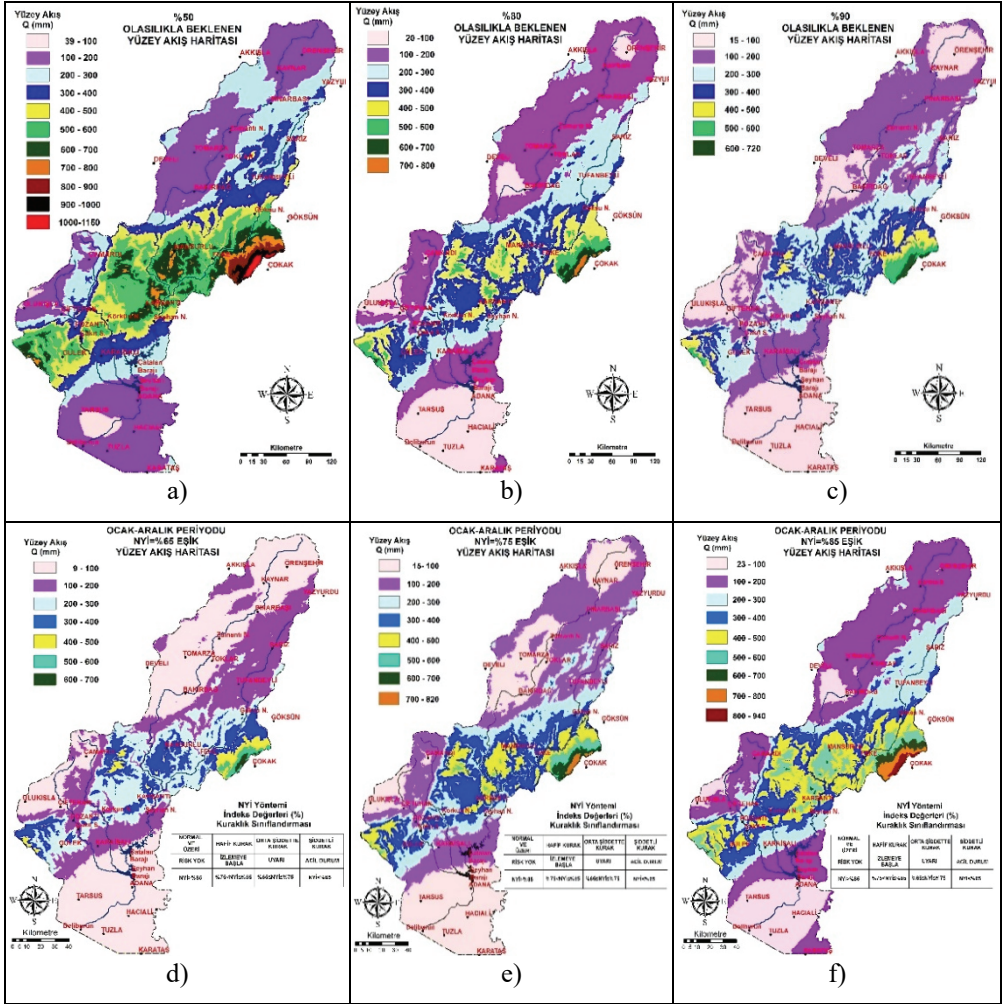
Seyhan Havzası'nın *SYM* haritası incelendiğinde topoğrafya ile yağış dağılımları paralellik göstermektedir. Şekil 3'te verilen yağış haritaları ile Seyhan Havzası'nda yağışlar değerlendirilirken, havzanın orta, kuzey ve güney olarak 3 bölgeye ayrılması daha sağlıklı yorumların yapılmasına olanak sağlamaktadır. Orta bölge olarak adlandırılan Karaisalı, Gülek, Pozantı, Mansurlu ve Çokak'ı da içine alan bölgenin Seyhan Havzası'nı kuzey ve güney olarak iki bölgeye ayırdığı görülmektedir. Bu bölge; Seyhan Havzası'nda yağış dağılımlarının boyun bölgesidir. Bu bölgede, yağış miktarları kuzeybatı-güneydoğu (Pozantı-Karaisalı) yönünde azalarak, kuzeydoğu-güneybatı (Karsantı-Gülek) yönünde ise artarak geçiş yapmıştır. Diğer bir ifadeyle, orta bölge en yüksek yağış alan bölge olup, *SYM* haritasında yaklaşık 200-1400 m yükseltili, derin vadilerden oluşan bir topoğrafya ile karakterize edilmektedir. Bu kesimler, Seyhan Nehri ana kollarının birleştiği, drenaj alanlarının genişlediği yerlerdir. Kuzey bölgesi ise, yaklaşık 1400-3600 m yükseltileri arasında yer almaktadır ve en az yağış alan bölgedir. Güney bölgesi, düz ve düze yakın topoğrafyalı, Akdeniz ikliminin hüküm sürdüğü ovalık alanları temsil etmektedir. Bu bölge, yaklaşık 0-200 m yükseltileri arasında yer almaktadır. Yağış yükseklikleri esas alındığında, ovalık kesimler, orta bölgeden sonra en fazla yağış alan yerlerdir.

3.5. M. Turc Yöntemi Yüzeysel Akış Sonuçları

M. Turc yöntemi ile yüzeysel akış haritaları *CBS* ortamında *ArcGIS* yazılımının *Map Algebra* modülü ile oluşturulmuştur. Eşitlik 4'te verilen *L* parametresi haritası üretilirken, *Yapay Sinir Ağları* yöntemi ile Seyhan Havzası için oluşturulan [45] %50 olasılıklı ortalama sıcaklık (*T%50*) haritasının raster formatı altlık olarak kullanılmıştır. *Cokriging* yöntemi ile elde edilen %50, %80 ve %90 olasılıklardaki toplam yağış (*P*) ve *NYİ* yöntemi %65, %75 ve %85 göstergesi olan eşik yağış (*P*) haritaları *M. Turc* yüzeysel akış eşitliğinde (Eşitlik 4) ayrı ayrı işleme alınmıştır. Hesaplamalar sonunda; Parajka ve Szolgay [65] tarafından gerçek evapotranspirasyon (*ET*) olarak da ifade edilen Seyhan Havzası'ndaki *M. Turc* yöntemi kayıp (*D*) haritaları elde edilmiştir. Farklı olasılık düzeyleri ve *NYİ* eşik değerleri için çizilen *P* ve *D* haritaları *Map Algebra* modülü ile birbirinden çıkarılmıştır. Bu işlemler sonucunda, Seyhan Havzası için *M. Turc* yöntemine göre $Q_{%50}$ (Şekil 4a), $Q_{%80}$ (Şekil 4b), $Q_{%90}$ (Şekil 4c) olasılıkla beklenen yıllık yüzeysel akış ve *NYİ* yöntemindeki kuraklık kategorileri için $Q_{NYI=%65}$ (Şekil 4d), $Q_{NYI=%75}$ (Şekil 4e), $Q_{NYI=%85}$ (Şekil 4f) eşik yüzeysel akış haritaları oluşturulmuştur.

Şekil 4'te verilen farklı olasılıklı yıllık toplam yüzeysel akış ve *NYİ* yöntemi farklı kuraklık sınıfı eşik yüzeysel akış haritaları incelendiğinde, topoğrafyanın yüzeysel akışlar üzerine olan etkisi açıkça görülmektedir. Zira, Şekil 3'te verilen yağış haritaları ve *SYM* haritası (Şekil 1a) birlikte değerlendirildiğinde, topoğrafya ve yıllık yağış toplamalarının etkisi yüzeysel akış miktarlarını da orta, kuzey ve güney olarak 3 bölgeye ayırmaktadır. Yağış haritalarına göre, orta bölgeden sonra güney bölgesi en yüksek yağışı almasına rağmen, yüzeysel akış haritalarında kuzey bölge ile benzer miktarda yüzeysel akış oluştuğu gözlenmektedir. Güney bölgesindeki yüzeysel akış miktarlarının, yüksek sıcaklık ve bunun sonucunda meydana gelen yüksek evapotranspirasyon nedeniyle azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 4). Orta bölge ise, yüksek yağış ve nispeten düşük sıcaklıklar nedeniyle yüzeysel akışların yüksek değerlere ulaştığı bölgedir. Farklı olasılıklı yüzeysel akış ve eşik yüzeysel akış haritaları arasında en büyük yüzeysel akışların %50 olasılıkla beklenen yıllık toplam yüzeysel akış haritalarında olduğu görülmüştür. Ayrıca, %50 olasılıkla beklenen yıllık toplam en küçük yüzeysel akış miktarı 39-

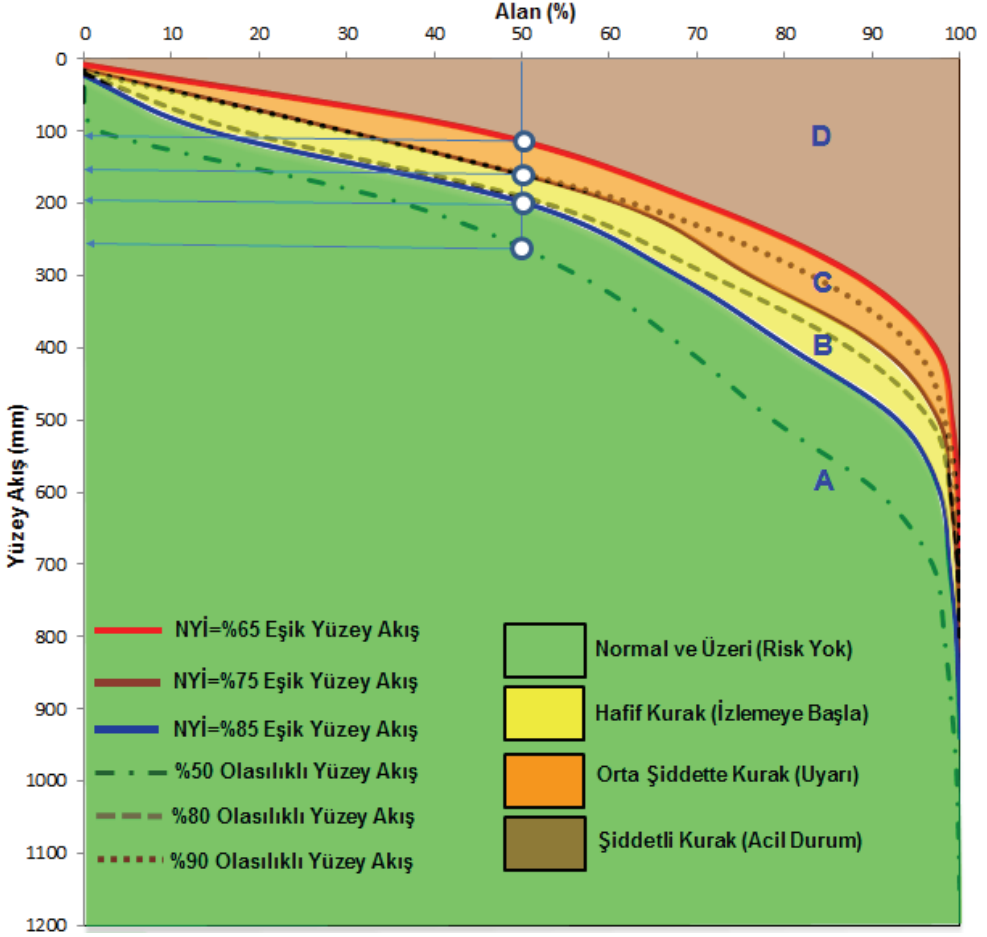
100 mm aralığında değişmiş olup, Ulukışla'nın kuzeydoğusunda ve havza mansabında (Tarsus'un güneyinde) gerçekleşmiştir (Şekil 4a). Sonuç olarak, Seyhan Havzası'nda %50 olasılık düzeyinde, 39 mm'nin altında yüzey akışı beklenmemektedir.



Şekil 4 - Seyhan Havzası'nda farklı olasılıklı (%50, %80, %90) yıllık toplam yüzey akış ve NYİ yöntemi farklı kuraklık sınıfları eşik (%65, %75, %85) yüzey akış haritaları

Çizilen yüzey akış haritalarında, yüzey akış miktarlarının alan ile değişimi araştırılmıştır. Kıyaslanabilir sonuçların elde edilebilmesi için "yüzey akış hipsometrik eğrileri" geliştirilmiştir. Şekil 4'te verilen her bir yüzey akış haritası için geliştirilen "yüzey akış hipsometrik eğrileri" yardımıyla; akım gözlemi olmayan kuraklığa eğilimli bölgelerde tasarlanacak göletler için havza su veriminin hesaplanmasında kullanılabilecek olasılık düzeyi belirlenmeye çalışılmıştır. Bu amaçla, geliştirilen tüm "yüzey akış hipsometrik eğrileri" Şekil 5'te verilen kartezyen koordinat grafiği üzerine topluca çizilmiştir. Bu

eğrilerin davranışları irdelenmek sureti ile kuraklığa eğilimli bölgelerde yüzey akış hesabında kullanılması gereken olasılık düzeyi hakkında bir yaklaşım ortaya konulmaya çalışılmıştır.



Şekil 5 - Seyhan Havzası'nda farklı olasılıklı yıllık toplam yüzey akış ve NYİ yöntemi farklı kuraklık sınıfları eşik yüzey akış değerlerine ilişkin hipsometrik eğriler

Şekil 5'te görüldüğü üzere, Seyhan Havzası'nda farklı olasılık düzeylerindeki yağışlardan kaynaklanan *M. Turc* yüzey akış değerlerinin hipsometrik eğrileri ile NYİ kuraklık kategorileri için belirlenen eşik yağışların oluşturduğu *M. Turc* yüzey akış değerlerinin hipsometrik eğrileri dikkate değer karakteristik davranışlar göstermektedir. NYİ yöntemi kuraklık sınıfları eşik yüzey akış değerleri, her bir kuraklık sınıfını belirgin bir şekilde ayırmıştır (Şekil 5). Bu bağlamda, A bölgesi kuraklık riskinin olmadığı "Normal" durumu ($NYİ > \%85$), B bölgesi "Hafif Kurak" durumu ($\%75 < NYİ \leq \%85$), C bölgesi "Orta Şiddette Kurak" durumu ($\%65 \leq NYİ \leq \%75$), D bölgesi "Şiddetli Kurak" durumu ($NYİ < \%65$) göstermektedir. D bölgesindeki yüzey akışlar, "Şiddetli Kurak" koşullarda havzada oluşacak

yüzeysel akımları göstermektedir. Buna karşın C ve B bölgesindeki yüzeysel akışlar sırasıyla “Orta Şiddette Kurak” ve “Hafif Kurak” koşullardaki beklenen yüzeysel akımları göstermektedir. A bölgesindeki yüzeysel akış değerleri, havzada kuraklık olaylarının hüküm sürmediği “Normal” koşullarda beklenen yüzeysel akışları tasvir etmektedir. Bu bilgilere göre; %90 olasılıkla beklenen yıllık toplam yüzeysel akış miktarları “Orta Şiddette Kurak” dönemlerde oluşabilecek yüzeysel akış miktarlarını temsil etmektedir. Bu akım değerleri; havzanın %50’sinde 150 mm ve daha az olup, bu akışın hipsometrik eğrisi ile $NYI=75$ eşik yüzeysel akış hipsometrik eğrisi çakışmıştır. Havzanın diğer %50 ‘sinde ise akım 150-700 mm arasındadır.

Havzanın tamamında %80 olasılıkla beklenen yıllık toplam yüzeysel akış miktarı $NYI=75$ ile $NYI=85$ eşik yüzeysel akış aralığındadır. Bu akım değerleri; “Hafif Kurak” dönemlerde oluşabilecek yüzeysel akış miktarlarını temsil etmektedir. Bu olasılık düzeyinde havzanın %50’sinde 195 mm’nin altında yüzeysel akış beklenmektedir ve havzanın diğer %50 ‘sinde ise akım 195-800 mm arasında değişmektedir.

Seyhan Havzası’nın tamamında %50 olasılıkla beklenen yıllık toplam yüzeysel akış miktarları “Normal ve Üzeri-Risk Yok” kuraklık sınıfına dahil olmuştur. Bu olasılık düzeyinde beklenen akımlar NYI yöntemi %85 kuraklık eşik yüzeysel akış değerleri üzerinde kalmaktadır. Diğer bir ifadeyle, yağışlı dönemlerde oluşabilecek yüzeysel akış miktarlarıdır. Elde edilen bu sonuç, gölet tasarımında havza su verimi hesaplamalarında seçilecek olasılık değerinin belirlenmesi bakımından önem arz etmektedir. Bu değerlendirmelerden anlaşılacağı gibi, kuraklık riski altındaki havzalarda, göletlerin tasarımında %50 olasılıklı yağışların kullanılması sonucunda yüksek oranlarda yüzeysel akışlar hesaplanmakta; gölet rezervuarları gereğinden fazla kapasitelenmektedir. Bu ise, projelerin gereksiz yere maliyetlerinin artışı beraberinde getirmektedir. Çizelge 5’te %50 olasılıkla beklenen akım ve $NYI=85$ eşik akım değerleri arasında havzanın farklı alan yüzdelik dilimlerindeki $NYI=85$ eşik üstü akım değerleri görülmektedir. Burada havzanın %50’sinde eşik üstü akım değeri 70 mm altındaki değerler ile temsil edilmiştir. Havzanın tamamına bakıldığında 200 mm’ye kadar eşik üstü akımın oluştuğu görülmüştür. Ayrıca, havzada alan yüzdesi büyüdükçe “Normal ve Üzeri-Risk Yok” eşik üstü akımların artışı gözlenmiştir.

Çizelge 5 - %50 olasılıkla beklenen yıllık toplam yüzeysel akış ve $NYI=85$ eşik yüzeysel akış hipsometrik eğrilerinin karşılaştırılması

Alan Oranı (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
%50 Olasılıkla Beklenen Akım (mm)	130	150	180	210	265	320	420	510	580	1150
$NYI=85$ Eşik Akım (mm)	80	120	150	170	195	250	320	390	460	950
$NYI=85$ Eşik Üstü Akım (mm)	50	30	30	40	70	70	100	120	120	200

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Seyhan Havzası’nda akım gözlemi olmayan dereler üzerine inşa edilecek göletlerin hidrolojik tasarımında kullanılan %80 ve %90 olasılıkla beklenen akımların NYI kuraklık sınıflamasına göre sırasıyla; “Hafif Kurak ve Orta Şiddette Kurak” dönemlerde oluşabilecek yüzeysel akışlar olduğu tespit edilmiştir. Ancak, %50 olasılıkla beklenen yıllık toplam yüzeysel

akış miktarlarının ise, “Normal ve Üzeri-Risk Yok” kuraklık sınıfı akım değerlerinin üzerinde olduğu görülmüştür. Kuraklık olaylarının beklenmediği normal koşulların hakim olması durumunda, %50 olasılıklı yağışların kullanılması proje hidrolojisi ve ekonomisi açısından uygun olacaktır. Sonuç olarak; %80 ve %90 olasılıkla beklenen yüzey akış değerleri sırasıyla; “Hafif Kurak” ve “Orta Şiddette Kurak” dönemlerde oluşabilecek akım değerlerini temsil ettiğinden, kuraklık söz konusu olduğunda bu değerlerin kullanılması daha gerçekçi olacaktır. Gölet hazne tasarımlarında, kurak dönemlerin dikkate alınması proje ekonomisine katkı sağlayacaktır. Havzada, %50 olasılıkla beklenen yıllık toplam yüzey akış miktarları, NYİ kuraklık sınıfına göre “Normal ve Üzeri-Risk Yok” kuraklık sınıfı eşik akım değerlerinden daha büyük bulunmuştur. Bu akımlar, yağışlı dönemlerde oluşabilecek potansiyel yüzey akışları göstermektedir. Oysa, Seyhan Havzası'nda yağış azalması ve kuraklık riski olduğu birçok bilimsel çalışma sonucunda bulgu olarak açıklanmıştır [32-41]. Bu sonuçlara göre; Seyhan Havzası'nda tarımsal ve hayvan içme suyu gölet tasarımlarında %50 olasılıkla beklenen yıllık toplam yüzey akış miktarları ile gövde tasarımının yapılmaması gerekmektedir. Havzanın potansiyel kuraklık riski dikkate alınmalı, tasarımlarda havza su verimleri %80 ve %90 olasılıkla beklenen yüzey akış miktarlarına göre hesaplanmalıdır. Böylelikle gölet gövde yükseklikleri küçüleceğinden maliyetlerde büyük azalmalar elde edilebilecektir.

Kaynaklar

- [1] ICID., Irrigated Agriculture Development Under Drought and Water Scarcity, International Commission on Irrigation and Drainage, 150 p, India, 2017.
- [2] Alcamo, J., Henrichs, T., Rösch, T., World Water in 2025, Global Modeling and Scenario Analysis for The World Commission on Water for The 21st Century, Center for Environmental Systems Research, University of Kassel, 2000.
- [3] UN., Report of the World Summit on Sustainable Development, United Nations, 26 August-4 September, Johannesburg, South Africa, 2002.
- [4] FAO., Coping with Water Scarcity-Challenge of The Twenty-First Century, World Water Day, 29 p, Rome, 2007.
- [5] Vogel, S., An Analysis of Water Management Strategies in Drought Prone Areas: A Comparison of Water Management Techniques in California, Chile, and Australia, Masters Project Submitted in Partial Fulfillment of The Requirements for The Masters of Environmental Management Degree in The Nicholas School of The Environment of Duke University, USA, 2018.
- [6] DSİ., Ormançılık ve Su Şurası, Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Devlet Su İşleri, Su Kaynaklarının Geliştirilmesi Çalışma Grubu Raporu, 21-23 Mart, Ankara, 2013.
- [7] Kılıç, N., Su Kaynaklarının Yetersizliği Düşündürüyor, Ar-Ge Sektörel Bülten, İzmir Ticaret Odası, Ekim, 2006.
- [8] İMO., Su Hakkı Raporları, İnşaat Mühendisleri Odası, Türkiye Mühendislik Haberleri, 2009/2, Ankara, 2009.

- [9] IWR., National Study of Water Management During Drought, The Report to The U.S. Congress. U.S. Army Corps of Engineers Water Resources Support Center Institute for Water Resources, 94-NDS-12, USA, 1995.
- [10] CC., Climate Change and Drought June 2018, Climate Council, Factsheet, Australia, 2018.
- [11] Andreadis, K.M., Clark, E.A., Wood, A.W., Hamlet, A.F., Lettenmaier, D.P., Twentieth-Century Drought in the Conterminous United States. American Meteorological Society, Volume:6, Pages; 985-1001, USA, 2005.
- [12] Mix, K., Groeger, A.W., Lopes, V.L., Impacts of Dam Construction on Streamflows During Drought Periods in The Upper Colorado River Basin, Texas. Lakes and Reservoirs: Research and Management, 21: 329–337, 2016.
- [13] Engindeniz, S., Öztürk, G., Türkiye’de İklim Değişikliğine Karşı Tarım Sektöründe Alınması Gereken Önlemler, Türkiye 9. Tarım Ekonomisi Kongresi, 22-24 Eylül 2010, Şanlıurfa, 2.Cilt, s.956-963, 2010.
- [14] Lindoso, D.P., Eiro, F., Bursztyn, M., Rodrigues-Filho, S., Nasuti, S., Harvesting Water for Living with Drought: Insights from the Brazilian Human Coexistence with Semi-Aridity Approach Towards Achieving the Sustainable Development Goals. Sustainability 2018, 10, 622; doi:10.3390/su1003062, 2018.
- [15] Fayrap, A., Erzurum İlinde Yapılan Sulama Amaçlı Göletlerin Durumu Yeterlilikleri ve Sorunları Üzerine Bir Araştırma. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi, 25 (2): 145-158, 1994.
- [16] Bancy, M.M., Malesu, M., Oduor, A., Promoting Rainwater Harvesting Eastern and Southern Africa, the Relma Experience. World Agroforestry, Centre Working Paper 24, Kenya, 2006.
- [17] Subagyono, K., Pawitan H., Water Harvesting Techniques for Sustainable Water Resources Management in Catchments Area. Proceedings of International Workshop on Integrated Watershed Management for Sustainable Water Use in a Humid Tropical Region, JSPS-DGHE Joint Research Project, Tsukuba, 2008.
- [18] Keskiner, A.D., Farklı Olasılıklı Yağış ve Sıcaklıkların CBS Ortamında Haritalanmasında Uygun Yöntem Belirlenmesi ve M.Turc Yüzey Akış Haritasının Geliştirilmesi: Seyhan Havzası Örneği, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, 2008.
- [19] Alberta (2015). Small Earth Fill Dams, Alberta Agriculture and Forestry, Practical Information for Alberta’s Agriculture Industry, Revised September 2015, Agdex 716 (A20), Canada, 2015.
- [20] Özlü, H., Kuraklık ve su yönetimi, İklim Değişimi ve Su Ekonomisi Paneli G.Ü. Bilim ve Teknoloji Stratejileri Araştırma ve Geliştirme Merkezi, 17 Mayıs, Ankara, 2007.
- [21] OSİB., Ulusal Kuraklık Yönetimi Strateji Belgesi ve Eylem Planı 2017-2023, Orman ve Su İşleri Bakanlığı, Ankara, 2017.

- [22] Mendicino, G., Senatore, A., Versace, P., Water Resources Management in Agriculture under Drought and Water Shortage Conditions: A Case Study in Southern Italy. *European Water*, 23/24:41-56, 2008.
- [23] Kasap, R., Gölet Temel Gövdelerinin Projelendirilmesi, KHGM, Ankara, 1998.
- [24] Özer, Z., Su Yapılarının Projelendirilmesinde Hidrolojik ve Hidrolik Esaslar, Tarım Orman ve Köy İşleri Bakanlığı, Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 1990.
- [25] Vanlı, M., Göletlerde Su Temini Çalışmaları, T. C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü, Hidrometri ve Taşkın Hidrolojisi Semineri, 3-4 Eylül, İstanbul, 1990.
- [26] Dalgün, N., Çanakkale Bayramiç Hacıbekirler Sulama Göleti Mühendislik Hidrolojisi Proje Raporu, Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü Yayınları (KHGM), Ankara, 1998.
- [27] Türkeş, M., Akgündüz, A.S., Demirörs, Z., Palmer Kuraklık İndisi'ne Göre İç Anadolu Bölgesi'nin Konya Bölümündeki Kurak Dönemler ve Kuraklık Şiddeti. *Coğrafi Bilimler Dergisi*, 7 (2), 129-144, 2009.
- [28] Bulut, B., Yılmaz, M.T., Türkiye'deki 2007 ve 2013 Yılı Kuraklıklarının NOAH Hidrolojik Modeli İle İncelenmesi. *İMO Teknik Dergi*, 27 (134): 7619-7634, 2016.
- [29] Önöz, B., Oğuz, B., İstanbul Su Temini Sistemi ve Kuraklık Analizi. *İMO Teknik Dergi*, 7 (31), 1083-1090, 1996.
- [30] Kadioğlu, M., Kuraklıkta Kiriz Yönetiminin Risk Yönetimine Geçmeliyiz. Afet Zararlarını Azaltmanın İlkeleri, JICA Türkiye Ofisi Yayınları No: 2, Ankara, 2008.
- [31] Kapluhan, E., Türkiye'de Kuraklık ve Kuraklığın Tarıma Etkisi. *Marmara Coğrafya Dergisi*, 27: 487-510, 2013.
- [32] Ekmekçi, M., Jeolojik Geçmişten Günümüze İklim Değişiklikleri: Küresel İklim Değişimi ve Türkiye, TMMOB İklim Değişimi Sempozyumu, 13-14 Mart, 2008, s. 7-26, Ankara, 2008.
- [33] Tezcan, L., Ekmekçi, M., Atilla, Ö., Gürkan, D., Yalçınkaya, O., Otgonbayar, N., Saylu, M.E., Donma, S., Yılmaz, D., Akyatan, A., Pelen, N., Topaloğlu, F., İrvem, A., Seyhan Nehri Havzasında Tarım Güvenliği İçin Su Kaynakları Sistemlerinin İklim Değişikliğine Karşı Duyarlılıklarının Araştırılması, ICCAP Projesi Türk Grubu Sonuç Raporları, s. 1-24, Kyoto, 2007.
- [34] Kanber, R., Kapur, B., Ünlü, M., Tekin, S., Koç D.L., İklim Değişiminin Tarımsal Üretim Sistemleri Üzerine Etkisinin Değerlendirilmesine Yönelik Yeni Bir Yaklaşım: ICCAP Projesi, TMMOB 2. Su Politikaları Kongresi, 83-94, 2003.
- [35] Fujihara, Y., Tanaka, K., Nagano, T., Watanabe, T., Kojiri T., Assessing The Impact of Climate Change on The Water Resources of The Seyhan River Basin, Turkey, In: *Proceedings of the International Congress River Basin Management*, Vol. 1, Antalya, Turkey, pp. 453-463, 2007.
- [36] Topçu, E., Seçkin, N., Drought Analysis of the Seyhan Basin by Using Standardized Precipitation Index (SPI) and L-moments. *Journal of Agricultural Sciences*, 22: 196-215, 2016.

- [37] Keskiner, A.D., Çetin, M., Uçan, M., Şimşek, M., Coğrafi Bilgi Sistemleri Ortamında Standardize Yağış İndeksi Yöntemiyle Olasılıklı Meteorolojik Kuraklık Analizi: Seyhan Havzası Örneği. Çukurova Tarım Gıda Bilimleri Dergisi, 31 (2): 79-90, 2016.
- [38] Tuncok, İ. K., Drought Planning and Management: Experience in the Seyhan River Basin, Turkey. IWA Publishing, Water Policy, 18 (S2): 177-209, 2016.
- [39] Çetin, M., Keskiner, A.D., Nagano, T., Kubota, J., Coğrafi Bilgi Sistemleri Ortamında Olasılıklı Bölgesel Meteorolojik Kuraklık Analizi: Seyhan Havzası Örneği.13. Ulusal Kültürteknik Kongresi, Akdeniz Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarımsal Yapılar ve Sulama Bölümü, 12-15 Nisan, Antalya, Bildiriler Kitabı: 332-339, 2016.
- [40] Gül, G.O., Kuzucu, A., Analysis of Drought Severity in Seyhan River Basin. European Water, 60: 211-217, 2017.
- [41] Gümüş, V., Algin, H.M., Meteorological and Hydrological Drought Analysis of The Seyhan-Ceyhan River Basins, Turkey. Meteorological Applications, 24: 62-73, 2017.
- [42] DSİ., Göl-Su Projesi. Devlet Su İşleri, <http://www.dsi.gov.tr/projeler/gol-su-projesi>, Erişim tarihi: 11.11 2018
- [43] Çetin, M., Topaloğlu, F., Yücel, A., Tülücü, K., Yağış Kayıtları ve Bazı Önemli İstatistiklerin Jeostatistik Yöntemle İncelenmesi: Seyhan Havzası Örneği, II. Ulusal Hidroloji Kongresi, sayfa 75-82, İstanbul, 1998.
- [44] Esri., Spatial Analysis. <http://www.esri.com>, Erişim Tarihi: 11.11.2018.
- [45] Keskiner, A.D., İbriği, T., Çetin, M., Yapay Sinir Ağlarıyla Coğrafi Bilgi Sistemi Ortamında Olasılıklı Sıcaklık Tahmini ve Karşılaştırılması. Tarım Bilimleri Dergisi, 17 : 241- 252, 2011.
- [46] Ryan, B.F., Cryer, J., Minitab Handbook, Fifth Edition, Regression and Correlation, In: 313-349, Belmont, California, 2005.
- [47] BestFit., Users's Guide @risk Risk Analysis and Simulation Add-In for Microsoft®Excel, <http://www.palisade.com/risk/>, Erişim tarihi: 11.11.2018.
- [48] Tülücü, K., KT-310 Uygulamalı Hidroloji, Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları: 138 Ders Kitabı:A-143, 315 s., Adana, 2002.
- [49] Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., Applied Hydrology, McGraw-Hill, Inc., Civil Engineering Series, 572 p, New York, 1988.
- [50] Şen, Z., Applied Drought, Modeling, Prediction and Mitigation, Elsevier: 9780128024225,484 p., Amsterdam, Netherlands, 2015.
- [51] Willeke G., Hosking J.R.M., Wallis J.R., Guttman N.B., The National Drought Atlas, Institute for Water Resources Report, 94-NDS-4, U.S. Army Corps of Engineers, 1994.
- [52] Çetin, M., Özcan, H., Tülücü, K., Aşağı Seyhan Ovası IV.Merhale Proje Alanında Toprak ve Taban Suyuna İlişkin Bazı Fiziksel ve Kimyasal Özelliklerin Yersel Değişimlerinin Jeostatistik Yöntemle Araştırılması, Araştırma Projesi Sonuç Raporu, Adana, 2001.

- [53] Hayes, M.J., Drought Indices. Western Water Assessment, Feature Article From Intermountain West Climate Summary, Colorado, USA, 2007.
- [54] MGM., Meteoroloji Genel Müdürlüğü. <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/kuraklik-analizi.aspx?d=yontemsinif#sfB> ,Erişim tarihi: 11.11 2018.
- [55] Englund, E., Sparks, A., GEOEAS User's Guide, EPA, Las Vegas, NV, 1991.
- [56] Çıtakoğlu, H., Çetin, M., Çobaner, M., Haktanır, T., Mevsimsel Yağışların Jeostatistiksel Yöntemle Modellenmesi ve Gözlemi Olmayan Noktalarda Tahmin Edilmesi. İMO Teknik Dergi, 28 (136): 7725-7745, 2017.
- [57] Taylan, E.D., Damçayırı, D., Isparta Bölgesi Yağış Değerlerinin IDW ve Kriging Enterpolasyon Yöntemleri ile Tahmini. İMO Teknik Dergi, 27 (133): 7551-7559, 2016.
- [58] Eriş, E., Ağırlioğlu, N., Ölçümleri Az Olan Kıyı Bölgelerinde Yağışın Yerel Dağılımının Belirlenmesi: Doğu Karadeniz Bölgesi. İMO Teknik Dergi, 28 (136): 7685-7702, 2017.
- [59] Çetin, M., Jeostatistiksel Yöntem İle Nokta ve Alansal Yağışların Saptanması ve Stokastik Olarak Modellenmesi Örnek Havza Uygulamaları, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, 1996.
- [60] Atlı, A., Yer Altı Suyu (YAS) Kirlenme Potansiyelinin, CBS Tabanlı Drastic Modeli Kullanılarak Belirlenmesi ve Erzin Ovası Yas Hassasiyet Haritalarının Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, 2010.
- [61] Goovaerts, P., Ordinary Cokriging Revisted. Mathematical Geology, International Association for Mathematical Geology 30 (1): 21-42, 1988.
- [62] Türkyılmaz, Y., Rezervuar Hidrolojisi Seminer Notları, T.C Başbakanlık, Köy Hizmetleri Genel Müdürlüğü, Ankara, 1996.
- [63] Vivoni, E.R., Benedetto, F.D., Grimaldi, S., Eltahir, E.A.B., Hypsometric Control on Surface and Subsurface Runoff. Water Resources Research, Vol. 44, W12502, doi:10.1029/2008wr006931, 2008.
- [64] Eriş, E., Aksoy, H., Önöz, B., Çetin, M., Yüce, M.İ., Selek, B., Aksu, H., Burgan, H.İ., Eşit, M., Yıldırım, I., Karakuş, E.Ü., Frequency Analysis of Low Flows in Intermittent and Non-Intermittent Rivers from Hydrological Basins in Turkey. Water Supply 1 February 2019; 19 (1): 30-39, doi: <https://doi.org/10.2166/ws.2018.051>
- [65] Parajka, J., Szolgay, J., Grid-Based Mapping of Long-Term Mean Annual Potential and Actual Evapotranspiration in Slovakia. Hydrology, Water Resources and Ecology in HeadWaters (Proceedings of the Headwater '98 Conference Held in Meran/ Merano, from 20 to 23 April, Italy), 1998.

Akifer Parametrelerinin Optimizasyon Tabanlı Bir Eğri Çakıştırma Yaklaşımı Kullanılarak Belirlenmesi

M. Tamer AYVAZ¹
Gürhan GÜRARSLAN²

ÖZ

Akifer parametrelerin belirlenmesi yeraltı suyu mühendisliğinde dikkate alınan önemli bir problemdir. Pratikte bu parametreler tip eğri çakıştırma yaklaşımları kullanılarak belirlenmektedir. Ancak bu yaklaşımlar kullanılarak parametre kestirimi yapılması aşamasında grafiksel ve/veya insan kaynaklı hatalar yapılabilmektedir. Bu problemlerin üstesinden gelebilmek için bu çalışma kapsamında optimizasyon tabanlı bir eğri çakıştırma yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşımda doğrusal olmayan indirgenmiş gradyan yöntemi (GRG) kullanılarak düşü-zaman ve tip eğriler otomatik bir şekilde çakıştırılacak şekilde akifer parametreleri belirlenmektedir. Geliştirilen yaklaşımın performansı basınçlı ve sızıntılı akifer sistemlerine ait iki örnek çözülerek değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar önerilen yaklaşımın akifer parametrelerini etkin bir şekilde belirleyebildiğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Akifer, pompaj testi, tip eğri, optimizasyon.

ABSTRACT

Identification of the Aquifer Parameters by using an Optimization-based Curve Matching Approach

Aquifer parameter estimation is an important problem in groundwater engineering. In practice, these parameters are determined by using the curve matching approaches. However, graphical and/or human-based errors can be made during parameter estimation by using these approaches. To overcome these problems, an optimization based curve matching approach is proposed. In the proposed approach, nonlinear generalized reduced gradient (GRG) method is used to determine the aquifer parameters by automatically superimposing the time-drawdown and type curves. The performance of the proposed approach is evaluated by

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 6 Mart 2019 günü ulaşmıştır. 16 Eylül 2019 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 30 Kasım 2020 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://dx.doi.org/10.18400/tekderg.536342>

1 Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli – tayvaz@pamukkale.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-8566-2825>

2 Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli – gurarslan@pamukkale.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-9796-3334>

solving two examples for confined and leaky-confined aquifers. Identified results indicate that the proposed approach can effectively determine the aquifer parameters.

Keywords: Aquifer, pumping test, type curve, optimization.

1. GİRİŞ

Yeraltı suyu sistemlerinin sürdürülebilir yönetimi dikkate alınması gereken önemli mühendislik problemlerinden biridir. Bu problemin çözümü aşamasında matematiksel tabanlı simülasyon modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tarz modellerin kullanılabilmesi için modellenen akifer sistemine ait hidrojeolojik parametrelerin alansal dağılımının bilinmesi gerekmektedir. Bu parametrelere ait dağılımlar genellikle noktasal ölçekte yapılmış olan pompaj testlerinin sonuçlarına bağlı olarak elde edilmektedir. Bu testler genel olarak sahada var olan veya yeni açılmış bir veya birden fazla pompaj kuyusundan çekim yapılması ve bunun neticesinde gerçekleşen yeraltı suyu seviye düşü değerlerinin farklı yerlerde bulunan gözlem kuyularında zamana bağlı olarak kaydedilmesi prensibine dayanmaktadır. Pratikte, bu testlerin sonucunda elde edilen veriler kullanılarak düşü-zaman grafikleri çizilmekte ve bu grafikler farklı tip eğriler ile çakıştırılarak akifer parametreleri belirlenmektedir. Bu süreç genel olarak kolay gibi görünse de bazı durumlarda grafiksel ve/veya insan kaynaklı hatalardan dolayı doğru olmayan parametre değerleri belirlenebilmektedir. Bu tarz problemler özellikle ölçüm sonuçlarının logaritmik eksenli grafik üzerindeki eğriliğinin az olması gibi durumlarda meydana gelmekte ve çizilen eğriler yanlış şekilde çakıştırılabilmektedir. Bu nedenle akifer hidrojeolojik parametrelerinin sistematik çözüm yaklaşımları kullanılarak belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Literatürde akifer parametrelerinin pompaj test sonuçları kullanılarak belirlenmesine yönelik olarak çeşitli çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu çözüm yaklaşımlarının en önemlilerinden biri optimizasyon yaklaşımıdır. Bu yaklaşım genel olarak akifer sistemi için pompaj debisi-düşü değeri arasındaki ilişkiye ait matematiksel modelin kurulması ve kurulan bu modelin farklı optimizasyon tekniklerine entegre edilmesine dayanmaktadır [1-2]. Optimizasyon modeli tarafından belirlenen akifer parametreleri için matematiksel model kullanılarak gözlem kuyularının bulunduğu noktadaki düşü değerleri hesaplanmakta ve hesaplanan bu düşü değerleri ile pompaj testi sonucunda kaydedilen düşü değerleri arasındaki hata minimize edilecek şekilde ilgili parametrelerin değeri belirlenmektedir [3]. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri bu aşamada kullanılacak olan optimizasyon tekniklerinin seçimidir. Literatürde akifer parametrelerinin optimizasyon yaklaşımları kullanılarak çözümü aşamasında deterministik ve sezgisel optimizasyon teknikleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Deterministik optimizasyon teknikleri genel olarak global optimum sonuçların bulunmasında oldukça etkin olmasına karşın; akifer parametre belirleme problemlerinin çözümü aşamasında matematiksel çözüm uzayının konveks olmayan yapısından dolayı ancak özel başlangıç çözümlerinin modele verilmesi ile global optimum çözümlere ulaşılabilir [4-5]. Bu nedenle sezgisel optimizasyon tekniklerinin ilgili problemin çözümüne uygulanması yaygınlık kazanmıştır. Literatürde pompaj test sonuçlarından yola çıkarak akifer parametrelerinin belirlenmesinde tavlama benzetimi [1], parçacık sürü optimizasyonu [3] ve genetik algoritma [6-7] gibi sezgisel optimizasyon teknikleri kullanılmıştır. Bu teknikler genel olarak doğada karşılaşılan süreçlerin matematiksel olarak temsil edilmesine

dayanmakta olup global optimum çözümlerin belirlenmesi aşamasında etkin olarak kullanılmaktadır. Ancak bu tekniklerin hemen hemen tümü kısıtsız optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirildiklerinden problem ile ilgili kısıtların sağlanması ancak tanımlanan ceza fonksiyonlarının modele dahil edilmesi ile mümkün olabilmektedir. Bu durumda hem ilgili yöntemlerin stokastik yapısı hem de ilgili ceza fonksiyonlarının kullanılmasından dolayı sezgisel yöntemler ile çözüme ulaşmak oldukça fazla hesaplama yükü ve neticesinde büyük bilgi-işlem süreleri gerektirmektedir.

Bu çalışma kapsamında pompaj test sonuçları kullanılarak basınçlı ve sızıntılı akifer parametrelerinin belirlenebildiği kullanıcı dostu bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşımın amacı pompaj test sonuçları kullanılarak oluşturulan düşü-zaman grafikleri ile çizilen tip eğrilerin optimizasyon tabanlı bir çözüm yaklaşımı kullanılarak otomatik olarak çakıştırılmasını sağlamaktır. Bu kapsamda deterministik tabanlı genel indirgenmiş gradyan (GRG) optimizasyon tekniği kullanılarak düşü-zaman ve tip eğri grafikleri arasında hesaplanan Nash-Sutcliffe (NS) model etkinlik katsayısı değeri maksimize edilecek şekilde çakıştırılmış eğrilerin pozisyonları belirlenebilmektedir. Geliştirilen yaklaşımın en büyük avantajı literatürde verilen çalışmalardan farklı olarak özel bir başlangıç çözümüne ve yoğun bilgi-işlem sürelerine gerek kalmadan akifer parametrelerinin deterministik tabanlı bir optimizasyon yaklaşımı kullanılarak elde edilebilmesidir. Geliştirilen yaklaşımın performansı literatürde basınçlı ve sızıntılı akiferler için verilmiş olan iki pompaj test verisi kullanılarak değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, geliştirilen yaklaşım kullanılarak el ile yapılan tip eğri çakıştırma yöntemine göre çok daha doğru, sezgisel optimizasyon tekniklerine göre ise çok daha hızlı bir şekilde akifer parametrelerinin belirlenebildiğini göstermiştir.

2. MODEL GELİŞTİRİLMESİ

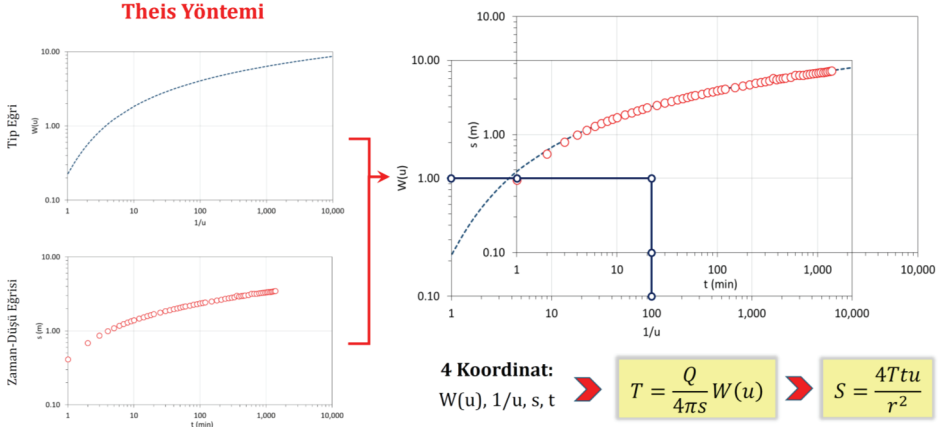
Bu bölümde geliştirilen optimizasyon tabanlı tip eğri çakıştırma yaklaşımı hakkında detaylı bilgi verilmiştir. Bu kapsamda öncelikle basınçlı ve sızıntılı akiferlerdeki yeraltı suyu akım sürecinin modellenmesinde kullanılan Theis ve Hantush yöntemleri hakkında bilgi verilmiş ve ardından bu modellerin geliştirilen yaklaşıma nasıl entegre edildiğinden bahsedilmiştir.

2.1. Theis Yöntemi

Basınçlı bir akifer sistemine açılmış ve tüm akifer boyunca çekim yapabilen bir pompaj kuyusuna doğru zamanla değişen yeraltı suyu akışı Theis yöntemi kullanılarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir [8]:

$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (1)$$

burada $s(r, t)$, r uzaklığındaki noktada t zaman adımı için ölçülen düşü değerini; Q , test boyunca değeri sabit tutulan pompaj debisini; T , akifer transmissivite katsayısını; u , boyutsuz kuyu parametresini; $W(u)$ ise u parametresine bağlı olarak hesaplanan Theis kuyu fonksiyonunu göstermektedir. Boyutsuz kuyu parametresi ve bu parametrenin değerine bağlı olarak hesaplanan Theis kuyu fonksiyonu aşağıda verilmiştir:



Şekil 1 - Pratikte Theis yöntemi ile akifer hidrojeolojik parametrelerinin (T, S) belirlenmesi

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (2)$$

$$W(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-y}}{y} dy \quad (3)$$

burada S , akifer depolama katsayısını; t , pompaj başlangıcından itibaren geçen zamanı; y ise integral değişkenini göstermektedir. Denklem (3)'de verilmiş olan kuyu fonksiyonunun değeri aşağıda verilmiş olan seri kullanılarak da hesaplanabilmektedir [9]:

$$W(u) = \ln \frac{0.5615}{u} + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{k+1} \frac{u^k}{k \cdot k!} \quad (4)$$

burada k , toplam sembolü içindeki eleman sırasını ifade eden bir indisi temsil etmektedir. Pratikte Theis yöntemi kapsamında kullanılan tip eğri çakıştırma yöntemi ile akifer parametrelerinin (T, S) nasıl belirleneceği Şekil 1'de gösterilmiştir. Görüleceği gibi pompaj testi sonucunda kaydedilen $s - t$ değerleri yatay ve düşeyde logaritmik eksene sahip grafik kağıdına çizilmektedir. Ardından şeffaf bir kağıt üzerine aynı ölçekte ve aynı boyutta olmak üzere $1/u$ değerlerine karşılık $W(u)$ değerleri (tip eğri) çizilmektedir. Çizilen tip eğri ardından her iki grafik kağıdının eksenleri paralel olacak şekilde $s - t$ grafiği üzerinde ölçüm değerleri ile tip eğri arasında en iyi uyum sağlanacak şekilde kaydırılarak bir eşleşme noktası seçilmektedir. Seçilen bu eşleşme noktası için her iki grafik üzerinden 4 adet koordinat $(W(u), 1/u, s, t)$ okunup Denklem (1) ve (2)'de yerine konularak T ve S değerleri belirlenebilmektedir.

2.1. Hantush Yöntemi

Herhangi bir depolamaya sahip olmayan sızdırmalı geçirimsiz bir katman (akitard) ile üstten sınırlandırılmış basınçlı bir akifer sistemine açılmış ve tüm akifer boyunca çekim yapabilen

bir pompaj kuyusuna doğru zamanla değişen yeraltı suyu akışı Hantush yöntemi ile aşağıdaki şekilde ifade edilebilmektedir [10]:

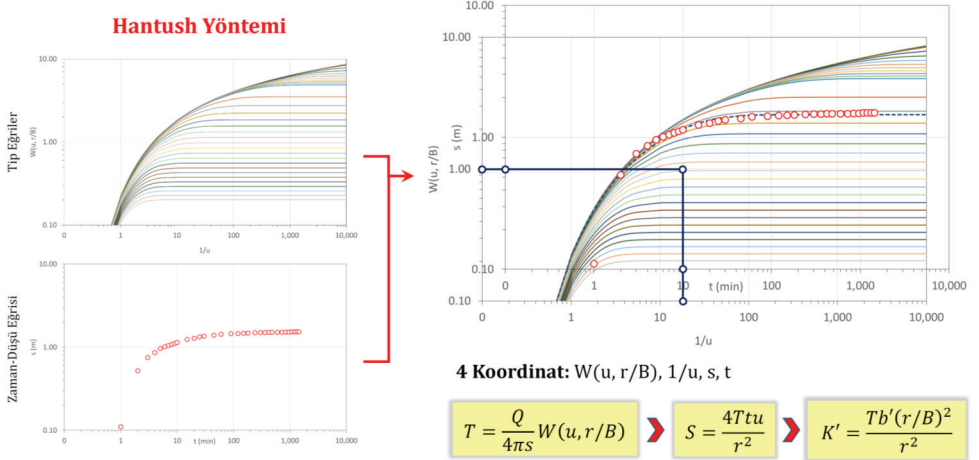
$$s(r, t) = \frac{Q}{4\pi T} W(u, r/B) \quad (5)$$

burada B , sızma faktörü; $W(u, r/B)$ ise değeri u ve r/B değerine bağlı olarak değişen kuyu fonksiyonunu göstermektedir. Kuyu fonksiyonu ve sızma faktörü aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$W(u, r/B) = \int_u^\infty \frac{e^{-y - \frac{(r/B)^2}{4y}}}{y} dy \quad (6)$$

$$B = \sqrt{\frac{Tb'}{K'}} \quad (7)$$

burada b' ve K' basınçlı akiferi sınırlayan sızdırmalı geçirimsiz katmanın kalınlığını ve hidrolik iletkenliğini göstermektedir. Denklem (6)'da bir integral ile verilen kuyu Hantush fonksiyonu nümerik integrasyon ve seri açılımı dayalı yaklaşımlar [7, 11] kullanılarak hesaplanabilmektedir. Pratikte Hantush yöntemi ile kullanılan sızıntılı akiferlere ait hidrojeolojik parametrelerin nasıl belirlendiği Şekil 2 üzerinde gösterilmiştir. Görüleceği



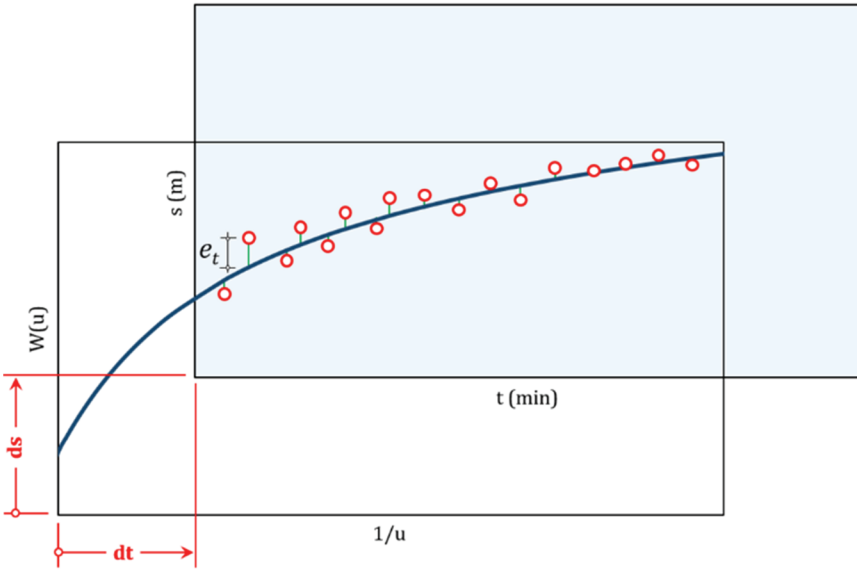
Şekil 2 - Pratikte Hantush yöntemi ile akifer hidrojeolojik parametrelerinin (T, S, K') belirlenmesi

gibi, Theis modelinden farklı olarak Hantush modelinde tip eğri tek bir eğri yerine bir eğri ailesi ile temsil edilmektedir. Bu eğri ailesinin en yukarısında bulunan eğri ise Theis yönteminde kullanılan tip eğri olmaktadır. Bu noktada tip eğri çakıştırma süreci ile akifer hidrojeolojik parametrelerinin belirlenebilmesi için öncelikle pompaj testi sonucunda kaydedilen $s - t$ değerleri yatay ve düşeyde logaritmik eksene sahip grafik kağıdına çizilmektedir. Ardından farklı u ve r/B değerleri için $W(u, r/B)$ değerleri aynı boyutlu ve

aynı ölçekli şeffaf bir grafik kağıdına çizilmektedir. Çizilen bu tip eğri ailesi ardından yatay ve düşey eksenler paralel olacak şekilde $s - t$ grafiği üzerinde yatayda ve farklı r/B eğrilerini de dikkate alacak şekilde düşeyde hareket ettirilerek en iyi uyum sağlanmasına çalışılmaktadır. Ardından her iki grafiğe ait eksenlerden toplamda 4 adet koordinat okunmakta ve bu koordinatlar Denklem (2), (5) ve (7)'de yerine konularak akifer sistemine ait hidrojeolojik parametreler (T, S, K') belirlenebilmektedir.

2.3. Optimizasyon Tabanlı Tip Eğri Çakıştırma Yaklaşımı

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi akifer hidrojeolojik parametrelerinin tip eğri çakıştırma yöntemi ile belirlenmesi aşamasında grafiksel ve/veya kişisel hatalar yapılabilmektedir. Özellikle gözlem kuyularının pompaj kuyusuna yakın olduğu durumlarda $s - t$ grafiği üzerindeki eğrilik düşük olacağından belirlenen parametre değerleri yanlış olabilmektedir. Bunun yanında özellikle sızıntılı akiferlerde tip eğri bir eğri ailesi ile temsil edildiğinden dolayı doğru eğrinin el ile belirlenmesi zor olabilmektedir. Bu nedenle bu çalışma kapsamında hem basınçlı akiferlerde hem de sızıntılı akiferlerde tip eğri çakıştırma sürecini sistematik bir şekilde yapabilecek optimizasyon tabanlı bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşıma ait kavramsal model Şekil 3 üzerinde gösterilmiştir. Görüleceği gibi ilk olarak $s - t$ ve $W(u) - 1/u$ (sızıntılı akiferler için $W(u, r/B) - 1/u$) grafikleri çizilerek eksenleri tam olarak çakışacak şekilde kavramsal olarak üst üste yerleştirilmektedir. Ardından s değerleri ile $W(u)$ değerleri arasındaki hata (Şekil 3 üzerinde gösterilen e_t değerlerinin toplamı) minimum olacak şekilde $s - t$ grafiği $W(u) - 1/u$ grafiği üzerinde hareket ettirilmiştir.



Şekil 3 - Önerilen yaklaşıma ait kavramsal model

Akifer parametrelerinin Şekil 3’de verilen tarzda bir yaklaşımla belirlenmesine yönelik olarak ulaşılabilen tek çalışma Cleveland [12] tarafından gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışma kapsamında tip eğri ve pompaj testi sonuçları elektronik tablolama platformu üzerinde çizdirilmiş ve bunların birbirine göre konumu iki parametre kullanılarak değiştirilmiştir. Bu parametre değerleri ise deneme-yanılma ile belirlenerek klasik olarak yapılan eğri çakıştırma işlemi otomatik hale getirilmeye çalışılmıştır. Bu çalışma kapsamında ise Cleveland [12]’den farklı olarak bu süreç tamamen sistematik olarak bir optimizasyon süreci ile gerçekleştirilmektedir. Bu kapsamda yatay ve düşey yönde meydana gelen bu hareket tanımlanmış olan dt ve ds değerlerinin optimizasyon modelinde karar değişkeni olarak kullanılması ile otomatik olarak gerçekleştirilmektedir. Bu bağlamda optimizasyon modelinde amaç fonksiyonu olarak Nash-Sutcliffe (NS) model etkinlik katsayısı kullanılmış olup düşü ve kuyu fonksiyonu değerleri arasında hesaplanan bu fonksiyonun maksimizasyonu amaçlanmıştır. Önerilen yaklaşıma ait amaç fonksiyonu ve kısıtlar aşağıda verilmiştir:

Amaç Fonksiyonu:

$$NS = \max \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (s^*(t_i) - W(t_i^*))^2}{\sum_{i=1}^n (s^*(t_i) - \bar{s}^*)^2} \right) \quad (8)$$

Kısıtlar:

$$\begin{aligned} \log(t_i^*) &= \log(t_i) + \log(dt) \\ &\downarrow \\ t_i^* &= t_i \times dt \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \log(s^*(t_i)) &= \log(s(t_i)) + \log(ds) \\ &\downarrow \\ s^*(t_i) &= s(t_i) \times ds \end{aligned} \quad (10)$$

$$t_i \in [t_1, t_2, t_3, \dots, t_n] \quad (11)$$

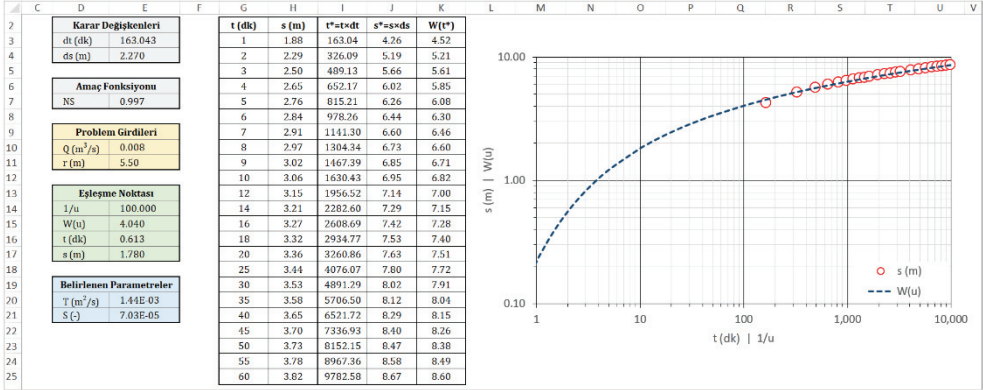
burada n , pompaj testinde ölçümlerin alındığı zaman adımı sayısını; ds , düşü değerleri üzerine eklenen düşey ötelenme miktarını; dt , zaman değerleri üzerine eklenen yatay ötelenme miktarını; t_i , i nolu adım için pompajın başladığı andan itibaren ölçülen zamanı ($i = 1, 2, 3, \dots, n$); t_i^* , dt değeri kullanılarak yatay yönde ötelenmiş zaman değerini; $s(t_i)$, t_i nolu zaman adımında ölçülen düşü değerini; $s^*(t_i)$, ds değeri kullanılarak düşey yönde ötelenmiş düşü değerini; $W(t_i^*)$; t_i^* değeri için hesaplanmış Theis kuyu fonksiyonu değerini (sızıntılı akifer için $W(t_i^*, r/B)$ şeklinde kullanılan Hantush kuyu fonksiyonu değerini) ve \bar{s}^* ise $s^*(t_i)$ değerlerinin ortalamasını göstermektedir.

Denklem (8)-(11)’den görüleceği gibi, eğri çakıştırma işlemi esnasında pompaj testi sonucu belirlenen düşü değerleri ile tip eğri üzerinde bulunan kuyu fonksiyonu değerleri aynı amaç fonksiyonu içerisinde işleme alınmaktadır. Bu kapsamda çakıştırılan eğrilerin birbirine paralel olan eksenleri aynı davranışı gösterdiğinden $1/u$ değerleri t_i^* değerlerine karşılık gelmektedir. Bunun sonucu olarak Şekil 3’de verilen kavramsal modeldeki gibi iki grafik üst

üste konularak öteleme yapılmamakta; bunun yerine aynı t_i^* değerlerine karşılık gelen $s^*(t_i)$ ve $W(t_i^*)$ arasındaki ilişki dikkate alınarak model etkinliği (NS) hesaplanmaktadır. Bu aşamada Şekil 3 üzerinde belirtilen yatay ve düşey ötelenme miktarları (dt ve ds) ilgili grafik eksenleri logaritmik ölçekte olduğu için Denklem (9) ve (10)'da belirtildiği şekilde toplama yerine logaritma dönüşümü ile çarpım işlemi olacak şekilde hesaplamalara dahil edilmektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli bir husus Denklem (8)-(11) arasında verilen amaç fonksiyonu ve kısıtların sürekli yapıda olduğudur. Ayrıca matematiksel açıdan çok karmaşık amaç fonksiyonu ve kısıtlara sahip olmadığından dolayı özellikle deterministik tabanlı optimizasyon teknikleri ile ilgili problemin çözümü mümkün olabilmektedir.

Önerilen yaklaşımla ilgili problem formülasyonunun tanımlanmasının ardından ilgili problemin GRG optimizasyon tekniği kullanılarak çözümü aşamasına geçilmiştir. GRG ilk olarak Lasdon ve diğ. [13] tarafından geliştirilmiş ve çok değişkenli ve kısıtlı doğrusal olmayan problemleri çözebilen bir optimizasyon tekniğidir. Bu teknik ile amaç fonksiyonunun yanında verilen eşitsizlik kısıtları, pozitif tanımlanmış geçici değişkenler eklenerek eşitlik kısıtları haline dönüştürülmektedir. Bu aşamadan sonra amaç fonksiyonu ve dönüştürülmüş eşitlik kısıtları birinci mertebeden Taylor serisine açılarak amaç ve kısıt fonksiyonlarının belirlenen nokta için minimizasyonu sağlanabilmektedir. Bu işlemin yapılması aşamasında indirgenmiş gradyan yaklaşımı kullanılarak karar değişkenleri vektörü bağımlı ve bağımsız değişkenler haline dönüştürülerek gerekli eliminasyonların yapılmasının ardından ilgili problem çözülebilmektedir [13]. GRG, özellikle sürekli yapıda ve matematiksel çözüm uzayının konveks yapıda olduğu optimizasyon problemlerinin çözümünde oldukça etkin bir yöntem olup pek çok farklı optimizasyon probleminin çözümüne uygulanabilmektedir. GRG optimizasyon tekniği pratikte kullanılan elektronik tablolar programlarının (Excel®, Lotus®, Quattro Pro®, vb.) çoğunda bulunan Çözücü (Solver) eklentisinde de doğrusal olmayan optimizasyon motoru olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle bu çalışma kapsamında da geliştirilen optimizasyon tabanlı tip eğri çakıştırma yaklaşımının uygulaması Excel® elektronik tablolar platformu üzerinde Çözücü eklentisi kullanılarak yapılmıştır. Bu kapsamda Denklem (8)-(11) arasında verilen optimizasyon probleminin Excel® üzerinde modellenmiş hali Şekil 4'de verilmiş olup gerekli işlem adımları ise aşağıda maddeler halinde sunulmaktadır:

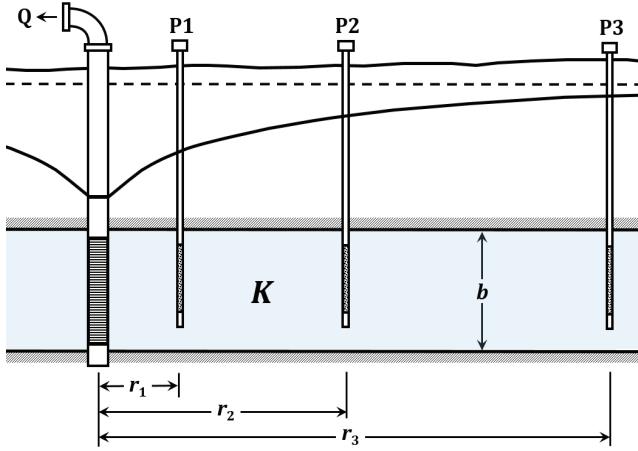
- Problemlerle alakalı girdiler E10:E11 hücrelerine, pompaj testi sonucunda kayıt altına alınan zaman-düşü değerleri G3:H25 hücrelerine girilmektedir.
- Optimizasyon modelinde kullanılacak karar değişkenleri E3:E4 hücrelerine, amaç fonksiyonu olarak kullanılacak NS değeri ise E7 hücresine girilmektedir.
- Denklem (9) ve (10) kapsamında belirlenecek t_i^* ve $s^*(t_i)$ değerleri ($i = 1,2,3,\dots,23$) belirlenen karar değişkeni değerleri için I3:J25 hücrelerinde hesaplanmaktadır.
- Hesaplanan t_i^* değerleri için Theis kuyu fonksiyonu $W(t_i^*)$ değerleri ise K3:K25 hücrelerinde hesaplanmaktadır. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli husus basınçlı ve sızıntılı akiferlerde kuyu fonksiyonu değerinin nasıl hesaplanacağıdır. Bu çalışma kapsamında basınçlı akiferler için Denklem (4)'de verilen k değerinin üst limiti 100 olacak şekilde Theis kuyu fonksiyonu değerleri hesaplanmaktadır.



Şekil 4 - Önerilen optimizasyon tabanlı tip eğri çıkıştırma yaklaşımının elektronik tablolaama programı üzerinde modellenmesi

- Sızıntılı akifer sistemleri için ise Denklem (6)'da verilen integral MATLAB ortamında nümerik olarak farklı u ve r/B değerleri için çözülmüş ve bir Hantush kuyu fonksiyonu tablosu oluşturulmuştur. Ardından çözüm aşamasında belirlenen u ve r/B değerleri için ilgili kuyu fonksiyonunun tabloda yer almayan ara değerleri çift yönlü doğrusal interpolasyon kullanılarak belirlenmiştir. Bununla beraber ilgili kuyu fonksiyonu değeri literatürde yer alan seri açılımına dayalı yaklaşımlar kullanılarak ta hesaplanabilmektedir [7, 11].
- Bu aşamanın ardından Çözücü eklentisinde maksimize edilecek amaç fonksiyonu olarak E7, karar değişkenleri olarak ise E3:E4 hücreleri seçilerek GRG optimizasyon tekniği ile ilgili problemin çözümü yapılmaktadır.
- Optimizasyon işleminin tamamlanması ve GRG ile optimum çözümün bulunmasının ardından tip eğri üzerinde bir eşleşme noktası seçilmiştir. Bu çalışma kapsamında eşleşme noktası olarak $1/u = 100$ ve buna karşılık gelen kuyu fonksiyonu değeri $W(u) = 4.040$ seçilmiştir. Seçilen bu değerler E14:E15 hücrelerinde belirtilmektedir. Eşleşme noktasının sonuçlar üzerinde bir etkisi bulunmadığı için bu nokta dışında başka bir eşleşme noktası da seçilebilmektedir.
- Bu eşleşme noktalarına karşılık gelen zaman-düşü değerleri ise model tarafından otomatik olarak belirlenmekte ve E16:E17 hücrelerinde verilmektedir.
- Belirlenen bu dört değerın basınçlı akiferler için Denklem (1) ve (2)'de yerine konulmasıyla akifer hidrojeolojik parametreleri belirlenebilmektedir.

Sonuç olarak geliştirilen yaklaşım kapsamında karar değişkeni olarak basınçlı akifer sistemlerinde dt ve ds , sızıntılı akifer sistemlerinde ise dt , ds ve r/B alınmış ve NS değeri GRG optimizasyon tekniği ile maksimize edilecek şekilde ilgili problemin çözümü yapılmaktadır.



Şekil 5 - Uygulama 1 kapsamında kullanılan akifer enkesiti

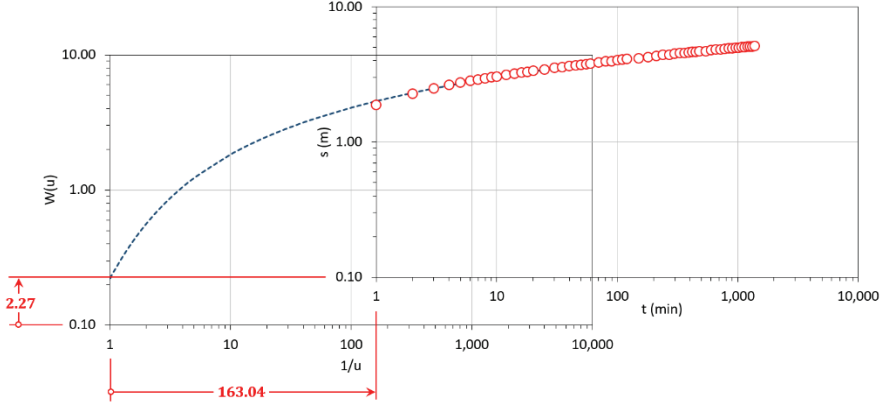
3. SAYISAL UYGULAMALAR

Geliştirilen optimizasyon tabanlı tip eğri çakıştırma yaklaşımının performansı Kresic [9]'de verilen ve basınçlı ve sızıntılı akiferlerde yapılan iki pompaj test verisi üzerinde test edilmiştir. Her iki uygulama için elde edilen sonuçlar literatürde verilen sonuçlarla belirlenen parametre değerleri ve bilgi-işlem yükleri bakımından karşılaştırılmıştır.

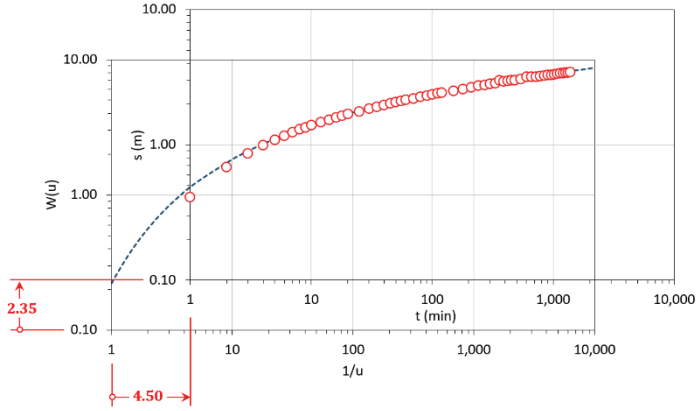
3.1. Uygulama 1: Basınçlı Akifer

Bu uygulama kapsamında dikkate alınan basınçlı akifer modeli Şekil 5'de verilmiştir. Görüleceği gibi, basınçlı akifer sisteminde bir pompaj kuyusu ve üç adet piyezometre bulunmaktadır. Bu piyezometrelerin pompaj kuyusuna olan mesafeleri sırasıyla $r_1 = 5.5$ m, $r_2 = 40.5$ m, ve $r_3 = 118$ m olarak verilmiştir. Akiferin verilen enkesit boyunca yatay olduğu ve kalınlığının sabit $b = 18$ m olduğu kabul edilmiştir. Bu kapsamda akifer sistemine ait T ve S değerlerini belirlemek üzere $Q = 0.008$ m³/s alınarak 24 saatlik bir pompaj testi yapılmış ve P1, P2 ve P3 nolu piyezometrelerde gözlenen düşü miktarları kaydedilmiştir. Her bir piyezometre için kaydedilen düşü değerleri Ek A'da verilmiştir. Her bir piyezometre için kaydedilmiş zaman-düşü değerleri kullanılarak geliştirilen yaklaşım çalıştırılmış ve Şekil 6'da verilen sonuçlar elde edilmiştir. Görüleceği gibi, yatay ve düşey yönde en büyük öteleme P1 piyezometresinde gözlenmiştir. Bunun nedeni P1'in pompaj kuyusuna en yakın piyezometre olması ve bunun neticesinde de $s-t$ grafiğindeki en düşük eğriliğin bu piyezometre için gözlenmiş olduğudur. Elde edilen bu sonuçlar için belirlenen T ve S değerleri Kresic [9] ile Ayvaz ve Gürarlan [2] tarafından bulunan sonuçlarla Çizelge 1'de karşılaştırılmıştır. Çizelge 1'de verilen sonuçlardan Kresic [9] kapsamında ilgili parametreler eğrilerin el ile çakıştırılması sonucu elde edilmiştir. Buna karşın Ayvaz ve Gürarlan [2] kapsamında ise ilgili parametreler akifer sistemi için pompaj debisi-düşü değeri arasındaki ilişkiye ait yaklaşık analitik modelin sezgisel armoni araştırması optimizasyon tekniğine entegre edilmesiyle belirlenmiştir.

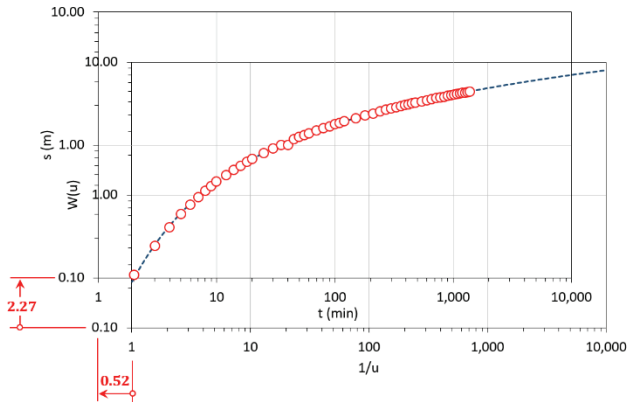
P1



P2



P3



Şekil 6 - Uygulama 1 kapsamında geliştirilen yaklaşım kullanılarak karşılaştırılan eğriler ve belirlenen dt ve ds değerleri

Çizelge 1 - Uygulama 1 için her bir piyezometrede belirlenen T ve S değerleri

	P1		P2		P3	
	T (m^2/d)	S ($\times 10^{-5}$)	T (m^2/d)	S ($\times 10^{-5}$)	T (m^2/d)	S ($\times 10^{-5}$)
Kresic [9]	119.23	8.70	130.46	4.70	129.60	5.20
Ayvaz ve Gürarlan [2]	127.87	5.69	129.60	4.81	129.60	5.10
Önerilen yaklaşım	124.70	7.02	129.01	4.85	130.44	4.97

Çizelge 2 - Uygulama 1 için her bir piyezometrede belirlenen NS değerleri ve iterasyon sayıları

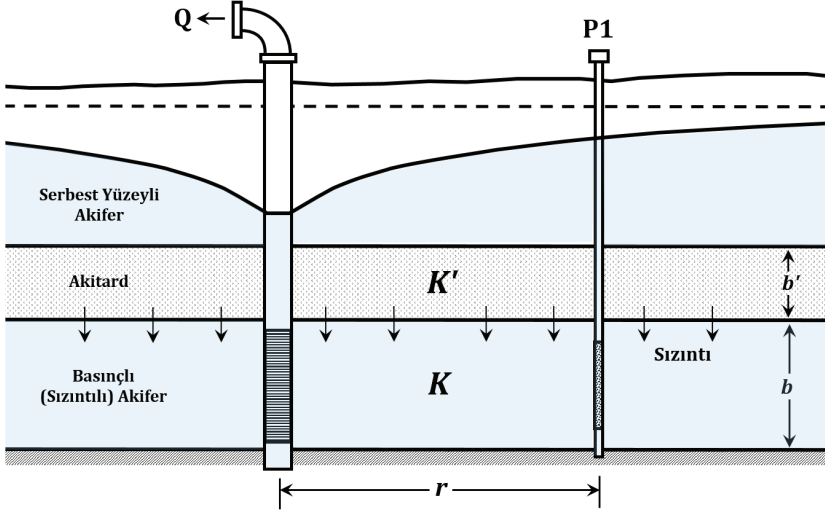
	NS			İterasyon sayısı		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3
Kresic [9]*	0.9861	0.9992	0.9998	-	-	-
Ayvaz ve Gürarlan [2]	0.9987	0.9993	0.9998	1494	6378	9196
Önerilen yaklaşım	0.9977	0.9993	0.9998	24	14	7

* Belirtilen NS değerleri Çizelge 1’de verilen değerlerin geliştirilen yaklaşımda yerine konulmasıyla hesaplanmıştır.

Çizelge 1’den görüleceği gibi, P2 ve P3 piyezometreleri için geliştirilen model tarafından belirlenen T ve S değerleri ile literatürde belirlenen değerler iyi uyum içindedir. Buna karşın P1 için elde edilen sonuçlarda ufak farklılıklar bulunmaktadır. Bu farklılığın temel nedeni daha önceden belirtilen P1’in pompaj kuyusuna en yakın kuyu olmasıdır. Bu nedenden dolayı özellikle el ile çakıştırma yönteminde elde edilen sonuçların grafik üzerindeki eğriliğinin az olmasından dolayı parametrelerin belirlenmesindeki doğruluk derecesi düşmektedir. Belirlenen bu parametre değerleri için elde edilen amaç fonksiyonu değerleri ve çözüme ulaşmak için gerekli iterasyon sayıları Çizelge 2’de verilmiştir. Görüleceği gibi, önerilen yaklaşım kullanılarak belirlenen amaç fonksiyonu değeri her üç piyezometre için 0.99’un üzerindedir. Benzer sonuçlar Kresic [9] ile Ayvaz ve Gürarlan [2] kapsamında da elde edilmiş olup en düşük performans el ile çakıştırma sonucu P1 nolu piyezometrede gözlenmiştir. Elde edilen sonuçlar gerekli iterasyon sayıları bakımından karşılaştırıldığında ise önerilen yaklaşımın Ayvaz ve Gürarlan [2] kapsamında kullanılan sezgisel armoni araştırması optimizasyon tekniğine oranla çok çok daha az iterasyon gerektirdiği açıkça görülmektedir. Bunun sonucu olarak önerilen yaklaşım ile çok daha kısa bilgi işlem sürelerinde optimum değerlere ulaşılabilir.

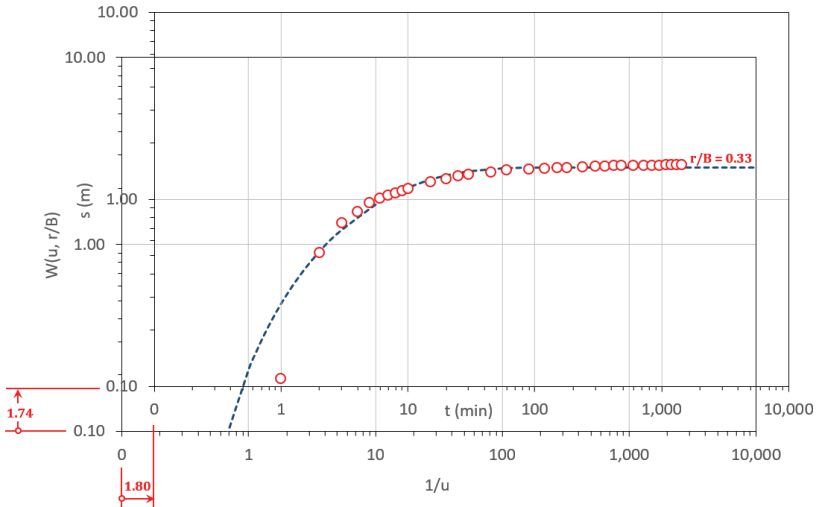
3.2. Uygulama 2: Sızıntılı Akifer

Bu uygulama kapsamında dikkate alınan sızıntılı akifer modeli Şekil 7’de verilmiştir. Görüleceği gibi akifer sistemi en yukarıda serbest yüzeyle en aşağıda ise basınçlı bir akiferden oluşmaktadır. Bu iki akiferin arasında sızdırmalı geçirimsiz bir katman bulunmaktadır. Modelde 24 saat boyunca $Q = 0.012 \text{ m}^3/s$ ile çekim yapılan bir adet pompaj kuyusu ve düşü değerlerinin kaydedildiği ve kuyudan uzaklığı $r = 128 \text{ m}$ olan bir adet piyezometre bulunmaktadır. Yapılan bu test kapsamında elde edilen veriler Ek B’de verilmiştir.



Şekil 7 - Uygulama 2 kapsamında kullanılan akifer enkesiti

Şekil 7'den görüleceği gibi kuyudan çekim yapılması sonucu aşağıya doğru oluşan akış gradyanından dolayı serbest yüzeyli akifer bünyesinde bulunan yeraltı suyu sızdırmalı geçirimsiz katman üzerinden basınçlı akiferde doğru hareket etmektedir. Yapılan pompaj testi sonucunda kayıt altına alınmış zaman ve düşü değerleri kullanılarak geliştirilen yaklaşımın çalıştırılması sonucunda elde edilen sonuç Şekil 8'de verilmiştir.



Şekil 8 - Uygulama 2 kapsamında geliştirilen yaklaşım kullanılarak çakıştırılan eğriler ve belirlenen dt , ds ve r/B değerleri

Çizelge 3 - Uygulama 2 için belirlenen parametreler, NS değerleri ve iterasyon sayıları

	T (m^2/d)	S ($\times 10^{-5}$)	B (m)	r/B	NS	İterasyon sayısı
Kresic [9]*	257.47	1.09	640.00	0.20	0.0698	-
Ayvaz ve Gürarlan [2]	160.48	1.25	460.03	0.28	0.9792	9076
Önerilen yaklaşım	143.30	1.35	387.52	0.33	0.9787	20

* Belirtilen NS değerleri parametre değerlerinin geliştirilen yaklaşımda yerine konulmasıyla hesaplanmıştır

Şekil 8'den görüleceği gibi basınçlı akiferde incelenen durumdan farklı olarak bu uygulama kapsamında dt ve ds 'in yanında r/B de karar değişkeni olarak alınmış ve optimizasyon modeli tarafından belirlenen r/B değeri için çift yönlü doğrusal interpolasyon ile kuyu fonksiyonu belirlenmiştir. Belirlenen bu çözüm için geliştirilen yaklaşım tarafından belirlenen hidrojeolojik parametre değerleri, amaç fonksiyonu değerleri ve çözüme ulaşmak için gerekli iterasyon sayıları detaylı olarak Çizelge 3'de karşılaştırılmıştır. Görüleceği gibi, farklı eğrilerden oluşan sistemde geliştirilen yaklaşım en iyi eşleşmeyi $r/B = 0.33$ eğrisi üzerinde bulmuştur. Buna karşın Ayvaz ve Gürarlan [2] ve Kresic [9] kapsamında en iyi eşleşme sırasıyla $r/B = 0.28$ ve $r/B = 0.20$ eğrileri üzerinde bulunmuştur. Bu değerler birbirinden farklı olduğu için sonuç olarak hesaplanan sızma faktörü B değerleri de farklı çıkmaktadır. B değerlerindeki farklılıktan dolayı hesaplanan T ve S değerleri birbirinden farklı çıkmaktadır. Genel anlamda önerilen optimizasyon tabanlı yaklaşım ile Ayvaz ve Gürarlan [2] tarafından belirlenen değerler birbirinden çok uzak olmasa da Kresic [9] tarafından el ile eğri çakıştırma yöntemi ile belirlenen parametre değerlerinde farklılıklar bulunmaktadır. Çizelge 3'de elde edilen sonuçlar amaç fonksiyonu değerleri bakımından karşılaştırıldığında ise önerilen yaklaşım ile Ayvaz ve Gürarlan [2] tarafından belirlenen NS değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Buna karşın Kresic [9] tarafından el ile yapılan eğri çakıştırma işlemi sonucunda belirlenen NS değerinin oldukça düşük olduğu açıkça görülmektedir. Bu sonuç sistematik bir çözüm yaklaşımı kullanılarak parametre kestirimi yapmanın belirlenen parametre değerleri üzerindeki olumlu etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Son olarak elde edilen sonuçların çözüme ulaşmak için gerekli iterasyon sayıları bakımından karşılaştırılması sonucu önerilen yaklaşımın Ayvaz ve Gürarlan [2] tarafından kullanılan armoni araştırması optimizasyon tekniğine göre çok daha az bilgi işlem yükü gerektirdiği sonucuna ulaşılmıştır.

4. TARTIŞMA

Yukarıda elde edilen sonuçlardan görüleceği gibi, önerilen optimizasyon tabanlı tip eğri çakıştırma yaklaşımı kullanılarak basınçlı ve sızıntılı akifer sistemlerine ait hidrojeolojik parametreler etkin bir şekilde belirlenebilmektedir. Bu bölümde önerilen yaklaşımın literatürde farklı çözüm teknikleri kullanılarak geliştirilmiş olan diğer yaklaşımlara göre avantaj ve dezavantajları tartışılacaktır.

Önerilen yaklaşım kapsamında basınçlı ve sızıntılı akifer sistemleri için yeraltısuyu akım süreci sırasıyla Theis ve Hantush yöntemleri kullanılarak modellenmiştir. Theis yöntemi kapsamında kuyu fonksiyonu Denklem (4) ile verilen serinin açılması suretiyle

hesaplanmıştır. Buna karşın Hantush yöntemi kapsamında ilgili kuyu fonksiyonu değerinin hesaplanabilmesi için Denklem (6)'da verilen integral farklı girdi değerleri için MATLAB ortamında nümerik olarak çözümlenerek tablo haline getirilmiştir. Tabloda yer almayan ara girdi değerleri için ilgili kuyu fonksiyonu değeri ise çift yönlü doğrusal interpolasyon kullanılarak belirlenmiştir. Bu işlem oldukça kolay olmakla beraber MATLAB ortamında hesaplama ve interpolasyon süreçlerini gerektirdiğinden dolayı bazı kullanıcılar tarafından karmaşık olarak değerlendirilebilmektedir. Bu kapsamda Hantush kuyu fonksiyonunun hesaplanması aşamasında bu işlemleri takip etmek yerine literatürde verilen seri açılımına dayalı çözüm yaklaşımları da [6-7, 11] kullanılabilir. Bu kapsamda Theis yönteminde olduğu gibi verilen girdi değerleri için Hantush kuyu fonksiyonu değeri doğrudan hesaplanabilir.

Literatürde pompaj test sonuçlarına göre akifer parametrelerinin optimizasyon teknikleri kullanılarak belirlendiği pek çok çalışma bulunmaktadır [1-3,6-7]. Bu çalışmaların dayandığı temel nokta Theis ve Hantush yöntemleri için seri açılımına dayalı yaklaşık analitik modeller kullanılarak hesaplanan düşü değerleri ile pompaj testi sonucunda ölçülen düşü değerleri arasındaki hata minimize edilecek şekilde akifer parametrelerinin belirlenmesidir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken en önemli husus yeraltı suyu ile alakalı optimizasyon problemlerine ait matematiksel çözüm uzayının konveks olmayan bir yapıya sahip olduğudur [5,14]. Bu tarz problemlerde elde edilen sonuçlar büyük oranda başlangıç çözümüne bağlı olmakta ve iyi bir başlangıç çözümü sunulmadıkça deterministik optimizasyon teknikleri ile global optimum çözüme ulaşılamamaktadır [7]. Bir diğer önemli husus ise seri açılımıyla hesaplanan kuyu fonksiyonu değerinin bazı parametre değerleri için tanımsız olabilmesi ve bunun sonucu olarak çözümde süreksizlikler oluşabilmesidir. Belirtilen bu iki problemin önüne geçebilmek için farklı başlangıç çözümleri kullanılarak optimizasyon sürecinin tekrarlanması ve her bir tekrar aşamasında karar değişkenleri için tanımlanan alt ve üst sınır değerlerine ait aralıkların daraltılması yoluna gidilmektedir [7]. Ancak, bu durumda bile elde edilen çözümün global optimum olma garantisi bulunmamaktadır. Bu nedenle seri açılımına dayalı yaklaşık analitik modeller ile problemin çözülebildiği ve sezgisel optimizasyon tekniklerinin kullanıldığı çözüm yaklaşımları geliştirilmiştir [1-3,6]. Sezgisel optimizasyon tekniklerinin deterministik yöntemlere göre en büyük avantajı herhangi bir özel başlangıç çözümüne gerek kalmadan konveks olmayan matematiksel çözüm uzayına sahip problemler için global optimumya yakın çözümlerin elde edilebilmesidir. Ancak bu teknikler genel olarak kısıtsız optimizasyon problemlerinin çözümü için geliştirilmiş olduklarından dolayı problemin kurulumu aşamasında sağlanması istenen kısıtlar ancak ceza fonksiyonu yaklaşımı gibi yaklaşımlar kullanılarak çözüme dahil edilebilmektedir. Bu tarz entegrasyonlar ise sonuçların çok daha uzun bilgi-işlem sürelerinde elde edilmesine neden olmaktadır.

Bu çalışma kapsamında önerilmiş olan optimizasyon tabanlı tip eğri çakıştırma yaklaşımında yukarıda belirtilmiş olan zorluklar meydana gelmemekte olup problemin çözümü başlangıç değerlerinden bağımsız olarak deterministik tabanlı GRG optimizasyon tekniği ile yapılabilmektedir. Önerilen yaklaşımla akifer parametre kestirim problemlerine ait konveks olmayan yapıdaki matematiksel çözüm uzayı probleme ait karar değişkenlerinin grafiklere ait yatay ve düşey öteleme miktarları oluştuğu için konveks bir yapıya dönüşmektedir. Bu sayede başlangıç değerlerinden bağımsız olarak global optimum çözümler deterministik tabanlı GRG optimizasyon tekniği ile kolaylıkla belirlenebilmektedir.

Bu kapsamda önerilen optimizasyon tabanlı tip eğri çakıştırma yaklaşımının yukarıda belirtilen sezgisel optimizasyon tekniklerine dayanan çözüm yaklaşımlarına göre bir diğer

avantajı ise çok daha kısa bilgi-işlem sürelerinde sonuca ulaşabilmesidir. Öyle ki, bu çalışma kapsamında incelenen iki uygulama Ayvaz ve Gürarlan [2] tarafından sezgisel armoni araştırması optimizasyon tekniği ile çözülmüştür ve Uygulama 1'in çözümü her bir piyezometre için sırasıyla 1494, 6378 ve 9196 iterasyonda tamamlanmıştır (Çizelge 2). Uygulama 1'in önerilen optimizasyon tabanlı tip eğri çakıştırma yaklaşımı ile çözümü ise her bir piyezometre için sırasıyla 24, 14 ve 7 iterasyonda tamamlanmıştır. Benzer şekilde Uygulama 2'nin çözümü Ayvaz ve Gürarlan [2] tarafından 9076 iterasyonda yapılabilirken aynı işlem önerilen yaklaşımla 20 iterasyonda tamamlanabilmektedir (Çizelge 2). Elde edilen bu sonuçlar önerilen optimizasyon tabanlı tip eğri çakıştırma yaklaşımının literatürde verilen diğer yaklaşımlarla rekabet edebilecek bir yaklaşım olduğu sonucunu doğurmuştur.

5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında akifer hidrojeolojik parametrelerinin otomatik olarak belirlenebildiği optimizasyona dayalı bir tip eğri çakıştırma yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşımın en büyük avantajı sistematik ve kolay bir yaklaşım kullanılarak akifer hidrojeolojik parametrelerinin belirlenebilmesidir. Ayrıca pompaj test sonuçlarına bağlı olarak parametre kestirimi yapılan simülasyon-optimizasyon modellerine göre en büyük avantajı deterministik bir çözüm yaklaşımı kullanılarak optimum çözüme literatürdeki çalışmalardan çok daha kısa sürede ulaşılabilmesidir. Geliştirilen yaklaşımın performansı basınçlı ve sızıntılı akifer sistemleri için yapılmış iki pompaj test verisi kullanılarak değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar literatürde verilenle sonuçlarla doğruluk ve yakınsama performansları bakımından karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar geliştirilen yaklaşım kullanılarak akifer hidrojeolojik parametrelerinin etkin bir şekilde ve literatürde verilen diğer optimizasyon tabanlı yaklaşımlardan çok daha hızlı bir şekilde belirlenebileceğini göstermiş ve önerilen yaklaşımın pompaj test sonuçlarına kolaylıkla uygulanabileceğini göstermiştir.

Bilgilendirme

Bu çalışma kapsamında geliştirilen optimizasyon tabanlı tip eğri çakıştırma yaklaşımına ait Excel® dosyası makale yazarları ile e-posta aracılığı ile iletişime geçilmesi halinde ücretsiz olarak temin edilebilecektir.

Kaynaklar

- [1] Huang, Y. C., Yeh, H. D., Lin, Y. C., A computer method based on simulated annealing to identify aquifer parameters using pumping-test data. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.*, 32, 235–249, 2008.
- [2] Ayvaz, M. T., Gurarlan, G., Identification of the aquifer parameters from pumping test data by using a hybrid optimization approach. 13th International Conference on Hydroinformatics (HIC 2018), Palermo, Italy, Jul 1-6, 2018.
- [3] Sahin, A. U., A particle swarm optimization assessment for the determination of non-darcian flow parameters in a confined aquifer. *Water Resour. Manag.*, 32, 751–767, 2008.

- [4] Sun, N.Z., *Inverse Problems in Groundwater Modeling*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, the Netherlands, 1994.
- [5] Willis, R., Yeh, W. W. G., *Groundwater System Planning and Management*. Prentice Hall, New Jersey, 1987.
- [6] Samuel, M. P., Jha, M. K., Estimation of aquifer parameters from pumping test data by genetic algorithm optimization technique. *J. Irrig. Drain. Eng.*, 129, 348–359, 2003.
- [7] Brown, C. J., Using Solver to Estimate Aquifer Parameters for Non-Leaky and Leaky Unsteady Confined Aquifer Tests. *Environmental and Engineering Geoscience*, 19, 253-263, 2013.
- [8] Theis, C. V., The relation between the lowering of the Piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. *Trans. Am. Geophys. Union*, 16, 519, 1935.
- [9] Kresic, N., *Quantitative solutions in hydrogeology and groundwater modeling*, 1st ed. CRC Press, New York, 1997.
- [10] Hantush, M. S., Jacob, C. E., Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Am. Geophys. Union* 36, 95–100, 1955.
- [11] Veling, E. J. M., Maas, C., Hantush well function revisited. *Journal of Hydrology*, 393, 381–388, 2010.
- [12] Cleveland, T. G., Type-Curve Matching using a Computer Spreadsheet, *Groundwater*, 34(3), 554-562, 1996.
- [13] Lasdon, L. S., Waren, A. D., Jain, A., Ratner, M., Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming. *ACM Trans.on Math. Software*, 4(1), 34–49, 1978.
- [14] McKinney, D.C., Lin, M.-D., Genetic algorithm solution of groundwater management models. *Water Resources Research*, 30(6), 1897–1906, 1994.
- [15] Ayvaz, M. T., Gurarslan, G., An optimization based curve matching approach for identifying the hydrogeological parameters of the confined and leaky-confined aquifers. *Geophysical Research Abstracts*, 20, EGU2018-5848, 2018.

Ek A - Uygulama 1’de kullanılan test verileri

Zaman (dk)	s(m)			Zaman (dk)	s(m)		
	P1	P2	P3		P1	P2	P3
1	1.875	0.412	0.041	120	4.115	2.437	1.507
2	2.288	0.684	0.105	150	4.175	2.513	1.593
3	2.495	0.862	0.175	180	4.254	2.59	1.667
4	2.651	0.992	0.241	210	4.319	2.655	1.731
5	2.757	1.092	0.302	240	4.408	2.73	1.792
6	2.839	1.172	0.357	270	4.429	2.765	1.839
7	2.906	1.24	0.407	300	4.498	2.824	1.887
8	2.965	1.298	0.451	330	4.537	2.862	1.926
9	3.016	1.348	0.492	360	4.574	2.989	1.963
10	3.06	1.394	0.53	390	4.607	2.931	1.996
12	3.146	1.471	0.594	420	4.637	2.961	2.027
14	3.212	1.535	0.65	450	4.666	2.989	2.056
16	3.267	1.592	0.7	480	4.692	3.016	2.083
18	3.316	1.641	0.745	540	4.718	3.054	2.128
20	3.36	1.686	0.786	600	4.791	3.177	2.178
25	3.436	1.771	0.87	660	4.822	3.181	2.217
30	3.534	1.854	0.94	720	4.861	3.188	2.253
35	3.579	1.913	1.002	780	4.894	3.22	2.285
40	3.651	1.974	1.005	840	4.924	3.25	2.315
45	3.702	2.024	1.104	900	4.952	3.277	2.343
50	3.73	2.064	1.147	960	4.977	3.303	2.37
55	3.782	2.108	1.186	1020	5.002	3.328	2.394
60	3.821	2.145	1.222	1080	5.024	3.351	2.418
70	3.868	2.202	1.283	1140	5.046	3.372	2.44
80	3.945	2.268	1.338	1200	5.066	3.393	2.461
90	3.975	2.309	1.387	1260	5.085	3.412	2.481
100	4.036	2.361	1.431	1320	5.105	3.434	2.501
110	4.076	2.401	1.471	1380	5.124	3.453	2.52

Ek B - Uygulama 2’de kullanılan test verileri

Zaman (dk)	s(m)	Zaman (dk)	s(m)	Zaman (dk)	s(m)
1	0.11	20	1.28	360	1.5
2	0.52	25	1.33	420	1.51
3	0.75	30	1.36	480	1.51
4	0.86	45	1.39	600	1.51
5	0.96	60	1.43	720	1.51
6	1.01	90	1.45	840	1.52
7	1.05	120	1.46	960	1.52
8	1.08	150	1.47	1080	1.53
9	1.11	180	1.48	1200	1.53
10	1.14	240	1.49	1320	1.53
15	1.24	300	1.5	1440	1.53

Kanalizasyon Sistemlerinin Diferansiyel Evrim Algoritması Kullanılarak Optimum Tasarımı

Erhan TAN¹
Derya SADAK²
M. Tamer AYVAZ³

ÖZ

Bu çalışmada kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımının yapılabildiği diferansiyel evrim (DE) optimizasyon tekniğine dayanan bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşımda her bir boruya ait eğim değeri optimizasyon modelinde karar değişkeni olarak kullanılmakta ve bu değerler için toplam sistem maliyeti minimize edilecek şekilde belirlenen piyasa çapları içerisinde boru çapları seçilmektedir. Optimizasyon işlemi esnasında sağlanması gereken fiziksel ve yönetsel kısıtların tümü penaltı fonksiyonu yaklaşımı kullanılarak optimizasyon modeline dahil edilmiştir. Geliştirilen yaklaşımın performansı iki örnek sistem üzerinde test edilmiş ve literatürde verilenlere benzer veya daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kanalizasyon sistemi, optimum tasarım, optimizasyon.

ABSTRACT

Optimum Design of Sewer Systems by using Differential Evolution Algorithm

In this study, a solution approach which is based on the differential evolution (DE) optimization method is developed for optimum design of the sewer systems. In the developed approach, the slope of each pipe is used as the decision variable of the optimization model and the diameters are selected from the available diameters in market for minimizing the total system cost. All the physical and managerial constraints to be satisfied during the optimization process is included to the model by using the penalty function approach. The

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 18 Mart 2019 günü ulaşmıştır. 17 Eylül 2019 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 30 Kasım 2020 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://dx.doi.org/10.18400/tekderg.541507>

1 Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği ABD, Denizli - erhan091@hotmail.com - <https://orcid.org/0000-0003-4326-8982>

2 Sakarya Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya - deryasadak@sakarya.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-5306-9253>

3 Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Denizli - tayvaz@pamukkale.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-8566-2825>

performance of the proposed approach is tested on two example systems and similar or better results are obtained compared to the obtained results given in literature.

Keywords: Sewer system, optimum design, optimization.

1. GİRİŞ

Kanalizasyon sistemlerinin minimum maliyetli tasarımı son yıllarda geçerliliğini koruyan önemli bir mühendislik problemidir. Bu sistemlerin kurulum maliyetindeki ufak bir düşüş, ekonomik anlamda büyük miktarda tasarruf edilmesine karşılık gelmektedir. Bu nedenden dolayı kanalizasyon sistemlerinin ilk yatırım maliyetinin hidrolik ve işletme kısıtlarına bağlı olarak minimize edilmesi literatürde dikkate alınan önemli optimizasyon problemleri arasında yer almaktadır. Bu optimizasyon probleminin çözülebilmesi için öncelikle sistemin kurulacağı yerleşim yerine ait imar planı ve arazi topoğrafyası incelenerek kanalizasyon sisteminin geçeceği güzergah ile akış yönleri belirlenmekte ve hidrolik tasarım aşamasına geçilmektedir. Belirlenen kriterler doğrultusunda kurulan hidrolik model ardından kullanılacak optimizasyon modeline entegre edilerek farklı karar değişkeni değerleri için sistemin hidrolik açıdan verdiği tepki belirlenebilmektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri optimizasyon modeli kapsamında karar değişkeni olarak kullanılacak ve sistem yatırım maliyetini etkileyen faktörlerin doğru bir şekilde belirlenmesidir. Bu kapsamda sistem maliyetini etkileyen ana faktörler boru çapları ve eğimleridir. Literatürde boru çap ve eğimlerinin karar değişkeni olarak seçilmesinde aşağıdaki üç durumla karşılaşmaktadır [1]: *i)* karar değişkeni olarak boru çaplarının kullanılması; *ii)* karar değişkeni olarak boru eğimlerinin kullanılması; *iii)* karar değişkeni olarak hem boru çaplarının hem de boru eğimlerinin kullanılması. Birinci durumun seçilmesi halinde her bir borunun çapı optimizasyon modeli tarafından belirlenmektedir. Bu durumda boru eğimleri mevcut debi ve enkesit bilgilerinin Manning denklemine konulması ile dolaylı olarak belirlenebilmektedir. İkinci durumda ise karar değişkeni olarak boru eğimleri kullanılmakta ve boru çapları yine Manning denklemi yardımıyla belirlenebilmektedir. Bu aşamada piyasada bulunan boru çapları ile tasarım yapılması gerektiğinden dolayı problemin çözümü boru eğimleri bakımından sürekli, boru çapları bakımından ise kesikli olmaktadır. Üçüncü durumda ise hem boru çapları hem de boru eğimleri optimizasyon modelinde karar değişkenleri olarak kullanılmakta olup en genel durum için çözüm bu durumda elde edilmektedir. Ancak karar değişkeni sayısının artması ile matematiksel çözüm uzayının büyümesi çözüme ulaşmayı güçleştirmektedir [1].

Bu noktada dikkat edilmesi gereken diğer bir önemli husus ise her üç durum için belirlenen değişken değerleri için boru çap ve eğimlerinin birbiri ile sıkı bir etkileşim halinde olduğudur. Örnek olarak boru eğiminin artırılması aynı debinin daha küçük çaplı bir boru ile iletilmesine imkan sağlarken kazı maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Boru eğimlerinin azaltılması durumunda ise tam tersi olarak daha büyük çaplı ve dolayısıyla daha maliyetli boruların kullanılması gerekmektedir. Bu kapsamda bu değişkenler arasındaki en uygun dengenin (trade-off) optimizasyon modelleri kullanılarak belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Yukarıda verilen 3 farklı durum için literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde ilgili problemin çözümünün hem doğrusal [2-3] hem de doğrusal olmayan [4-5] programlamaya dayanan çözüm yaklaşımları kullanılarak yapılmış olduğu görülmektedir. Ancak genel anlamda kanalizasyon sistemlerindeki boruların seri bağlı yapılarından dolayı ilgili

optimizasyon probleminin çözümünde dinamik programlamaya dayanan çözüm yaklaşımları yaygın olarak kullanılmıştır [6-10]. Bu yaklaşımlar genel olarak kanalizasyon sistemleri gibi seri bağlı sistemlere kolayca uygulanabilir olduğu halde sürekli ve ayrık yapıdaki karar değişkenlerinin aynı anda bulunduğu problemlerin çözümünün zor oluşu, hidrolik kısıtlarının sağlanmasındaki güçlük ve lokal optimum çözümlere yakalanma riskinin yüksek oluşu gibi nedenlerden dolayı her durumda optimum olarak çözülemeyebilmektedir [11]. Bu nedenle sezgisel optimizasyon tekniklerinin kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımında kullanımı yaygınlık kazanmıştır. Sezgisel optimizasyon teknikleri genel olarak doğada karşılaşılan süreçlerin matematiksel benzeşiminin optimizasyon problemlerinin çözümüne uyarlanması esas almaktadır. Geleneksel optimizasyon teknikleri ile karşılaştırıldıklarında sezgisel optimizasyon tekniklerinin en büyük avantajı birden çok aday çözüm ile özel bir başlangıç çözümüne gerek duyulmadan global optimum veya global optimuma yakın çözümlerin elde edilebilmesidir. Bu yöntemler ile ayrıca matematiksel çözüm uzayının sürekli ve içbükey-dışbükey olmaması durumlarında da optimum çözüme ulaşabilmektedir [12].

Literatürde kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarım probleminin çözümünde sezgisel optimizasyon tekniklerinin kullanıldığı farklı çözüm yaklaşımları bulunmaktadır. Bu çözüm yaklaşımları çözülen problemler bakımından farklılıklar gösterse de genel olarak aralarındaki temel fark kullanılan optimizasyon tekniklerinin farklılığından kaynaklanmaktadır. İlgili problemin çözümünde literatürde yaygın olarak genetik algoritma (GA) [1, 13-17], parçacık sürü optimizasyon tekniği (PSO) [18-21], karınca kolonisi optimizasyonu (KKO) [22-27], tavlama benzetimi (TB) [11, 28-29], tabu arama (TA) [11, 30-31] gibi optimizasyon teknikleri kullanılmış olmasına rağmen diferansiyel evrim (DE) optimizasyon tekniğinin kullanıldığı çalışma sayısı oldukça kısıtlıdır. Bu kapsamda yazarlar tarafından ulaşılabilen tek çalışma Liu ve diğ. [32] tarafından gerçekleştirilmiştir. İlgili çalışma kapsamında kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımı amacıyla yeni bir DE yaklaşımı önerilmiş ve karar değişkeni olarak kesikli yapıdaki boru çapları kullanılarak iki örnek uygulama çözülmüştür. Bu çalışma kapsamında ise Liu ve diğ. [32]'de yapılandırılmış farklı olarak ilgili problemin DE ile çözümü aşamasında karar değişkeni olarak boru eğimleri kullanılmış ve belirlenen eğim değerleri için uygun boru çapları tanımlanan boru çapı kümesi içerisinde seçilmiştir. Bu sayede ilgili optimizasyon problemi sürekli bir çözüm uzayı üzerinde çözülmüştür. Çözüm aşamasında gerekli hidrolik ve işletme kısıtlarının tümü ceza fonksiyonu yaklaşımı ile amaç fonksiyonuna dahil edilmiştir. Geliştirilen çözüm yaklaşımının performansı literatürde verilen iki örnek sistem üzerinde farklı çözüm parametreleri ve rastgele sayı üreteçleri kullanılarak test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar DE tabanlı çözüm yaklaşımı ile literatürde farklı yaklaşımlar kullanılarak belirlenenlerle uyumlu sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir.

2. MODEL GELİŞTİRİLMESİ

Önceki bölümde belirtildiği gibi bu çalışma kapsamında kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarım problemi DE tabanlı bir çözüm yaklaşımı kullanılarak çözülmüştür. Bu işlemin yapılabilmesi için öncelikle ilgili problemin hidrolik ve işletme kısıtları dikkate alınarak formüle edilmesi gerekmektedir. Aşağıda öncelikle bu formülasyon verilmiş ve ardından DE optimizasyon tekniği ile sistem maliyeti minimum olacak şekilde optimum tasarımın nasıl yapıldığı konusunda bilgi verilmiştir.

2.1. Kanalizasyon Sistem Optimizasyonu

Kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımı problemi genel anlamda aşağıdaki amaç fonksiyonu ve kısıtlar kullanılarak ifade edilmektedir [1]:

$$\Phi = \min\{\sum_{k=1}^N \mathcal{F}(d_k, L_k, \bar{Z}_k)\} \quad (1)$$

Kısıtlar:

$$g_{k,1}: q_k \geq Q_k^* \quad (2)$$

$$g_{k,2}: V_k \leq V_{\max} \quad (3)$$

$$g_{k,3}: V_k \geq V_{\min} \quad (4)$$

$$g_{k,4}: \frac{y_k}{d_k} \leq \alpha \quad (5)$$

$$g_{k,5}: S_k \geq S_{\min} \quad (6)$$

$$g_{k,6}: E_k^u \leq E_{\max} \quad (7)$$

$$g_{k,7}: E_k^u \geq E_{\min} \quad (8)$$

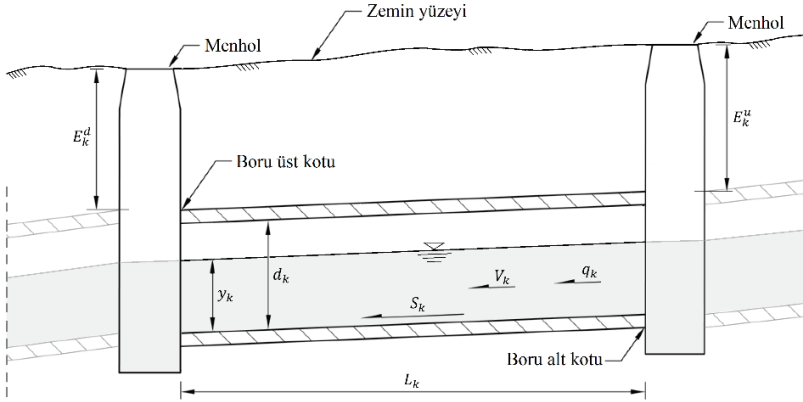
$$g_{k,8}: E_k^d \leq E_{\max} \quad (9)$$

$$g_{k,9}: E_k^d \geq E_{\min} \quad (10)$$

burada Φ , amaç fonksiyonu değerini; N , sistemdeki boru sayısını; d_k , k nolu borunun çapını; L_k , k nolu borunun uzunluğunu; \bar{Z}_k , k nolu borunun yerleştirilmesi için gerekli ortalama kazı derinliğini; $\mathcal{F}(\bullet)$, boru çap, uzunluk ve kazı giderlerini dikkate alarak hesaplanan toplam sistem maliyetini; q_k , k nolu boruda normal derinlik oluşturacak akım debisini; Q_k^* , k nolu boru için kullanılan tasarım debisini; V_k , k nolu borudaki akış hızını; V_{\min} ve V_{\max} , k nolu boru için tanımlanmış minimum ve maksimum akış hızlarını; y_k , k nolu borudaki su yüksekliğini; α , tüm borular için müsaade edilebilir maksimum doluluk oranını; S_k , k nolu borunun eğimini; S_{\min} , tüm borular için tanımlanan minimum taban eğimini; E_k^u ve E_k^d , k nolu borunun sırasıyla başlangıç ve bitiş noktaları üzerindeki dolgu kalınlığını; E_{\min} ve E_{\max} ise tüm borular için müsaade edilebilir minimum ve maksimum dolgu kalınlıklarını göstermektedir. Verilen bu büyüklükler detaylı olarak Şekil 1 üzerinde gösterilmiştir.

Yukarıda verilen kısıtlardan $g_{k,1}$, borular içindeki akım debisinin proje debisine eşit veya büyük olması; $g_{k,2}$ ve $g_{k,3}$, borular içindeki akım hızının yönetmeliklerde verilen minimum ve maksimum hız şartlarını sağlaması; $g_{k,4}$, borular içinde serbest yüzeyli akım profilinin sağlanması; $g_{k,5}$, borular için minimum taban eğimi koşulunun sağlanması; E_{\min} ve E_{\max} ise borular üzerindeki dolgu kalınlıklarının yönetmeliklerde verilen minimum ve maksimum değerler arasında kalmasını sağlamak amacıyla tanımlanmıştır. Bu noktada dikkat edilmesi

gereken önemli bir husus Denklem (1) ile (10) arasında verilen matematiksel formülasyonun basitleştirilmiş kanalizasyon sistemleri için tanımlanmış olduğudur. Daha genel bir problemin çözümünde tek bir tasarım debisi kullanmak yerine bu debinin zamanla değişimini gösteren hidrografın modele girdi olarak verilmesi ve problemin zamanla değişen akım durumları için çözülmesi gerekmektedir. Ayrıca pompa gibi ilave ekipmanların da modelleme aşamasına dahil edilmesi gerekmektedir.



Şekil 1 - Genel akış boykesiti

2.2. Diferansiyel Evrim (DE) Optimizasyon Tekniği

Bu çalışma kapsamında kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarım probleminin çözümü DE tabanlı bir optimizasyon modeli ile yapılmıştır. DE ilk olarak Storn ve Price [33] tarafından geliştirilmiş evrimsel tabanlı bir sezgisel optimizasyon tekniğidir. Genel işleyiş ve hesaplama mantığı bakımından GA ile büyük benzerlikler taşımaya rağmen DE'nin GA'dan en büyük farkı ilgili problemin ikilik sayı dizileri yerine onluk sayı dizileri ile kodlanarak çözülebmesidir. GA'da kullanılan mutasyon, çaprazlama ve seçim operatörleri DE'de de kullanılmasına rağmen, GA'dan farklı olarak popülasyondaki tüm bireyler (kromozom) bu operatörler tarafından işlem görmektedir [34]. Bu amaçla her bir birey, rastgele olarak seçilen başka üç bireye sırasıyla mutasyon ve çaprazlama operatörü uygulanarak elde edilen yeni birey ile karşılaştırılmakta ve amaç fonksiyonu değerleri bakımından daha iyi olan birey seçim operatörü kullanılarak bir sonraki jenerasyona aktarılmaktadır. Bu işlemin verilen durma koşulu sağlanıncaya kadar uygulanmasıyla global optimum bakımından etkin sonuçlar elde edilebilmektedir. Diğer sezgisel optimizasyon teknikleri ile karşılaştırıldığında DE'nin en büyük avantajları lokal optimum çözümlere yakalanma olasılığının düşük olması ve programlanabilirliğinin kolay olmasıdır. Matematiksel olarak DE ile bir optimizasyon probleminin çözümü aşağıdaki hesap adımlarına göre yapılmaktadır:

p popülasyondaki birey (çözüm vektörü) sayısını, n karar değişkeni sayısını, G jenerasyon indisini, $\mathbf{x}_{i,G} = [x_{i,G}^1, x_{i,G}^2, x_{i,G}^3, \dots, x_{i,G}^n]$ ($i = 1, 2, 3, \dots, p$) optimizasyon modeli tarafından belirlenecek n boyutlu çözüm vektörünü, $\mathbf{x}_{\min} = \{x_{\min}^1, x_{\min}^2, x_{\min}^3, \dots, x_{\min}^n\}$ ve $\mathbf{x}_{\max} = \{x_{\max}^1, x_{\max}^2, x_{\max}^3, \dots, x_{\max}^n\}$ sırasıyla karar değişkenlerinin alt ve üst sınırlarını gösteren çözüm vektörlerini göstermek üzere popülasyon içindeki i nolu aday çözüme ait j nolu karar

değişkeninin $G = 0$ nolu jenerasyondaki başlangıç değeri aşağıdaki eşitliğe bağlı olarak üretilmektedir [33]:

$$x_{i,0}^j = x_{\min}^j + r(0,1) \times (x_{\max}^j - x_{\min}^j) \quad (11)$$

burada $r(0,1)$ değeri 0 ile 1 arasında değişen üniform dağılıma sahip rastgele sayıyı göstermektedir. Bu aşamadan sonra, DE kapsamındaki mutasyon operatörü kullanılarak yeni bir mutant vektörü $\mathbf{v}_{i,G} = [v_{i,G}^1, v_{i,G}^2, v_{i,G}^3, \dots, v_{i,G}^n]$ ($i = 1, 2, 3, \dots, p$) oluşturulmaktadır. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli hususlardan biri mutant vektörü oluşturma aşamasında literatürde önerilmiş olan farklı mutasyon stratejilerinin olduğudur. Bu stratejilerden “DE/rand/1” stratejisine göre mutant vektör $\mathbf{v}_{i,G}$ aşağıdaki eşitliğe bağlı olarak üretilmektedir [33]:

$$\mathbf{v}_{i,G} = \mathbf{x}_{r_1^i,G} + F (\mathbf{x}_{r_2^i,G} - \mathbf{x}_{r_3^i,G}) \quad (12)$$

burada F mutasyon işleminin etkisinin kontrol edildiği ölçek katsayısını, r_k^i ($k = 1, 2, 3$) ise $[1, p]$ kapalı aralığında birbirinden ve i değerinden farklı olarak üretilmiş rastgele tamsayıları göstermektedir. Bu aşamanın ardından yeni çözüm vektörü $\mathbf{u}_{i,G} = [u_{i,G}^1, u_{i,G}^2, u_{i,G}^3, \dots, u_{i,G}^n]$ ($i = 1, 2, 3, \dots, p$) çaprazlama operatörü kullanılarak aşağıdaki şekilde üretilmektedir [33]:

$$u_{i,G}^j = \begin{cases} v_{i,G}^j, & \text{eğer } r_j(0,1) \leq C_r \text{ veya } j = j_{\text{rand}} \\ x_{i,G}^j, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (13)$$

burada C_r çaprazlama oranını, j_{rand} ise $[1, n]$ kapalı aralığında rastgele olarak üretilmiş üniform dağılıma sahip tamsayıyı göstermektedir. Görüleceği gibi, $r_j(0,1) \leq C_r$ veya $j = j_{\text{rand}}$ ($j = 1, 2, 3, \dots, n$) koşullarından herhangi birinin sağlanması durumunda $\mathbf{u}_{i,G}$ vektörünün j nolu bileşeni $\mathbf{v}_{i,G}$ vektöründen, aksi halde ise $\mathbf{x}_{i,G}$ vektöründen seçilmektedir. Burada $j = j_{\text{rand}}$ koşulu en az bir tane değer üretilen yeni kromozomdan seçilmesini garanti etmek amacıyla konulmuştur [34]. Literatürde mutasyon işleminde olduğu gibi önerilmiş pek çok çaprazlama stratejisi mevcuttur. Bu stratejiler hakkında detaylı bilgi [35]-[37]’de verilmiştir. Çaprazlama işleminin ardından yeni jenerasyona aktarılacak aday çözümler seçim operatörü ile aşağıdaki gibi belirlenmektedir [33]:

$$\mathbf{x}_{i,G+1} = \begin{cases} \mathbf{u}_{i,G}, & \text{eğer } f(\mathbf{u}_{i,G}) \leq f(\mathbf{x}_{i,G}) \\ \mathbf{x}_{i,G}, & \text{aksi halde} \end{cases} \quad (14)$$

burada $f(\bullet)$ ilgili çözüm için hesaplanan amaç fonksiyonu değerini göstermektedir. Denklem (14)’den görüleceği gibi amaç fonksiyonu değeri bakımından daha iyi olan çözüm bir sonraki jenerasyona aktarılmak üzere seçilmektedir. Yukarıda verilen hesap şeması takip edilerek yeni jenerasyona ait tüm aday çözümlerin seçimi yapıldıktan sonra, Denklem (12) ile (14) arasındaki işlemler tanımlanan durma koşulu sağlanıncaya kadar tekrar edilmektedir. Bu çalışma kapsamında durma koşulu olarak maksimum jenerasyon sayısı (G_{\max}) şartının sağlanması seçilmiştir.

2.3. Problem Formülasyonu

Kanalizasyon sistemlerinin minimum maliyetli olacak şekilde optimum tasarımı problemi matematiksel olarak bir optimizasyon modeli kullanılarak çözülebilmektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri Denklem (1)'in optimizasyonu aşamasında Denklem (2) ile (10) arasında verilen kısıtların sağlanması gerektiğidir. Diğer sezgisel algoritmalar gibi DE'de kısıtsız optimizasyon problemlerinin çözümünü yapabildiği için Denklem (1) ile (10) arasında verilen kısıtlı optimizasyon probleminin kısıtsız hale dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla ilgili kısıtlar ceza fonksiyonu yaklaşımı ile optimizasyon sürecine dahil edilmiştir. Genel olarak kısıtlı bir optimizasyon probleminin ceza fonksiyonu yaklaşımı ile ifade edilmiş hali aşağıdaki gibi olmaktadır:

$$\Phi' = \min \left\{ \Phi + \sum_{k=1}^N \lambda \cdot P(\mathbf{g}_k) \right\} \quad (15)$$

burada Φ' , ceza fonksiyonu eklenmiş amaç fonksiyonu değerini; $\mathbf{g}_k = [g_{k,1}, g_{k,2}, g_{k,3}, \dots, g_{k,9}]$ ($k = 1, 2, 3, \dots, N$), Denklem (2) ile (10) arasında verilen kısıtların saklandığı kısıt vektörünü; $P(\bullet)$, kısıt ihlali kapsamında ilgili ceza değerinin hesaplanmasında kullanılan ceza fonksiyonunu; $\lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots, \lambda_9]$ ise Denklem (2) ile (10) arasında verilen kısıtlar için tanımlanmış olan ceza parametrelerini göstermektedir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri ceza fonksiyonlarının modele entegre edilmesinde kullanılan λ parametre değerlerinin seçimidir. Genel olarak probleme bağlı olarak seçilen bu değerler ne kadar büyük alınırsa, ilgili koşulun sağlanması için harcanacak çaba o derece fazla olmaktadır [38]. Literatürde verilen koşulların sağlanabilmesi amacıyla önerilmiş farklı ceza fonksiyonu yapıları bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında yapılan kısıt ihlalinin karelerinin ceza olarak kullanıldığı aşağıdaki amaç fonksiyonu ve normalize edilmiş kısıt yapıları kullanılmıştır:

$$\Phi' = \min \left\{ \sum_{k=1}^N \mathcal{F}(d_k, L_k, \bar{Z}_k) + \sum_{l=1}^9 \lambda_l \sum_{k=1}^N (\hat{g}_{k,l})^2 \right\} \quad (16)$$

Kısıtlar:

$$\hat{g}_{k,1}: \left(1 - \frac{q_k}{Q_k^*} \right) \leq 0 \quad (17)$$

$$\hat{g}_{k,2}: \left(\frac{V_k}{V_{\max}} - 1 \right) \leq 0 \quad (18)$$

$$\hat{g}_{k,3}: \left(1 - \frac{V_k}{V_{\min}} \right) \leq 0 \quad (19)$$

$$\hat{g}_{k,4}: \left(\frac{y_k}{\alpha \cdot d_k} - 1 \right) \leq 0 \quad (20)$$

$$\hat{g}_{k,5}: \left(1 - \frac{S_k}{S_{\min}} \right) \leq 0 \quad (21)$$

$$\hat{g}_{k,6}: \left(\frac{E_k^u}{E_{\max}} - 1 \right) \leq 0 \quad (22)$$

$$\hat{g}_{k,7}: \left(1 - \frac{E_k^u}{E_{\min}} \right) \leq 0 \quad (23)$$

$$\hat{g}_{k,8}: \left(\frac{E_k^d}{E_{\max}} - 1 \right) \leq 0 \quad (24)$$

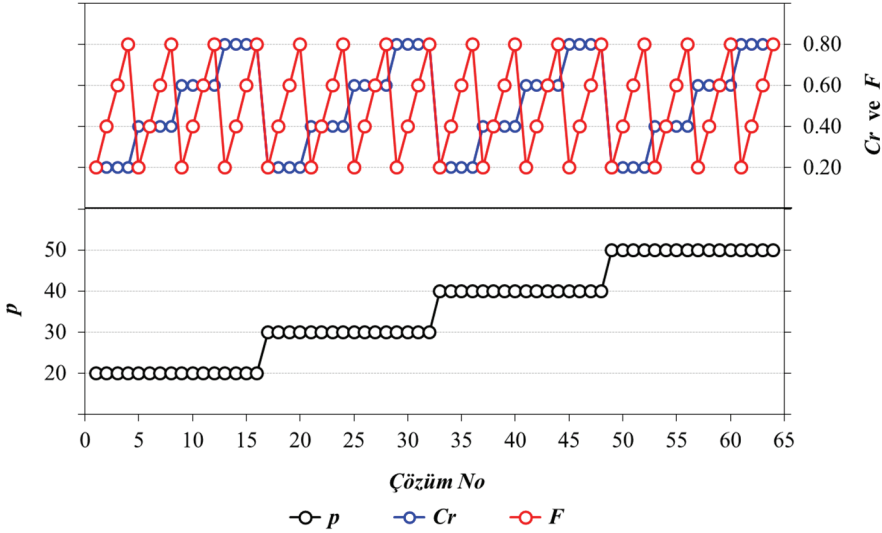
$$\hat{g}_{k,9}: \left(1 - \frac{E_k^d}{E_{\min}} \right) \leq 0 \quad (25)$$

burada $\hat{g}_{k,l}$ ($k = 1,2,3, \dots, N$; $l = 1,2,3, \dots, 9$), Denklem (2) ile (10) arasında verilmiş olan kısıtların normalleştirilmiş hallerini göstermektedir. Geliştirilen çözüm yaklaşımı ile Denklem (16) ile (25) arasında verilen problemin DE ile çözülmesi sonucunda kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarım problemi çözülebilmektedir.

3. SAYISAL UYGULAMALAR

Geliştirilen çözüm yaklaşımının performansı literatürde verilmiş iki örnek uygulama üzerinde test edilmiştir. Bu uygulamalar MATLAB ortamında hazırlanan DE tabanlı optimizasyon modeline Denklem (16) ile (25) arasında verilen optimizasyon formülasyonunun entegre edilmesiyle çözülmüştür. Önceki bölümde belirtilmiş olduğu gibi problemle alakalı tüm kısıtlar ilgili amaç fonksiyonuna ceza fonksiyonları ile entegre edilmiştir. Bu noktada dikkat edilmesi gereken en önemli husus bu entegrasyon aşamasında ceza parametrelerinin ne alınması gerektiğidir. Daha önceden belirtildiği gibi bu parametreler genellikle probleme bağlı olduğu için çözüme başlanmadan önce denemeler yapılarak nihai değerler belirlenmiştir. Yapılan denemeler sonucunda bu değerlerin tümü $\lambda_{1-9} = 10^9$ olarak alınmıştır. Diğer bir önemli nokta ise DE tabanlı optimizasyon modelinde kullanılan parametre değerlerinin ve üretilen rastgele sayılara ait çekirdek (seed) değerlerinin seçimidir. Her ne kadar DE'nin global optimum ya da global optimuma yakın sonuçlar bulmadaki performansının yüksek olduğu bilinse de algoritmanın performansının farklı çözüm

parametreleri ve rastgele sayı çekirdekleri kullanılarak test edilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda ilgili uygulamalar iki senaryo dikkate alınarak çözülmüştür. Senaryo A’da farklı DE çözüm parametreleri kullanılarak çözüm işlemi yapılmıştır. Bu kapsamda $p \in [20, 30, 40, 50]$, $C_r \in [0.20, 0.40, 0.60, 0.80]$ ve $F \in [0.20, 0.40, 0.60, 0.80]$ alınmış ve bu parametre değerlerinin birbirine göre değişiminin dikkate alındığı $4^3 = 64$ farklı parametre kombinasyonu için problem çözülmüştür. Senaryo A kapsamında kullanılan 64 parametre kombinasyonu için çözüm parametrelerinin değişimi Şekil 2’de verilmiştir. Yapılan bu çözümler sonucunda minimum amaç fonksiyonu değerini veren parametre seti problemin çözümünde kullanılmıştır.



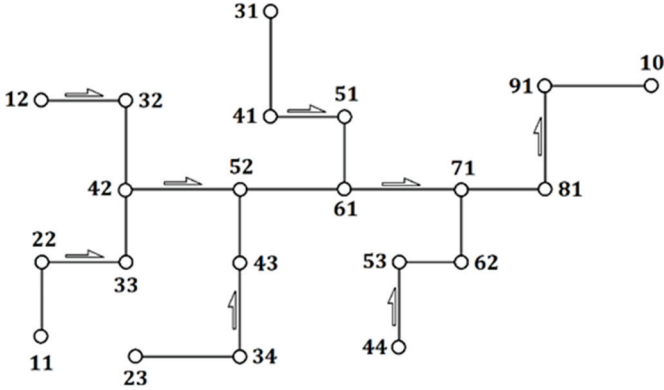
Şekil 2 - Senaryo A kapsamında kullanılan farklı DE çözüm parametrelerini içeren parametre kombinasyonları

Senaryo A için 64 farklı parametre seti arasından minimum amaç fonksiyonu değerini veren kombinasyonun belirlenmesinin ardından Senaryo B kapsamında her iki örnek uygulamanın performansı farklı rastgele sayı üreticileri için değerlendirilmiştir. Bu bağlamda 10 farklı çekirdek değeri için her iki problem çözülmüş ve geliştirilen yaklaşımın performansının rastgele sayılara ne oranda bağlı olduğu detaylı olarak değerlendirilmiştir. Senaryo A ve B kapsamında erken yakınsama probleminin önüne geçmek amacıyla durma koşulu 500,000 amaç fonksiyonu hesaplanması şeklinde alınmış ve bu kapsamda maksimum jenerasyon sayısı $G_{max} = 500,000/p$ olarak modele girilmiştir.

3.1. Uygulama 1

Bu bölümde geliştirilen modelin performansı ilk olarak Mays ve Wenzel [6] tarafından tasarlanan ve daha sonra pek çok araştırmacı tarafından kullanılan örnek bir sistem üzerinde test edilmiştir. Şekil 3’den görüleceği gibi kanalizasyon sistemi 21 düğüm noktası ve toplam uzunluğu yaklaşık 2.6 km olan 20 borudan oluşmaktadır. Sistem ile ilgili karakteristik

özellikler Çizelge 1’de sunulmuştur. Problemin çözümü aşamasında dikkate alınan minimum ve maksimum hız değerleri sırasıyla 0.6 m/s ve 3.6 m/s olarak alınmış olup tüm borular içindeki akış hızının bu aralık içinde olması gerekmektedir. Benzer şekilde tüm borular için müsaade edilebilir minimum ve maksimum dolgu kalınlıkları sırasıyla 2.4 m ve 6.0 m olarak alınmış olup dolgu kalınlıklarının model tarafından bu aralıkta belirlenmesi gerekmektedir.



Şekil 3 - Uygulama 1'e ait boru ve düğüm nokta planı

Çizelge 1 - Uygulama 1'e ait karakteristik özellikler

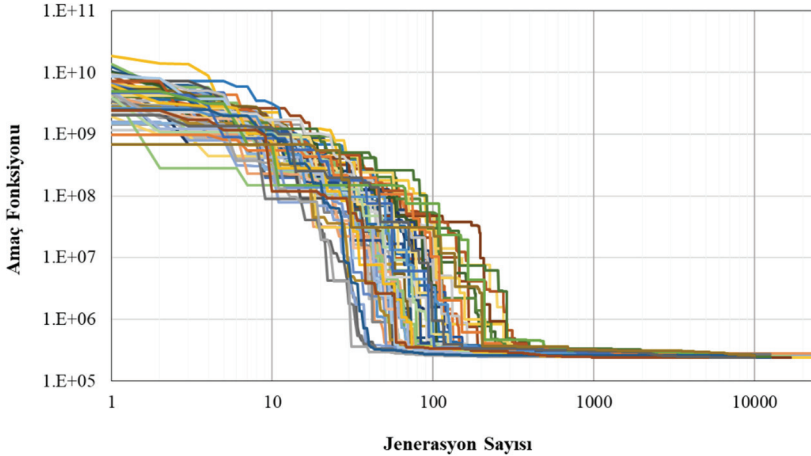
Boru	Zemin Kotu (m)		L (m)	Q* (m ³ /s)
	Memba	Mansap		
11-22	152.40	150.88	106.68	0.1132
22-33	150.88	148.49	121.92	0.1982
33-42	148.49	146.30	106.68	0.2548
12-32	149.35	147.83	121.92	0.1132
32-42	147.83	146.30	131.08	0.2265
42-52	146.30	143.26	167.68	0.6229
23-34	149.35	147.83	147.64	0.2265
34-43	147.83	144.78	137.16	0.3398
43-52	144.78	143.26	106.68	0.4530
52-61	143.26	141.73	152.40	1.2459
31-41	147.83	144.78	152.40	0.2548
41-51	144.78	143.26	106.68	0.4530
51-61	143.26	141.73	106.68	0.5663
61-71	141.73	138.65	172.21	2.0104
44-53	142.65	141.43	121.92	0.1132
53-62	141.43	140.21	91.44	0.1699
62-71	140.21	138.65	105.23	0.2548
71-81	138.65	137.46	121.92	2.4635
81-91	137.46	136.55	152.40	2.5201
91-10	136.55	135.64	186.54	2.6617

Bu uygulamanın çözümünü Mays ve Wenzel [6] ilk olarak diferansiyel dinamik programlamaya dayanan bir optimizasyon yaklaşımı ile yapmış ardından ilgili problemin çözümü pek çok araştırmacı tarafından farklı çözüm yaklaşımları kullanılarak yapılmıştır [1, 3, 6-8, 22, 40]. Bu çözümlerin tümünde amaç fonksiyonunun hesaplanması aşamasında Meredith [39] tarafından verilmiş olan aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır:

$$C_p = \begin{cases} 10.98d + 0.80H - 5.98 & ; H < 10 \\ 5.94d + 1.17H + 0.50Hd - 9.64 & ; d \leq 3, H \geq 10 \\ 30.00d + 4.90H - 105.90 & ; d > 3 \end{cases} \quad (26)$$

$$C_m = 250 + h^2 \quad (27)$$

burada C_p , boru maliyet terimini (\$/ft); C_m , menhol maliyet terimini (\$); d , boru çapını (ft); H , ortalama boru alt kot derinliği (ft); h ise menhol derinliğini (ft) ifade etmektedir. Buradan yola çıkarak kanalizasyon sistemi için toplam maliyet (Denklem (1)) tüm borular için hesaplanan C_p ve C_m değerlerinin toplamına eşit kabul edilmiş olup DE tabanlı optimizasyon yaklaşımı ile bu maliyeti minimum yapan sistem tasarımının belirlenmesi amaçlanmıştır. Daha önceden belirtildiği gibi her bir boruya ait eğim değeri (S_k ; $k = 1,2,3, \dots, 20$) optimizasyon modelinde karar değişkeni olarak kullanılmıştır. Çözüm aşamasında tüm borular için Manning yüzey pürüzlülüğü $n = 0.013$ ve müsaade edilebilir maksimum doluluk oranı $\alpha = 0.82$ olarak alınmış olup bu değerler ilgili örneğin çözüldüğü diğer çalışmalardan alınmıştır. Belirlenen eğim değerleri için boru çapları piyasada bulunabilen şu çaplar arasından seçilmiştir: 304.8 mm (12 inç), 381.0 mm (15 inç), 457.2 mm (18 inç), 533.4 mm (21 inç), 762 mm (30 inç), 914.4 mm (36 inç), 1066.8 mm (42 inç) ve 1219.2 mm (48 inç). Bu seçim, optimizasyon modeli tarafından her bir boruya ait eğim değerinin belirlenmesinin ardından Denklem (3) ve (5)'de verilen kısıtlar sağlanacak şekilde yukarıda verilen çapların küçükten büyüğe doğru teker teker denenmesi suretiyle yapılmaktadır. Bu aşamanın ardından ilgili problem Senaryo A için çalıştırılmış ve her bir çözüm için Şekil 4'de verilen yakınsama grafikleri elde edilmiştir.

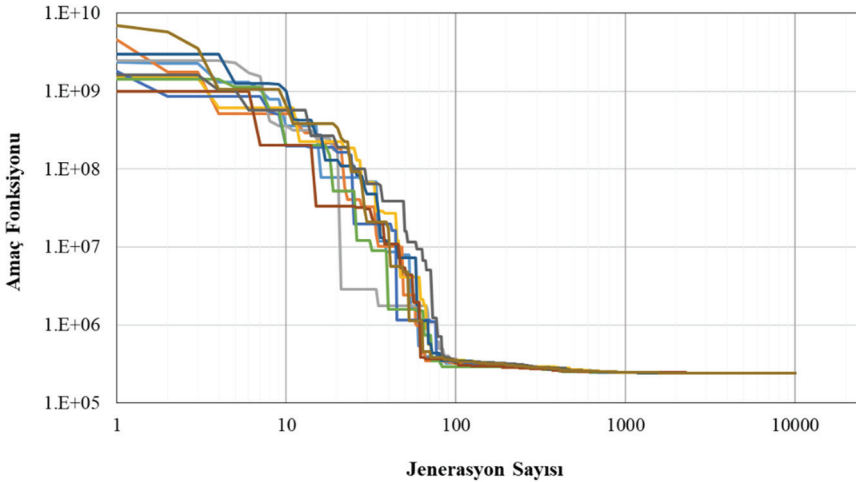


Şekil 4 - Uygulama 1'in Senaryo A kapsamında 64 farklı parametre seti için çözülmesi sonucu elde edilen yakınsama grafikleri

Şekil 4'den görüleceği gibi tüm çözümler farklı başlangıç noktalarından başlamakta olup yaklaşık olarak benzer mertebedeki sonuçlara yakınsamaktadır. Genel olarak çözümlere ait yakınsama davranışı değerlendirildiğinde başlangıç jenerasyonlarında kısıtların sağlanmadığı ve bunun sonucunda da amaç fonksiyonu değerleri üzerinde yüksek ceza değerleri bulunduğu açıkça görülmektedir. Farklı DE çözüm parametreleri için yapılan 64 çözümün istatistiksel değerlendirmesi Çizelge 2'de sunulmuştur:

Çizelge 2 - Uygulama 1 için Senaryo A ve B kapsamında elde edilen sonuçların istatistiksel değerlendirmesi

	Toplam Maliyet (ABD \$)	
	Senaryo A	Senaryo B
Çözüm Sayısı	64	10
En Küçük	239,961	239,961
En Büyük	279,367	239,979
Ortalama	244,682	239,964
Standart Sapma	8,389	6



Şekil 5 - Uygulama 1'in Senaryo B kapsamında farklı rastgele sayı üreteçleri için çözümleri sonucu elde edilen yakınsama grafikleri

Çizelge 2'den görüleceği gibi Senaryo A kapsamında yapılan 64 çözüm için şebekenin toplam maliyeti en küçük 239,961 \$, en büyük 279,367 \$, ortalama 244,682 \$ olarak belirlenmiştir. Yapılan çözümler ortalama etrafında 8,389 \$'lık bir standart sapma ile dağılım göstermektedir. Elde edilen bu sonuçlar değerlendirildiğinde en küçük amaç fonksiyonu değerinin $p = 50$, $C_r = 0.60$ ve $F = 0.40$ parametre değerleri ile elde edildiği görülmüştür.

Bu aşamanın ardından belirlenen parametre değerleri kullanılarak Senaryo B kapsamında ilgili problem 10 farklı rastgele sayı üretici için tekrar çözülmüştür. Yapılan bu 10 çözüme ait yakınsama grafikleri Şekil 5’de verilmiştir. Görüleceği gibi tüm çözümler farklı başlangıç noktalarından başlamış ve mertebe olarak aynı amaç fonksiyonu değerine yakınsamıştır. Senaryo B kapsamında elde edilen bu sonuçların istatistiksel değerlendirmesi ise yine Çizelge 2’de verilmiştir. Görüleceği gibi en küçük ve en büyük sistem maliyeti sırasıyla 239,961 \$ ve 239,979 \$ olarak elde edilmiş olup yapılan 10 çözüm için standart sapma değeri 6 \$ olarak elde edilmiştir. Bu sonuç geliştirilen DE tabanlı optimizasyon yaklaşımı ile başlangıç çözümlerine çok fazla bağlı kalmadan aynı mertebeye sonuçlara ulaşılabilceğini göstermiştir. Senaryo B sonucunda elde edilen en küçük sistem maliyeti için (239,961 \$) optimizasyon modeli tarafından belirlenen sistem karakteristikleri Çizelge 3’de verilmiştir.

Çizelge 3 - Uygulama 1 için optimizasyon modeli tarafından belirlenen karakteristikler

Boru	Eğim	Çap	Hız	Doluluk Oranı	Dolgu Kalınlıkları	
	S_k (m/m)	d_k (mm)	V_k (m/s)	y_k/d_k (m/m)	E_k^u (m)	E_k^d (m)
11-22	0.0142	304.8	1.88	0.77	2.40	2.40
22-33	0.0196	381.0	2.47	0.66	2.40	2.40
33-42	0.0205	381.0	2.62	0.80	2.40	2.40
12-32	0.0126	304.8	1.77	0.82	2.40	2.42
32-42	0.0116	457.2	2.10	0.63	2.42	2.40
42-52	0.0193	533.4	3.18	0.82	2.40	2.59
23-34	0.0153	381.0	2.26	0.82	2.40	3.14
34-43	0.0168	457.2	2.65	0.73	3.14	2.40
43-52	0.0142	533.4	2.68	0.71	2.40	2.40
52-61	0.0115	762.0	3.11	0.82	2.40	2.62
31-41	0.0200	381.0	2.59	0.80	2.40	2.40
41-51	0.0142	533.4	2.68	0.71	2.40	2.40
51-61	0.0237	533.4	3.43	0.69	2.40	3.40
61-71	0.0121	914.4	3.60	0.80	3.40	2.40
44-53	0.0126	304.8	1.77	0.82	2.40	2.72
53-62	0.0099	381.0	1.82	0.77	2.72	2.40
62-71	0.0148	457.2	2.38	0.62	2.40	2.40
71-81	0.0098	1066.8	3.54	0.73	2.40	2.40
81-91	0.0078	1066.8	3.21	0.82	2.40	2.68
91-10	0.0087	1066.8	3.39	0.82	2.68	3.40

Çizelge 3’den görüleceği gibi, optimizasyon modeli tarafından belirlenen eğim değerleri için hesaplanan hız, doluluk oranı ve dolgu kalınlıkları kısıtlarının tümü sağlanmıştır. Her bir boru için çap değeri ise daha önceden tanımlanan piyasa borularına ait kesikli çözüm kümesi

içerisinden tanımlanan koşullar yardımıyla seçilmiştir. Daha önceden belirtildiği gibi bu uygulama literatürde farklı çözüm yaklaşımları kullanılarak da çözülmüştür. Bu çalışma kapsamında elde edilen sistem maliyetinin literatürde verilenlerle karşılaştırılması Çizelge 4’de verilmiştir.

Çizelge 4 - Uygulama 1 için elde edilen sonuçların sistem maliyeti ve fonksiyon hesaplama sayısı bakımından karşılaştırılması

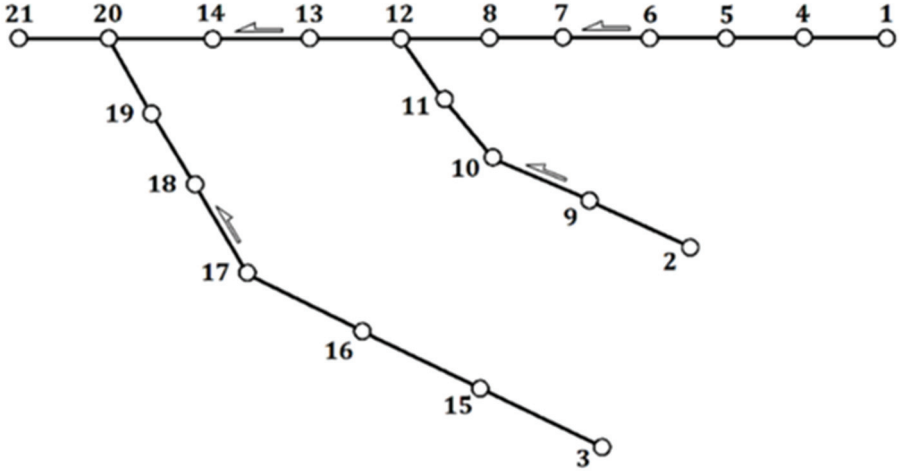
	Toplam Maliyet (ABD \$)	Fonksiyon Hesaplama Sayısı
Mays and Wenzel [6]	265,775	-
Robinson and Labadie [7]	275,218	-
Miles and Heaney [40]	245,874	-
Afshar [22]	241,496	29,900
Afshar [1]	241,896	100,000
Mevcut çalışma	248,008	29,900
	240,860	100,000
	239,961	420,450

Çizelge 4’den görüleceği gibi geliştirilen yaklaşım kullanılarak elde edilen sistem maliyeti (239,961 \$) gerek deterministik gerek sezgisel tabanlı çözüm yaklaşımlarından daha düşük olarak elde edilmiştir. Bu noktada model performanslarının karşılaştırılmasında dikkat edilecek en önemli husus amaç fonksiyonunun kaç kez hesaplanması sonucu bu sonuçlara ulaşıldığıdır. Daha önceden belirtildiği gibi geliştirilen yaklaşım kapsamında ilgili problemin çözümü 500,000 amaç fonksiyonu hesabı için yapılmış olup Çizelge 4’de verilen en iyi çözüm (239,961 \$) ilgili amaç fonksiyonu değerinin 420,450 defa çalıştırılması sonucu elde edilmiştir. Literatürde verilen sonuçlar incelendiğinde ilgili problem Afshar [22] tarafından karınca kolonisi optimizasyon tekniği iyileştirilerek çözülmüş ve 29,900 çözüm sonrasında sstem maliyeti 241,496 \$ olarak elde edilmiştir. Benzer şekilde Afshar [1] tarafından genetik algoritma tabanlı bir optimizasyon yaklaşımı revize edilerek ilgili problem çözülmüş ve olarak 100,000 amaç fonksiyonu çözümü sonrasında toplam sistem maliyeti 241,896 \$ olarak bulunmuştur. Bu kapsamda karşılaştırma amacıyla geliştirilen yaklaşımın 29,900 ve 100,000’nci amaç fonksiyonu hesabın sonucu elde edilen sistem maliyetleri de Çizelge 4’de sunulmuştur. Görüleceği gibi 29,900’ncü çözüm sonrası elde edilen sistem maliyeti (248,008 \$) Afshar [22] tarafından elde edilen sonuçtan (241,496 \$) daha büyüktür. Buna karşın, 100,000’ncü çözüm sonrası elde edilen sistem maliyeti (240,860 \$) ise Afshar [1] tarafından elde edilen sistem maliyetinden (241,896 \$) daha düşüktür. Bu sonuçlar geliştirilen DE tabanlı çözüm yaklaşımı ile literatürde verilenlerle uyumlu ve/veya daha iyi sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir.

3.2. Uygulama 2

Bu uygulama kapsamında Afshar ve diğ. [41] tarafından kullanılan ve İran’ın Kirman şehrinde bulunan örnek bir sistem çözülmüştür. Yerleşim planı Şekil 6’da verilen sistemde

21 adet düğüm noktası ve toplam uzunluğu 7.62 km olan 20 adet boru bulunmaktadır. Sistem ile ilgili karakteristik özellikler Çizelge 5’de sunulmuştur. Bu uygulama için çözüm aşamasında dikkate alınan minimum ve maksimum hız değerleri sırasıyla 0.3 m/s ve 3.0 m/s olarak alınmıştır. Benzer şekilde tüm borular için müsaade edilebilir minimum ve maksimum dolgu kalınlıkları sırasıyla 2.45 m ve 6.0 m olarak alınmıştır. Tüm borular için Manning yüzey pürüzlülüğü $n = 0.013$ ve maksimum doluluk oranı $\alpha = 0.82$ olarak alınmıştır. Karar değişkeni olarak belirlenen boru eğimleri için boru çapları şu çaplar arasından seçilmiştir: 150 mm, 200 mm, 250 mm, 300 mm, 400 mm, 500 mm, 600 mm, 700 mm.



Şekil 6 - Uygulama 2'ye ait boru ve düğüm nokta planı

Bu uygulama kapsamında amaç fonksiyonunun hesaplanabilmesi ve literatürde verilen sonuçlarla karşılaştırma yapılabilmesi amacıyla Afshar ve diğ. [41] tarafından verilen aşağıdaki sistem maliyet fonksiyonu kullanılmıştır:

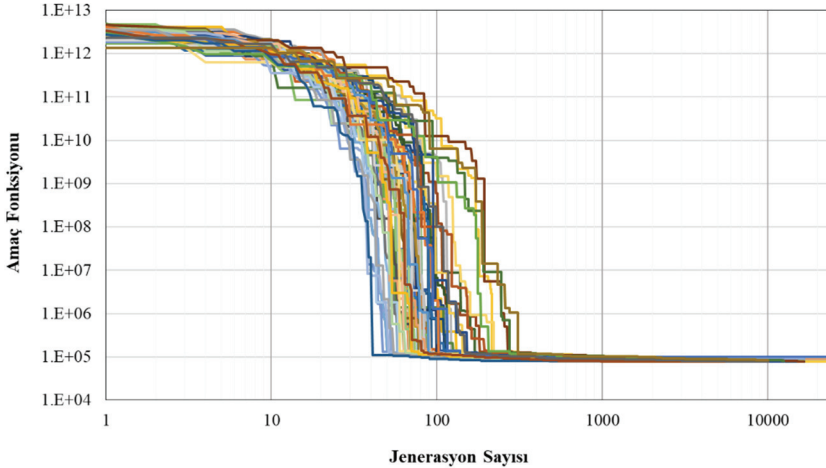
$$C_p = 1.93e^{3.43d} + 0.812H^{1.53} + 0.437dH^{1.47} \quad (28)$$

$$C_m = 41.46h \quad (29)$$

burada C_p , boru maliyet terimini (\$/m); C_m , menhol maliyet terimini (\$) ; d , boru çapını (m); H , ortalama boru alt kot derinliği (m); h ise menhol derinliğini (m) ifade etmektedir. Bu tanımlamalar altında sistem için toplam maliyet C_p ve C_m değerlerinin toplamına eşit kabul edilmiş olup bu maliyeti minimum yapan sistem tasarımının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu uygulamanın çözümü de Senaryo A ve B kapsamında farklı DE çözüm parametreleri ve rastgele sayı çekirdek değerleri için yapılmıştır. Senaryo A kapsamında yapılan 64 çözüm için elde edilen yakınsama grafikleri Şekil 7’de sunulmuştur.

Çizelge 5 - Uygulama 2'ye ait karakteristik özellikler

Boru	Zemin Kotu (m)		L (m)	Q* (m ³ /s)
	Memba	Mansap		
1-4	74.59	73.66	260	0.0279
2-9	70.70	69.90	300	0.0549
3-15	73.00	71.50	400	0.0211
4-5	73.66	72.10	460	0.0304
5-6	72.10	71.19	260	0.0324
6-7	71.19	69.85	300	0.0340
7-8	69.85	68.24	450	0.0366
8-12	68.24	67.28	400	0.0387
9-10	69.90	69.30	270	0.0562
10-11	69.30	68.40	310	0.0580
11-12	68.40	67.28	440	0.0596
12-13	67.28	66.22	470	0.0967
13-14	66.22	65.82	350	0.1012
14-20	65.82	65.42	340	0.1047
15-16	71.50	70.10	400	0.0264
16-17	70.10	68.60	400	0.0300
17-18	68.60	66.80	500	0.0319
18-19	66.80	66.10	400	0.0403
19-20	66.10	65.42	590	0.0446
20-21	65.42	64.50	320	0.0279

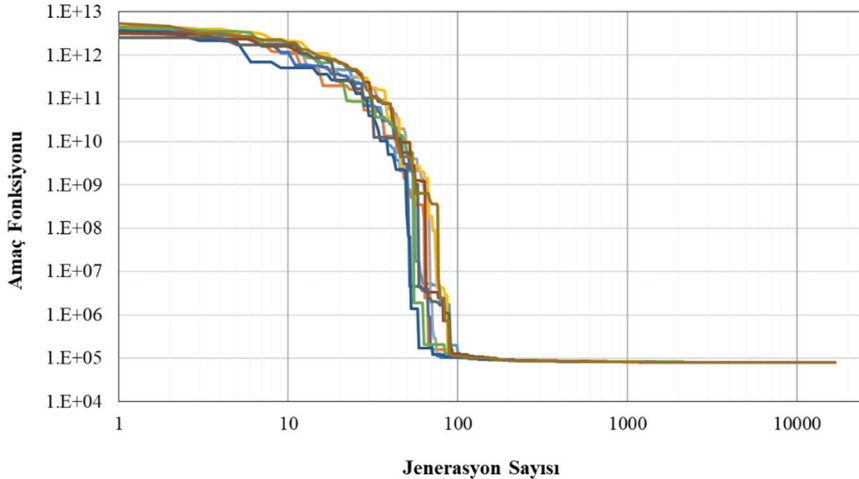


Şekil 7 - Uygulama 2'nin Senaryo A kapsamında 64 farklı parametre seti için çözülmesi sonucu elde edilen yakınsama grafikleri

Görüleceği gibi başlangıç aşamasındaki çözümlerin tümü kısıtların sağlanmaması ile alakalı olarak yüksek ceza değerlerine sahiptir. İlerleyen jenerasyonlarda ise kısıtların sağlanmasıyla beraber amaç fonksiyonu değerleri düşmekte ve yaklaşık aynı mertebedeki sonuçlara yakınsamaktadır. Senaryo A kapsamında elde edilen bu çözümlerin istatistiksel değerlendirmesi Çizelge 6’da yapılmıştır. Görüleceği gibi Senaryo A kapsamında yapılan 64 çözüm için sistem maliyeti en küçük 78,699 \$, en büyük 100,751 \$, ortalama 81,097 \$ olarak belirlenmiştir. Yapılan çözümler ortalama etrafında 3,977 \$’lık bir standart sapma ile dağılım göstermektedir. Belirlenen bu sonuçlar için en küçük amaç fonksiyonu değeri Şekil 2’de verilen parametre kombinasyonlarından $p = 30$, $C_r = 0.20$ ve $F = 0.40$ ile elde edilmiştir. Bu aşamanın ardından Senaryo B kapsamında ilgili problem 10 farklı rastgele sayı üretici için tekrar çözülmüştür. Bu çözümlerin tümünde yukarıda belirlenmiş olan DE parametreleri kullanılmıştır. Yapılan bu 10 çözüme ait yakınsama grafikleri Şekil 8’de verilmiştir.

Çizelge 6 - Uygulama 2 için Senaryo A ve B kapsamında elde edilen sonuçların istatistiksel değerlendirmesi

	Toplam Maliyet (ABD \$)	
	Senaryo A	Senaryo B
Çözüm Sayısı	64	10
En Küçük	78,699	78,694
En Büyük	100,751	78,873
Ortalama	81,097	78,727
Standart Sapma	3,977	54



Şekil 8 - Uygulama 2’nin Senaryo B kapsamında farklı rastgele sayı üreticileri için çözümlenmesi sonucu elde edilen yakınsama grafikleri

Şekil 8’den görüleceği gibi tüm çözümler farklı başlangıç noktalarından başlamış ve mertebe olarak aynı amaç fonksiyonu değerlerine yakınsamıştır. Yapılan bu 10 çözüm için elde edilen sonuçlar da Çizelge 6’da verilmiştir. Görüleceği gibi Senaryo B kapsamında en küçük, en büyük ve ortalama sistem maliyetleri sırasıyla 78,694 \$, 78,873 \$ ve 78,727 \$ olarak elde edilmiştir. Yapılan bu 10 çözüm için standart sapma değeri ise 54 \$ olarak elde edilmiş olup geliştirilen yaklaşım kullanılarak farklı başlangıç çözümleri için yapılan çözümlerin yaklaşık olarak aynı amaç fonksiyonu değerlerine yakınsadığı sonucuna ulaşılmıştır. Senaryo B kapsamında elde edilen en küçük sistem maliyeti için (78,694 \$) optimizasyon modeli tarafından belirlenen sistem karakteristikleri Çizelge 7’de verilmiştir.

Çizelge 7 - Uygulama 2 için optimizasyon modeli tarafından belirlenen karakteristikler

Boru	Eğim	Çap	Hız	Doluluk Oranı	Dolgu Kalınlıkları	
	S_k (m/m)	d_k (mm)	V_k (m/s)	y_k/d_k (m/m)	E_k^u (m)	E_k^d (m)
1-4	0.0036	0.25	0.80	0.67	2.45	2.45
2-9	0.0032	0.30	0.89	0.82	2.45	2.62
3-15	0.0041	0.20	0.77	0.82	2.45	2.61
4-5	0.0034	0.25	0.80	0.73	2.45	2.45
5-6	0.0035	0.25	0.82	0.76	2.45	2.45
6-7	0.0045	0.25	0.91	0.72	2.45	2.45
7-8	0.0038	0.25	0.85	0.82	2.45	2.54
8-12	0.0042	0.25	0.90	0.82	2.54	3.28
9-10	0.0016	0.35	0.69	0.79	2.62	2.45
10-11	0.0036	0.30	0.94	0.82	2.45	2.67
11-12	0.0021	0.35	0.78	0.74	2.67	2.45
12-13	0.0023	0.40	0.90	0.80	2.45	2.45
13-14	0.0024	0.40	0.92	0.82	2.45	2.88
14-20	0.0052	0.35	1.24	0.82	2.88	4.23
15-16	0.0031	0.25	0.75	0.68	2.61	2.45
16-17	0.0037	0.25	0.83	0.69	2.45	2.45
17-18	0.0036	0.25	0.82	0.74	2.45	2.45
18-19	0.0018	0.30	0.65	0.82	2.45	2.45
19-20	0.0012	0.35	0.58	0.74	2.45	2.45
20-21	0.0029	0.25	0.73	0.73	2.45	2.45

Çizelge 7’den görüleceği gibi, belirlenen eğim değerleri için ilgili problem kapsamında hesaplanan hız, doluluk oranı ve dolgu kalınlıkları kısıtlarının tümü sağlanmıştır. Her bir boruya ait çap değerleri ise problem kapsamında tanımlanan kesikli çözüm kümesi içerisinde seçilmiştir. Uygulama 1’de olduğu gibi bu sistemde literatürde farklı çözüm

yaklaşımları kullanılarak çözülmüştür. Bu kapsamda elde edilen sonuçlar Çizelge 8’de özetlenmiştir.

Çizelge 8 - Uygulama 2 için elde edilen sonuçların sistem maliyeti bakımından karşılaştırılması

	Toplam Maliyet (ABD \$)
Mansuri ve Khanjani [42]	83,116
Setoodeh [43] (a)	82,732
Setoodeh [43] (b)	81,553
Afshar ve diğ. [41]	80,879
Mevcut çalışma	78,694

Çizelge 8’den görüleceği gibi mevcut çalışma için elde edilen sistem maliyeti (78,694 \$) literatürde verilen diğer çalışmalardan daha düşüktür. Bu çalışmalar incelendiğinde ilgili problem Mansuri ve Khanjani [42]’da doğrusal olmayan programlama ile, Setoodeh [43] (a)’da Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno (BFGS) yöntemi ile, Setoodeh [43] (b)’de Fletcher-Reeves yöntemi ile, Afshar ve diğ. [41]’de ise hücresel otomat yöntemi ile çözülmüştür. Geliştirilen yaklaşım ile belirtilen amaç fonksiyonu değerine 417,750 amaç fonksiyonu hesabında ulaşılmış olup bu işlem MATLAB platformunda hazırlanmış bir program kullanılarak Intel Core i7 2.90 GHz işlemci ve 8.00 GB RAM özelliklerine sahip bir masaüstü bilgisayarda 1145.61 s zaman almıştır. Elde edilen bu sonuçlar geliştirilen DE tabanlı optimizasyon yaklaşımı ile literatürde verilen deterministik tabanlı optimizasyon yaklaşımlarına göre daha iyi sonuçların makul bilgi-işlem sürelerinde elde edilebileceğini göstermiştir.

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada kanalizasyon sistemlerinin optimum tasarımının yapılabilirdiği DE tabanlı bir optimizasyon yaklaşımı geliştirilmiştir. Geliştirilen yaklaşım kapsamında boru eğimleri karar değişkeni olarak kullanılmış ve belirlenen eğim değerleri için her bir boruya ait çap tanımlanan kesikli çözüm uzayı içerisinde seçilmiştir. Kanalizasyon sistemlerinin tasarımı kapsamında dikkate alınan fiziksel ve yönetimsel kısıtların tümü ilgili kısıtların amaç fonksiyonuna penaltı fonksiyonu yaklaşımı ile entegre edilmesi suretiyle sağlanmıştır. Geliştirilen yaklaşımın performansı literatürde başka çözüm yaklaşımları kullanılarak çözülmüş iki adet örnek uygulama üzerinde test edilmiştir. Bu uygulamaların çözümü farklı DE parametrelerinin ve farklı rastgele sayı üreteçlerinin sonuçlar üzerindeki etkisinin belirlenebildiği iki farklı senaryo için yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar DE tabanlı optimizasyon yaklaşımı kullanılarak literatürde verilenlerle uyumlu ve/veya daha iyi sonuçların makul bilgi-işlem sürelerinde elde edilebileceğini göstermiştir. Sonraki çalışma olarak farklı DE mutasyon/çaprazlama stratejileri ve zamanla değişen akım durumları için geliştirilen yaklaşımın genişletilmesi önerilmektedir.

Teşekkür

Yazarlar, değerli görüşlerini bildirerek makalenin daha iyi bir formata kavuşmasını sağlayan hakemlere teşekkürlerini sunmaktadır.

Kaynaklar

- [1] Afshar, M. H., Rebirthing Genetic Algorithm for Storm Sewer Network Design. *Scientia Iranica Transactions A: Civil Engineering*, 19, 1, 11-19, 2012.
- [2] Elimam, A. A., Charalambous, C., Ghobrial, F. H., Optimum Design of Large Sewer Networks. *Journal of Environmental Engineering*, 115, 6, 1171-1190, 1989.
- [3] Swamee, P. K., Sharma, A. K., Optimal Design of A Sewer Line Using Linear Programming. *Applied Mathematical Modelling*, 37, 4430-4439, 2012.
- [4] Price, R. K., Design of Storm Water Sewers for Minimum Construction Cost. Proc. 1st International Conference on Urban Storm Drainage, Southampton, United Kingdom, 636-647, 1978.
- [5] Swamee, P. K., Design of Sewer Line. *Journal of Environmental Engineering*, 127, 9, 776-781, 2001.
- [6] Mays, L. W., Wenzel, H. G., Optimal Design of Multilevel Branching Sewer Systems. *Water Resources Research*, 12, 5, 913-917, 1976.
- [7] Robinson, D. K., Labadie, J. W., Optimal Design of Urban Storm Water Drainage System. Int. Symposium on Urban Hydrology, Hydraulics and Sediment Control, University of Kentucky, Lexington, KY, USA, 145-156, 1981.
- [8] Yen, B. C., Cheng, S. T., Jun, B. H., Voohees, M. L., Wenzel, H. G., Illinois Least Cost Sewer System Design Model, ILSD-1&2 User's Guide, Dept. of Civil Engineering University of Texas at Austin, USA, 1984.
- [9] Kulkarni, V. S., Khanna, P., Pumped Wastewater Collection Systems Optimization. *J. of Environmental Engineering*, 111, 5, 589-601, 1985.
- [10] Li, G., Matthew, R. G. S., New Approach for Optimization of Urban Drainage Systems. *Journal of Environmental Engineering*, 116, 5, 927-944, 1990.
- [11] Yeh, S. F., Chu, C. W., Applying Tabu Search and Simulated Annealing to the Optimal Design of Sewer Networks. *Engineering Optimization*, 43, 2, 159-174, 2011.
- [12] Ayvaz, M. T., A Linked Simulation-Optimization Model for Solving the Unknown Groundwater Pollution Source Identification Problems. *Journal of Contaminant Hydrology*, 117, 46-59, 2010.
- [13] Afshar, M. H., Application of A Genetic Algorithm to Storm Sewer Network Optimization. *Scientia Iranica*, 13, 3, 234-244, 2006.
- [14] Haghghi, A., Bakhshipour, A. E., Optimization of Sewer Networks Using an Adaptive Genetic Algorithm. *Water Resour Manage*, 26, 3441-3456, 2012.

- [15] Afshar, M. H., Afshar, A., Marino, M. A., Darbandi A. A. S., Hydrograph-Based Storm Sewer Design Optimization by Genetic Algorithm. *Can. J. Civ. Eng.*, 33, 3, 319-325, 2006.
- [16] Afshar, M. H., Sotoodeh, M. H., Optimal Design of the Sewer Networks with the Genetic Algorithm. *J. Eng. Sci. Iran Univ. Sci. Technol*, 2, 19, 37-48, 2008.
- [17] Çetin, T., Kentsel Yağmur Suyu ve Kanalizasyon Sistemlerinin Optimizasyonu, Doktora tezi, Celal Bayar Üniversitesi-Fen bilimleri Enstitüsü, 2014.
- [18] Afshar, M. H., Rebirthing Particle Swarm Optimization Algorithm: Application to Storm Water Network Design. *Can. J. Civ. Eng.*, 35, 10, 1120-1127, 2008.
- [19] Izquierdo, J., Montalvo, I., Pérez, R., Fuertes, V. S., Design Optimization of Wastewater Collection Networks by PSO. *Comput. Math. Appl.*, 56, 3, 777-784, 2008.
- [20] Nafisi, M., Ahmadi, A., Sewer Networks Optimization by Particle Swarm Optimization with Abilities of Fly-Back Mechanism and Harmony Memory. *J. Water Wastewater*, 25, 4, 76-87, 2014.
- [21] Navin, P. K., Mathur Y. P., Layout and Component Size Optimization of Sewer Network Using Spanning Tree and Modified PSO Algorithm. *Water Resour Manage*, 30, 10, 3627-3643, 2016.
- [22] Afshar, M. H., Improving the Efficiency of Ant Algorithms Using Adaptive Refinement: Application to Storm Water Network Design. *Adv. Water. Resour.*, 29, 9, 1371-1382, 2006.
- [23] Afshar, M. H., Partially Constrained Ant Colony Optimization Algorithm for the Solution of Constrained Optimization Problems: Application to Storm Water Network Design. *Adv. Water. Resour.*, 30, 4, 954-965, 2007.
- [24] Afshar, M. H., A Parameter Free Continuous Ant Colony Optimization Algorithm for the Optimal Design of Storm Sewer Networks: Constrained and Unconstrained Approach. *Adv. Eng. Software*, 41, 2, 188-195, 2009.
- [25] Moeini, R., Afshar, M. H., Layout and Size Optimization of Sanitary Sewer Network Using Intelligent Ants. *Adv. Eng. Software*, 51, 49-62, 2012.
- [26] Moeini, R., Afshar, M. H., Constrained Ant Colony Optimisation Algorithm for the Layout and Size Optimisation of Sanitary Sewer Networks. *Urban Water. J.*, 10, 3, 154-173, 2013.
- [27] Moeini, R., M. H. Afshar., Arc Based Ant Colony Optimization Algorithm for Optimal Design of Gravitational Sewer Networks. *Ain Shams Engineering J.*, 8, 2, 207-223, 2016.
- [28] Karovic, O., Mays L. W., Sewer System Design Using Simulated Annealing in Excel. *Water Resour Manage*, 28, 13, 4551-4565, 2014.
- [29] Kumar, S., Navin, P. K., Mathur, Y.P., Optimization of Sewerage System Using Simulated Annealing. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 6, 11, 1-6, 2018.

- [30] Liang, L. Y., Thompson, R. G., Young, D. M., Optimizing the Design of Sewer Networks Using Genetic Algorithms and Tabu Search. *Eng. Constr. Archit. Manage.*, 11, 2, 101-112, 2004.
- [31] Haghghi, A., Bakhshipour A. E., Deterministic Integrated Optimization Model for Sewage Collection Networks Using Tabu Search. *J. Water. Resour. Plann. Manage.*, 141, 1, 1-11, 2014.
- [32] Liu, C., Han, H., Wang C., Qiao, J., An adaptive Differential Evolution Algorithm for Sewer Networks Design, *Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation Shenyang, China, 2014.*
- [33] Storn, R., Price, K., Differential Evolution a Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization Over Continuous Spaces. *J. Global Optim.*, 11, 341-359, 1997.
- [34] Keskindürk, T., Diferansiyel Gelişim Algoritması. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5-9, 85-99. 2006.
- [35] Mezura-Montes, E., Velazquez-Reyes, J., Coello Coello, C.A., A Comparative Study of Differential Evolution Variants for Global Optimization, *Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference (GECCO'06), USA, 2006.*
- [36] Price, K. V., Storn, R. M., Lampinen, J. A., *The Differential Evolution Algorithm, Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization Natural Computing Series, Springer, Berlin, 2005.*
- [37] Qin, A. K., Huang, V. L., Suganthan P. N., Differential Evolution Algorithm with Strategy Adaptation for Global Numerical Optimization. *IEEE Trans. Evol. Comput.*, 13, 2, 398-417, 2009.
- [38] Ayvaz, M. T., Application of Harmony Search Algorithm to the Solution of Groundwater Management Models. *Adv. Water Resour.*, 32, 6, 916-924, 2009.
- [39] Meredith, D.D., *Dynamic Programming with Case Study on Planning and Design of Urban Water Facilities, Treatise on Urban Water Systems, Colorado State University, Fort Collins, 1972.*
- [40] Miles, S. W., Heaney, J. P., Better Than Optimal Method For Designing Drainage Systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 114, 5, 477-499, 1988.
- [41] Afshar, M. H., Shahidi, M., Rohani, M., Sargolzei, M., Application of Cellular Automata to Sewer Network Optimization Problems. *Scientia Iranica Transactions A: Civil Engineering*, 18, 3, 304-312, 2011.
- [42] Mansuri, M. R., Khanjani, M. J., Optimization of Sewer Networks Using Nonlinear Method. *Journal of Water and Wastewater*, 30, 20-30, 1999.
- [43] Setoodeh, M., *Optimal Design of Sewer Networks, M.S. Thesis, Iran University of Science and Technology, 2004.*

Mekanistik-Ampirik ve Geleneksel Beton Yol Tasarım Yöntemlerinin Karşılaştırılması: Afyon-Emirdağ Deneme Kesimi

Emin ŞENGÜN¹
Hande I. ÖZTÜRK²
İ. Özgür YAMAN³

ÖZ

Türkiye'nin Karayolları Genel Müdürlüğü bünyesindeki ilk beton yol uygulaması olan Afyon-Emirdağ kesimi derzli donatsız beton kaplama olarak Belçika Katalog yöntemine göre tasarlanmıştır. Bu tasarım, hem geleneksel Amerikan Devlet Karayolu ve Taşımacılık İdareleri Birliği ampirik tasarım yöntemi (AASHTO 93) hem de mekanistik-ampirik (M-E) üstyapı tasarım yöntemi ile yeniden analiz edilerek, mevcut yol üzerinden aralıklarla ölçülen düzgünsüzlük (IRI) değerleri ile karşılaştırılmıştır. Saha ölçümleri ile M-E analizleri sonucu tahmin edilen IRI değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu tespit edilmiştir. M-E analizleri sonucunda mevcut yolun servis sürecinde düzgünsüzlük ve faylanma performans kriterlerine göre sınır değerleri aşacağı, ancak enine çatlak yönünden sınır değerler içinde kalacağı öngörülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Üstyapı tasarımı, Belçika katalog yöntemi, AASHTO 93 tasarım yöntemi, mekanistik-ampirik (M-E) tasarımı.

ABSTRACT

Comparison of Mechanistic-Empirical and Traditional Rigid Pavement Design Methods: Afyon-Emirdağ Trial Section

The first rigid pavement section in Turkey under the jurisdiction of General Directorate of Highways was designed as Jointed plain concrete pavement (JPCP) according to Belgian Catalog method. This design was compared with the traditional empirical American

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 15 Mayıs 2019 günü ulaşmıştır. 4 Aralık 2019 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.
- 30 Kasım 2020 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://dx.doi.org/10.18400/tekderg.565709>

1 Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - esengun@ybu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-7082-0061>

2 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - ozturkha@metu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0003-1597-5348>

3 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - ioyaman@metu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0001-6489-6852>

Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO-93) design method and with the mechanistic-empirical (M-E) pavement design guide. Moreover, the international roughness index (IRI) values measured with intervals were compared with the predicted values of M-E analysis. According to M-E analysis, it is predicted that IRI and faulting will exceed but the cracking will be within the limit values during its service life.

Keywords: Concrete pavement design, Belgian Catalog method, AASHTO 93 design method, mechanistic-empirical (M-E) design.

1. GİRİŞ

Türkiye'nin şehirlerarası yollardaki ilk beton yol uygulaması, Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) ile Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) arasında imzalanan bir protokol çerçevesinde, Afyon-Emirdağ Ayrımı (İşçehisar Geçişi) Km: 5+700-7+700 arasında 2 km'lik bölünmüş tek yönlü 3 şeritli taşıt yolunda TÇMB tarafından finanse edilerek gerçekleştirilmiş ve Haziran 2004 tarihinde trafiğe açılmıştır [1]. Daha önceden ülkemiz genelinde projelendirilmiş bir beton yol uygulaması olmadığından, beton yol tasarımı aşamasında ilgili teknik şartnamenin hazırlanması için Belçika Çimento Birliği (FEBELCEM) uzmanlarından yararlanılmıştır. Beton yol uygulaması üzerine önemli bir bilgi birikimine ve tecrübeye sahip olan Belçika Yol Araştırma Merkezi tarafından hazırlanan Belçika Katalog yöntemi (Centre de Recherches Routieres-CRR) deneme kesiminin tasarımında kullanılmıştır [2,3]. Belçika Yol Araştırma Merkezinde 30 seneyi geçen araştırma ve gözlemlere bağlı olarak üstyapıda meydana gelen çatlak ve deformasyonlar, trafik yükü, zemin özellikleri, iklim koşulları ve malzeme özellikleri de dikkate alınarak geliştirilen katalog yöntemi, tasarımcılara hızlı ve kolay bir şekilde tasarım yapılabilmesine olanak sağlamaktadır [4]. Hem katalog hem de analitik yöntemde tasarımı, beton kaplama tipi (sürekli donatılı veya derzli donatısız), hizmet ömrü, beklenen trafik, taban zemin özellikleri ve üstyapı malzeme özellikleri ile sıcaklık vb. iklim koşullarına bağlı parametreler etkilemektedir [4]. Dünya genelinde, üstyapı tasarım yöntemi olarak ampirik AASHTO 93 Rijit Üstyapı Yöntemi (Amerika Devlet Karayolları ve Ulaştırma İdareleri Birliği) oldukça sık kullanılmasına rağmen, bu beton yol uygulaması için Belçika Katalog yönteminin seçilmesinin en önemli nedenlerinden birisi yöntemin oldukça basit ve pratik olmasıdır.

Ancak gelişen teknolojik birikim ile başta ABD olmak üzere yol üstyapı tasarımı üzerine önemli çalışmalar yapılarak daha gerçekçi ve sürdürülebilir tasarımların ortaya çıkması adına ampirik tasarım yönteminden (AASHTO 93), mekanistik tasarım yöntemine doğru geçişte önemli adımlar atılmaktadır. ABD'de NCHRP (Ulusal Karayolları Birliği Araştırma Programı) tarafından 2002 yılında geliştirilen MEPDG (Mekanistik-Ampirik Üstyapı Tasarım Rehberi) bu amaca yönelik ilk tasarım yöntemidir ve yıllar içinde geliştirilerek günümüzde kullanılan haline almıştır [5,6]. Sonlu elemanlar yöntemine dayanarak geliştirilen bir yazılım sayesinde (AASHTOWare 2.0) bu yeni nesil mekanistik-ampirik (M-E) tasarım yönteminin mekanik kısmını, maruz kalınan trafik yüklerine ve çevresel koşullara bağlı olarak üstyapıda meydana gelecek gerilme, gerinim ve deformasyonların hesapları oluşturmaktadır. Diğer taraftan bu mekanistik büyüklüklerin, güvenilirlik katsayısı da göz önüne alınarak ampirik bozulma transfer fonksiyonlarına (distress transfer function) bağlı olarak çatlak, faylanma ve düzgünlük gibi üstyapı performansını etkileyen parametrelere dönüştürülmesi ve zamana göre tahmin edilebilmesi de tasarımın ampirik kısmını

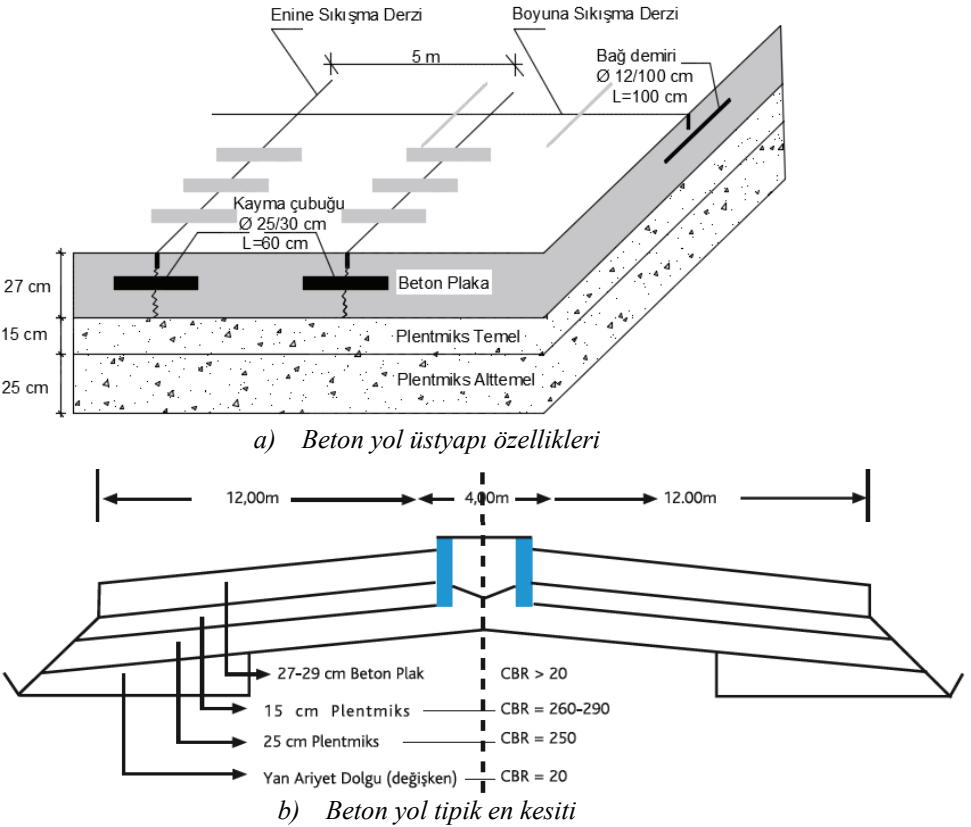
oluşturmaktadır [7]. Bundan dolayı tasarımın ampirik kısmını oluşturan üstyapıda meydana gelecek bozulmaların tahmin edilebilmesi için mevcut daha önceki üstyapı tecrübe ve gözlemlerine de dayanarak programın yerel kalibrasyonun yapılması, tasarımın daha gerçekçi sonuç vermesi ve bozulma tahminlerinin daha doğru yapabilmeye adına oldukça önemlidir. M-E tasarımın daha gerçekçi sonuçlar verebilmesi adına gerçekleştirilen yerel kalibrasyon çalışmaları, tasarımın ilk olarak geliştirildiği ve 2004 yılından itibaren eyaletler bazında kullanımına başlanan ABD’de halen devam etmekte olup, saha ölçümleri ile tasarım çıktıları karşılaştırılmakta ve elde edilen bulgular uluslararası literatürde sunulmaktadır [8–13]. Ayrıca tasarımın ortaya çıktığı ABD ve Kanada haricinde, Arjantin [14], Katar [15], Peru [16], Mısır [17], İran [18], Hindistan [19], Çin [20], Şili [21], Lübnan [22], Suudi Arabistan [23], Kore [24] ve İtalya [25] gibi diğer ülkelerde de M-E üstyapı tasarıma yönelik çalışmalara başlanılmış olup, yerel kalibrasyonuna yönelik çalışmalar devam etmektedir. Ülkemizde ise M-E tasarımına geçiş için yapılan ilk çalışma Öztürk vd. 2018 [7] tarafından farklı trafik, zemin, malzeme ve iklim koşulları için M-E yöntemle tasarlanan derzli donatsız rijit üstyapı sistemlerinin karşılaştırılması üzerinedir. Ancak bu çalışma kapsamında kullanılan tasarım girdileri, MEPDG’de önerilen ortalama değerlerdir.

Bu çalışma ile KGM bünyesindeki ilk beton yol uygulaması olan Afyon-Emirdağ Ayrımı İncehisar Geçişi deneme kesiminin, yaygın olarak tercih edilen geleneksel ampirik üstyapı tasarım yöntemine (AASHTO 93) göre tekrar tasarlanarak kaplama kalınlığının belirlenmesi ve yeni nesil mekanistik-ampirik tasarım yöntemine (M-E) göre seçilen hizmet ömrü boyunca mevcut üstyapının performans analizlerinin yapılması amaçlanmıştır. Bu çalışmanın materyal kısmını mevcut beton yol kaplama tasarım bilgileri ve performans ölçüm değerleri oluşturmaktadır. Çalışmada mevcut üstyapının farklı güvenilirlik ve trafik artış yüzdelerinde tekrar tasarlanması için AASHTO 93 yöntemi ile mevcut üstyapının yıllara göre değişen performans analizlerinin yapılabilmesi için M-E tasarım metodu kullanılmıştır. Çalışmanın değerlendirme bölümünde ise hem farklı güvenilirlik ve trafik artış yüzdelerine göre tekrar tasarlanan yolun kaplama kalınlığı ile mevcut yol tasarım kalınlığı karşılıklı irdelenmiş, hem de M-E tasarım yönteminin ülkemizde uygulanabilirliği için gerekli olan yerel kalibrasyon çalışmalarına öncülük etmesi için ilgili deneme kesimine ait KGM tarafından ölçülen beton yol kaplaması düzgünlük değerleri ile M-E kullanılarak hesaplanan IRI (Uluslararası Düzgünlük İndeksi) değerlerinin karşılaştırılması yapılmıştır. Çalışmanın son bölümünde ise elde edilen bulgular kısaca özetlenerek ileriye dönük beton yol tasarım çalışmaları ve yerinde uygulamalar için tavsiyelerde bulunulmuştur. Bu çalışma ile ülkemizde M-E tasarım yönteminin işlevselliği, gerçekçiliği ve lokal kalibrasyonu adına önemli bir adım atılmış olacaktır.

2. MEVCUT BETON YOL KAPLAMA TASARIM BİLGİLERİ VE PERFORMANS ÖLÇÜM DEĞERLERİ

Türkiye’nin KGM bünyesindeki ilk beton yol uygulaması olan Afyon-Emirdağ deneme kesiminin tipik en kesiti Şekil 1’de gösterilmiştir. Yeşinobalı’nın [2] raporunda yolun belirli bölümlerinde yaklaşık 1,5 cm kalınlığında sathi asfalt kaplamasının bulunduğu ve kot farklılıkları nedeniyle beton kaplama kalınlığının deneme kesiminde 27-30 cm arasında değiştiği belirtilmiştir [1,2].

Ülkemizde KGM'ye ait esnek üstyapı tasarım rehberi bulunmasına rağmen rijit üstyapı tasarım rehberi bulunmadığından, beton yol tasarımı ve ilgili teknik şartnamelerinin hazırlanması için Belçika Çimento Birliği (FEBELCEM) uzmanlarından yararlanılmış ve tasarımda Belçika Katalog yöntemi kullanılmıştır [2]. Belçika Katalog yöntemine göre tabaka kalınlığını belirlerken, trafik yükü, zemin temel, alt temel özellikleri, çevresel etkiler ve üstyapı malzeme özellikleri birlikte düşünülerek Belçika Şartnamesindeki B2 (<65 milyon 100kN standart eşdeğer dingil yükü tekerrür sayısı, ESAL) sınıfına uygun olarak derzli donatısız üstyapı kaplama (DDBK) tipi önerilmiştir. İlk olarak B2 katalog sınıfına [26] göre temel üzerine 5 cm'lik asfalt tabakası ve üzerine 23 cm'lik beton plaka düşünülürken, daha sonra asfalt tabakadan vazgeçilerek 27 cm beton plaka kalınlığına geçilmiştir [2]. Bu deneme kesimi KGM bünyesindeki ilk beton yol uygulaması olduğundan, gelecek uygulamalara yön göstermesi için özellikle kaplamada meydana gelen bozulmalar ve performans değerleri zaman zaman kayıt altına alınmaktadır. Türkiye'de KGM bünyesinde toplam dört yerde deneme amaçlı beton yol uygulamasının yanı sıra, Türkiye genelinde il ve ilçe belediyeleri ya da il özel idareleri tarafından gerçekleştirilen şehir içi ya da köy bağlantı yollarında yapılan küçük ölçekli birçok uygulama mevcut olması rağmen bunlara ilişkin detaylı bilgiler bulunmadığı için değerlendirilmeye alınması mümkün olamamaktadır.



Şekil 1 - Afyon Emirdağ Ayrım Yolu beton üstyapı tipik en kesitleri [1, 2].

Bu çalışma kapsamında incelenen bu yol kesimine ilişkin genel özellikler ile yol tasarımına ilişkin veriler Tablo 1’de derlenmiştir [1,2].

Tablo.1 - Afyon-Emirdağ deneme kesimi beton yol tasarım verileri [1,2].

Genel Bilgiler	
Bölgesi	KGM 3.Bölge
Kilometresi	5+700 - 7+700
Yapıldığı Tarih	Haziran 2004
Yol Tipi	Derzli Donatısız Beton Kaplama (DDBK)
Beton Yol Uzunluğu	2 km
Plaka Kalınlığı	27 cm
Platform Genişliği	12 m
Őerit Sayısı	3
Tasarım Yöntemi	Belçika Katalog Yöntemi
Trafik Verileri	
	112 tır
2003 Yılı Ortalama Günlük Taşıt (YOGT) Sayısı	1323 kamyon 550 otobüs 2061 otomobil
Beton Plağın Oturduğu Zemin Özellikleri	
Plentmiks Temel	15 cm
Plentmiks alt temel	25 cm
Derz Özellikleri	
Derz Aralığı	5 m
Kayma Demiri Çapı	25 mm
Kayma Demiri Boyu	60 cm
Kayma Demiri Aralığı	30 cm
Beton Karışımı	
Beton Dayanım Sınıfı	C30/37
Su/Çimento	0,41 – 0,47
CEM I 42.5 R	375 kg/m ³
Silis Dumanı	17,5 kg/m ³
Agrega	Kalker kökenli kırma çakıl ve kırma kum ile doğal kum karışımı, D _{maks} 32 mm

Mevcut yolun yapımından itibaren yol yüzeyinde belli zaman aralıklarında KGM tarafından ölçümleri gerçekleştirilen yüzey düzgünlüğü, kayma direnci, kum yama yöntemi ile yapı derinliği ölçüm değerleri ise Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo.2 - Afyon-Emirdağ Ayrım yolu performans değerleri [1].

Ölçüm Tarihi	IRI (m/km)	Kayma Direnci (SN)	Yapı Derinliği (mm)
2005	1,67	-	0,36
2006	1,73	43	0,31
2007	1,79	-	-
2008	1,82	35	0,26
2009	1,90	23	-
2012	1,98	-	-

Yüzey düzgünlüğü, tamamlanan üstyapı kaplamasına ait kalite kontrolünün sağlanması veya mevcut üstyapının değerlendirilerek bakım ya da yeniden yapımına karar verilebilmesi amacıyla göz önüne alınan parametrelerin başında gelmektedir. Üstyapılar için yüzey düzgünlüğünün belirlenmesinde çoğunlukla Uluslararası Düzgünlük İndeksi (IRI) kullanılmaktadır [27,28]. IRI, araç üzerine monte edilmiş kızılötesi alıcılara ve ivme ölçerlere sahip 80 km/saat sabit hızla giden bir ölçüm aracı vasıtasıyla düşey doğrultuda elde edilen yolun boyuna profilinin bir ölçüt değeri olup, birimi m/km’dir [29]. KGM tarafından da üstyapı yüzey düzgünlük değerlendirmeleri için IRI değerleri ASTM E-950 [30] standardı referans alınarak kullanılmakta ve profilometreler ile ölçülmektedir. Mükemmel düzgünlükte bir yolda IRI değeri 0’a yaklaşırken, boyuna düzgünlüğün artması ile IRI değeri de büyümektedir ve teorik olarak bir üst sınırı bulunmamaktadır. Limit IRI değerleri yol kaplama tipi, yolun fonksiyonu, limit hız değeri, yıllık ortalama günlük trafik (YOGT) değeri gibi parametrelere bağlı olarak ülkelere göre değişiklik göstermektedir [28]. Amerikan Ulusal Karayolları İdaresi (FHWA) tarafından yapılan bir çalışmada yeni yapılan bir beton yoldan beklenen ortalama IRI alt ve üst değerleri 0,89 ile 1,13 m/km olarak belirtilmiştir [31]. Amerikan Beton Yollar Birliği (ACPA) ise 2,80 m/km IRI değerini yola yeni bir yüzey kaplamasının gerekliliği için üst sınır olarak kabul etmektedir [32]. Türkiye’de ise KGM tarafından 2016 yılında yayınlanan Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesine göre tamamlanan beton yol kaplamalar için IRI değerinin en fazla 1,60 (m/km) değerinde olması istenmektedir [33].

Mevcut üstyapının değerlendirilmesi için kullanılan diğer önemli bir parametre de kayma direncidir. Üstyapıya ait kayma direnci standart ölçümler sonucu elde edilen kayma sayısı (Skid Number, SN) ile değerlendirilmekte ve 0 ile 100 aralığında değişmektedir. Kayma sayısı ne kadar büyükse yol yüzeyinin kaymaya karşı direncinin o kadar iyi olduğu anlaşılmaktadır. KGM tarafından sürtünme direnci ölçüm cihazı ile ASTM E-274 [34] şartnamesi referans alınarak 64 km/saat ($\pm 1,5$) hız için yol yüzeyi kayma direnci belirlenmektedir. Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesine göre yoldan beklenen SN limit değerleri YOGT değerlerine göre değişiklik göstermektedir. YOGT değerinin 7000’den

düşük olduğu hafif trafik hacimli yollarda SN değeri 35 ve üstü olarak istenirken, YOGT değerinin 7000 ve üzeri olduğu yüksek trafik hacimli yollarda bu değer 45 ve üzeri olarak istenmektedir [33]. Kayma direncini etkileyen en önemli parametrelerin başında mikro ve makro yol yüzeyi dokusu gelmektedir. Direkt olarak yol yüzeyi mikro dokusunun belirlenmesi oldukça zor olduğu için çoğunlukla dolaylı ölçüm teknikleri uygulanmaktadır. Diğer taraftan yol yüzeyi makro doku ölçümleri nispeten daha kolay olmakta genel olarak kum yama, lazer ve üç boyutlu fotoğraflama yöntemleri kullanılmaktadır [35,36].

Kum yama yöntemi, yol yüzey makro doku derinliğinin belirlenmesi için tüm dünyada oldukça sık başvurulan yöntemlerden birisidir. İngiltere’de geliştirilen bu yöntemin temelini, hacmi bilinen bir malzemenin yol yüzeyine uygulanarak kapladığı toplam alanın ölçülmesi sonucu yol yüzeyinin ortalama derinliğinin bulunması oluşturmaktadır [37]. Bu amaçla standart boyutlarda ve hacmi bilinen bir miktar kum (50 ml) kaplama girintilerini dolduracak şekilde yüzeye dairesel olarak yayılmakta ve ardından dairenin ortalama çapı ile kumun hacmi kullanılarak kum yüksekliği belirlenmektedir [38]. Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesine göre ortalama doku derinliği yollar için 0,6 mm ile 1,1 mm arasında olması beklenmektedir [33].

Tablo 2’deki mevcut yola ait IRI, SN ve yol yüzeyi yapı derinliği 2016 yılında KGM tarafından yayınlanan Beton Yol Kaplamaları Teknik Şartnamesindeki sınır değerler ile karşılaştırıldığında, IRI ve yol yüzeyi yapı derinliğinin tüm yıllar için sınır aralıkları dışında kaldığı, SN değeri içinse 2008 yılından itibaren sınır değerinin altına düştüğü görülmektedir. Ancak buradaki mevzu bahis yolun Türkiye’nin KGM bünyesindeki şehirlerarası yollardaki ilk beton yol deneme kesimi olduğu unutulmamalıdır. Örneğin düşük IRI değerleri ancak yol inşaatı sırasında gereken özeninin gösterilmesi ile belli tecrübeler ışığında sağlanabilmektedir.

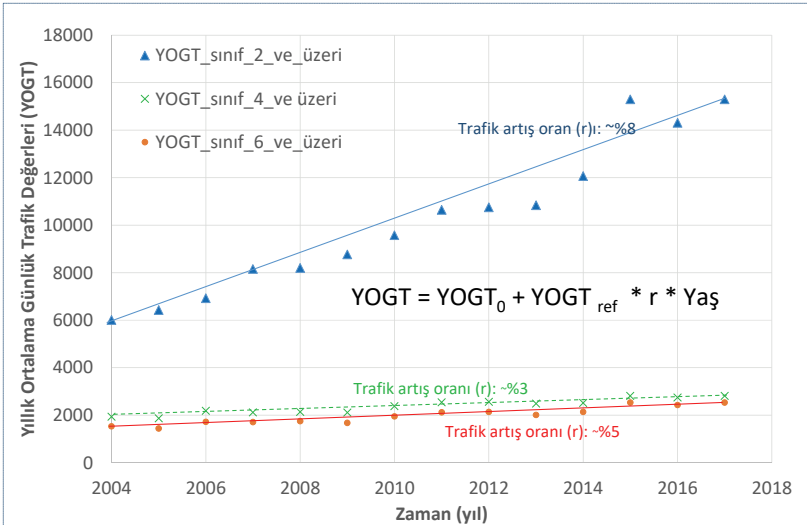
3. BETON YOL TRAFİK VERİLERİ

Rijit üstyapılar tasarımı için ABD’nin bazı yol idareleri ve birçok ülke idareleri tarafından halen AASHTO 93 yöntemi kullanılmaktadır. Öte yandan ABD’deki bazı eyalet yol idareleri ise M-E tasarım yöntemini tercih etmektedir [39]. Bu iki yöntem arasında daha önce değerlendirilen farklılıklardan bir tanesi de trafik verilerinin kullanılması aşamasındadır. Her iki tasarım yönteminde de gerekli olan proje trafiğinin hesaplanabilmesi için KGM tarafından 2004-2017 yılları arasındaki Afyon-Emirdağ Ayrım yolu için verilen YOGT değeri elde edilmiştir (Tablo 3) [40].

ABD Ulusal Karayolları İdaresi (FHWA) [41] tarafından belirlenen taşıt grubu sınıflarına göre; AASHTO 93 rijit üstyapı tasarımı yöntemi için sınıf 2 ve üzeri olan otomobil, orta yüklü ticari taşıt, otobüs, kamyon ve treyler tipi taşıtların tamamı proje trafiği hesaplamasında dikkate alınırken, M-E tasarım yönteminde ise sadece sınıf 4 ve üzeri olan otobüs, kamyon ve treyler tipi ağır taşıtlar proje trafiğinde dikkate alınmaktadır [5],[41,42]. Bu nedenle Tablo 2’de verilen 2004-2017 yılları arasındaki Afyon Emirdağ Ayrım yolu YOGT değerleri, trafik artış yüzdeleri sınıf 2 ve üzeri, sınıf 4 ve üzeri ve ayrıca yoldaki kamyon ve treyler trafiği artışının saptanabilmesi için sınıf 6 ve üzeri olmak üzere üç ayrı şekilde incelenmiştir (Şekil 2). Şekil 2’den de görüldüğü üzere sınıf 2 ve üzeri için yaklaşık %8, sınıf 4 ve üzeri için yaklaşık %3, sınıf 6 ve üzeri içinse yaklaşık %5’lik bir trafik artışı gerçekleşmiştir. Ayrıca artış oranlarından bu 13 yıllık süre içerisinde kamyon trafiğinin otobüs trafiğinden daha hızlı artış gösterdiği görülmektedir.

Tablo 3 - 2004-2017 yılları arasındaki Afyon-Emirdağ Ayrım yoluna ait YOGT değerleri [40].

Yıl	Trafik Grubuna Ait YOGT Değerleri				
	Otomobil	Orta yüklü ticari taşıt	Otobüs	Kamyon	Treyler
2004	3686	385	409	1270	262
2005	4126	436	427	1209	235
2006	4212	526	461	1391	335
2007	5488	551	404	1371	342
2008	5433	628	392	1467	284
2009	6049	608	434	1234	447
2010	6491	704	429	1389	565
2011	7407	691	425	1359	766
2012	7546	646	420	1250	892
2013	7620	732	480	1176	836
2014	9142	406	381	1024	1117
2015	11761	723	275	1004	1534
2016	11069	496	318	1086	1347
2017	11761	723	275	1004	1534



Şekil 2 - Afyon-Emirdağ Ayrım yoluna ait 2004-2017 yılları arasında trafik artış oranları [42].

Bu çalışmada, AASHTO 93 rijit üstyapı tasarım yönteminde üç farklı trafik artış yüzdesi (%3, %5 ve %8) kullanılmıştır. Fakat M-E tasarım yöntem için kullanılan AASHTOWare 2.0 sonlu elemanlar programında sadece sınıf 4 ve üzeri taşıt grupları için veri girişine izin vermesinden dolayı M-E tasarımı için sadece %3 ve %5'lik ağır taşıt trafiğindeki artış yüzdeleri kullanılmıştır. Sınıf 4 ve üzeri trafik artış oranının %8 olması çok anlamlı olmadığından M-E tasarımında bu trafik artış oranı kullanılmamıştır.

4. AMPİRİK AASHTO 93 ÜSTYAPI TASARIMI

Tasarım sırasında trafik verileri, alt temel ve temel kalınlıkları ve CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) değerleri ve ayrıca üstyapı malzeme özellikleri için mevcut deneme kesimine ait 2003 yılındaki tasarım verileri kullanılarak AASHTO 93 Rijit Üstyapı Tasarım Rehberine göre tasarım kalınlığı denklem (1) ile belirlenmiştir [43].

$$\log(T_{8,2}) = Z_R \times S_o + 7,35 \times \log(D + 1) - 0,06 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4,2-1,5}\right)}{1 + \frac{1,624 \times 10^7}{(D+1)^{8,46}}} + (4,22 - 0,32P_t) \times \log\left[\frac{(S_c)(C_d)(D^{0,75}-1,132)}{215,63(J)\left(D^{0,75}-\frac{18,42}{(E_c/k)^{0,25}}\right)}\right] \quad (1)$$

AASHTO 93 tasarım rehberine göre beton kaplama kalınlığına (D) etki eden faktörler yukarıda denklem (1) de görüldüğü üzere aşağıdaki parametrelerdir:

- $T_{8,2}$ trafik yükü; belirlenen hizmet ömrü boyunca beton kaplamanın hesap şeridine düşen toplam standart (8,2 ton) dingil yükü tekerrür sayısıdır.
- Z_R ve S_o ; beton kaplamanın inşası ve hizmet süresi boyunca oluşabilecek risklere ve bilinmezliklere karşı beklenen işlevselliği gösterebilmesi amacıyla tasarım esnasında belirlenen güvenilirliğe bağlı standart ve normal sapma değerleridir.
- ΔPSI Servis Kabiliyeti; yolun belirlenen yüksek hız ve hacimde kullanıcıya konforlu bir şekilde hizmet edebilme kabiliyetine bağlı olarak 0-5 arası değişen değerlerle tanımlanabilen bir ölçüttür. Yolun hizmete açıldığı durumdaki ilk servis kabiliyeti (P_0) ile performans ömrü sonundaki onarım ve takviye öncesi son servis kabiliyeti (P_t) arasındaki servis kabiliyeti farkı, tasarım kalınlığının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır. Yolun önemi, trafik hacmi, ekonomi ve iklim, zemin koşulları gibi çevresel faktörler göz önüne alınarak üstyapının ilk servis kabiliyeti (P_0) 4,2-4,5 arasında, son servis kabiliyeti (P_t) ise 2,0-2,5 arasında değişebilmektedir.
- Tasarıma etki eden beton karakteristik malzeme özellikleri; E_c elastisite modülü ve S_c kopma modülüdür.
- Efektif yatak modülü (k) değeri temel ve alt temelin üstyapıya sağlamış olduğu reaksiyon kuvvetinin göstergesidir.

- Yük transferi katsayısı (J), beton kaplamada yükün derzler ve çatlaklar boyunca transfer edilmesinin bir ölçütü olarak kaplama kalınlığına etki etmektedir. Genel olarak yük transfer mekanizmalarına kayma çubuklarının olup olmamasına ya da banketlerin cinsi ve yolla bağlantı durumlarına göre 2,3-4,4 arasında değişiklik göstermektedir. Derzlerde yük transferi artıkça yük transfer katsayısı düşmektedir.
- Drenaj katsayısı (C_d) da üstyapı drenaj koşullarına ve yıllık yağış miktarlarına bağlı olarak 0,7 (en kötü durum) ile 1,25 (en iyi durum) arasında değişmektedir. Genel olarak bir bilgi sahibi olunamaması durumunda etkisinin göz ardı edilmesi için 1,0 alınması önerilmektedir.

Mevcut yol için elde edilen veriler incelendiğinde temel ve alt temele ait taşıma özellikleri CBR'a göre verilmesinden dolayı ilgili verinin denklem (1) içinde kullanılabilmesi için ilk olarak CBR değerlerini efektif yatak modülüne dönüştürmek gerekmekte olup bu amaçla AASHTO 2002 Tasarım Rehberinde verilen aşağıdaki denklem (2) kullanılmıştır [42].

$$MR = 2555x CBR^{0,64} \quad (2)$$

Denklem (2)'de MR temel/alt temel esneklik modülü, CBR ise Kaliforniya Taşıma Oranını göstermektedir. Her bir tabakanın etkisi ayrı ayrı gözüne alınarak efektif yatak modülü 1161 pci bulunmuş ve daha sonra zemin zayıflama katsayısı ($LS=1,0$) alınarak düzeltilmiş efektif yatak zemin modülü 300 pci olarak belirlenmiştir.

Proje trafiğinin AASHTO 93 Rijit Üstyapı Tasarım Rehberine göre belirlenebilmesi için ilk olarak karayolu üzerinden geçen her araca ait çeşitli dingil yükleri, standart dingil yüküne (8,2 ton) çevrilmesi gerekmektedir. İkinci adımda ise tüm standart dingil yüklerine ait eşdeğer standart dingil yükü tekrür sayısı ($T_{8,2}$) hesaplanmakta ve hesaplama yapılırken aşağıdaki denklem (3) kullanılmaktadır.

$$T_{8,2} = t_i \times 365 \times \left(\frac{(1+r)^t - 1}{r} \right) \times TEF \times \frac{\eta}{i} \quad (3)$$

Burada t_i yıllık ortalama günlük trafik sayısını, r trafik artış oranını, t yıl olarak süreyi, TEF taşıt eşdeğerlilik faktörünü, η hesap şeridi faktörünü, i ise trafik yönü sayısını göstermektedir. Taşıt eşdeğerlilik faktörleri (TEF) karayolu üzerindeki araçlara ait çeşitli dingil yüklerini standart dingil yüküne çevirmek için kullanılan katsayıdır. TEF bulunurken AASHTO 93 Rijit Üstyapı Tasarım Rehberinde bulunan bir dizi formülasyon kullanılmaktadır [43]. Bu formülasyon sonucu elde edilen dingil eşdeğerlilik faktörü (DEF), her taşıt grubuna ait dingil ağırlığı ile çarpılarak toplam taşıt sayısına bölünmesi ile taşıt eşdeğerlilik faktörünü (TEF) bulunmaktadır. Bu hesaplarda kullanılan denklem (4-8) aşağıda verilmiştir.

$$\log \left(\frac{T_x}{T_{8,2}} \right) = 4,62 \log(18 + 1) - 4,62 \log(L_x + L_2) + 3,28 \log(L_2) + \frac{G_t}{\beta_x} - \frac{G_t}{\beta_{18}} \quad (4)$$

$$G_t = \log \left(\frac{4,5 - P_t}{4,5 - 1,5} \right) \quad (5)$$

$$\beta_x = 1,00 + \frac{3,63(L_x + L_2)^{5,20}}{(D+1)^{8,46} L_2^{3,52}} \quad (6)$$

$$\beta_{18} = 1,00 + \frac{3,63(18+1)^{5,20}}{(D+1)^{8,46}13,52} \quad (7)$$

$$TEF = \frac{T_{8,2}}{T_x} \quad (8)$$

Burada; T_x “t” yıl sonra “x” dingil yükünün tekerrür sayısı, $T_{8,2}$ ise “t” yıl sonra standart dingil yükü tekerrür sayısını, L_x tek/tandem/tridem dingil üzerindeki yükün kip birimi ile gösterimini, L_2 dingil kodu (1 tek, 2 tandem, 3 tridem), P_t son servis kabiliyeti ve D beton plaka kalınlığının inç birimi ile gösterimidir. Bu çalışma için alınan Taşıt Eşdeğerlilik Faktörleri (TEF) değerleri Tablo 4’te verilmiştir [1].

Tablo 4 - AASHTO 93 Rijit Üstyapı Tasarımı için alınan Taşıt Eşdeğerlilik Faktörleri [1].

Trafik Grubu	Taşıt Eşdeğerlilik Faktörleri (TEF)
Otomobil	0,0006
Orta yüklü ticari taşıt	0,70
Otobüs	3,40
Kamyon	3,80
Treyler	6,60

Tablo 5 - Afyon-Emirdağ Ayrım yolu AASHTO 93 beton plaka kalınlık tasarımı girdileri.

S_c	600 (psi)	Beton Kopma Dayanımı
E_c	4.200.000 (psi)	Beton Elastisite Modülü
k	300 (psi/in)	Efektif Yatak Zemin Modülü
Z_R	85-90-95-99 (%)	Güvenilirlik
S_o	0,35	Standart Sapma
J	2,8	Yük Taşıma Katsayısı
C_d	1	Drenaj Katsayısı
P_0	4,2	İlk Servis Kabiliyeti
P_t	2,5	Son Servis Kabiliyeti
ΔPSI	1,7	Servis Kabiliyeti Farkı
t_i	4046	Yıllık Ortalama Günlük Trafik (YOGT)
r	3-5-8 (%)	Trafik Artış Oranı
η	0,80	Hesap Şeridi Faktörü
i	2	Trafik Yönü Sayısı

Proje trafiğinin belirlenmesi ile deneme kesimine ait beton kaplama kalınlığı tasarımı, AASHTO 93 Rijit Üstyapı Tasarım Rehberine göre yola ait mevcut veriler (Tablo 5) kullanılarak yapılmıştır.

Bu çalışmada, yolun trafiğe açılması ile uygulanması planlanan ilk takviye tabakasına kadar geçen zamanki aralığını temsil eden proje süresi 20 yıl; tüm bakım onarım ve takviye tabakalarını içeren ve yolun üstyapı ömrünü tamamlaması neticesiyle biten ve literatürde analiz süresi olarak belirtilen zaman dilimi ise 30 yıl olarak seçilmiştir. Ancak bu çalışmanın amacı mevcut yola ait ilk tasarım kalınlıklarının farklı tasarım yöntemlerine göre karşılaştırması olduğu için analiz süresi içerisindeki kademeli inşaat projesi ve tabaka takviyesi bu çalışma kapsamı dışına çıkmaktadır. Buna rağmen, bu çalışmada proje süresi hem 20 yıl için hem de proje süresi analiz süresine eşit alınarak 30 yıl esas alınarak proje trafiği belirlenmiştir.

AASHTO 93 Rijit Üstyapı Tasarım Rehberine göre Tablo 5'te bulunan verileri denklem (1) de kullanarak, iki farklı proje süresi (20 ve 30 yıl), üç farklı trafik artış yüzdesi (%3, %5 ve %8) ve buna bağlı olarak üç farklı eşdeğer standart dingil yükü tekerrür sayısı ($T_{8,2}$) hesaplanarak, dört farklı güvenilirlik düzeyinde (%85, %90, %95, %99) toplamda 24 farklı durum için beton kaplama tasarım kalınlığı yapılarak Tablo 6'da verilmiştir. Tablodan da görüleceği üzere hesaplanan beton plaka kalınlıkları, mevcuttaki 27 cm beton plaka kalınlıklarından hem 20 yıllık hem de 30 yıllık servis süreleri için daha yüksek bulunmuştur. Dolayısıyla, Belçika Katalog yöntemine göre hesaplanan 27 cm'lik kalınlık, AASHTO 93'e göre daha düşük bulunmaktadır.

Tablo 6 - AASHTO 93 ile hesaplanan Afyon-Emirdağ Ayrım yolu beton plaka kalınlıkları.

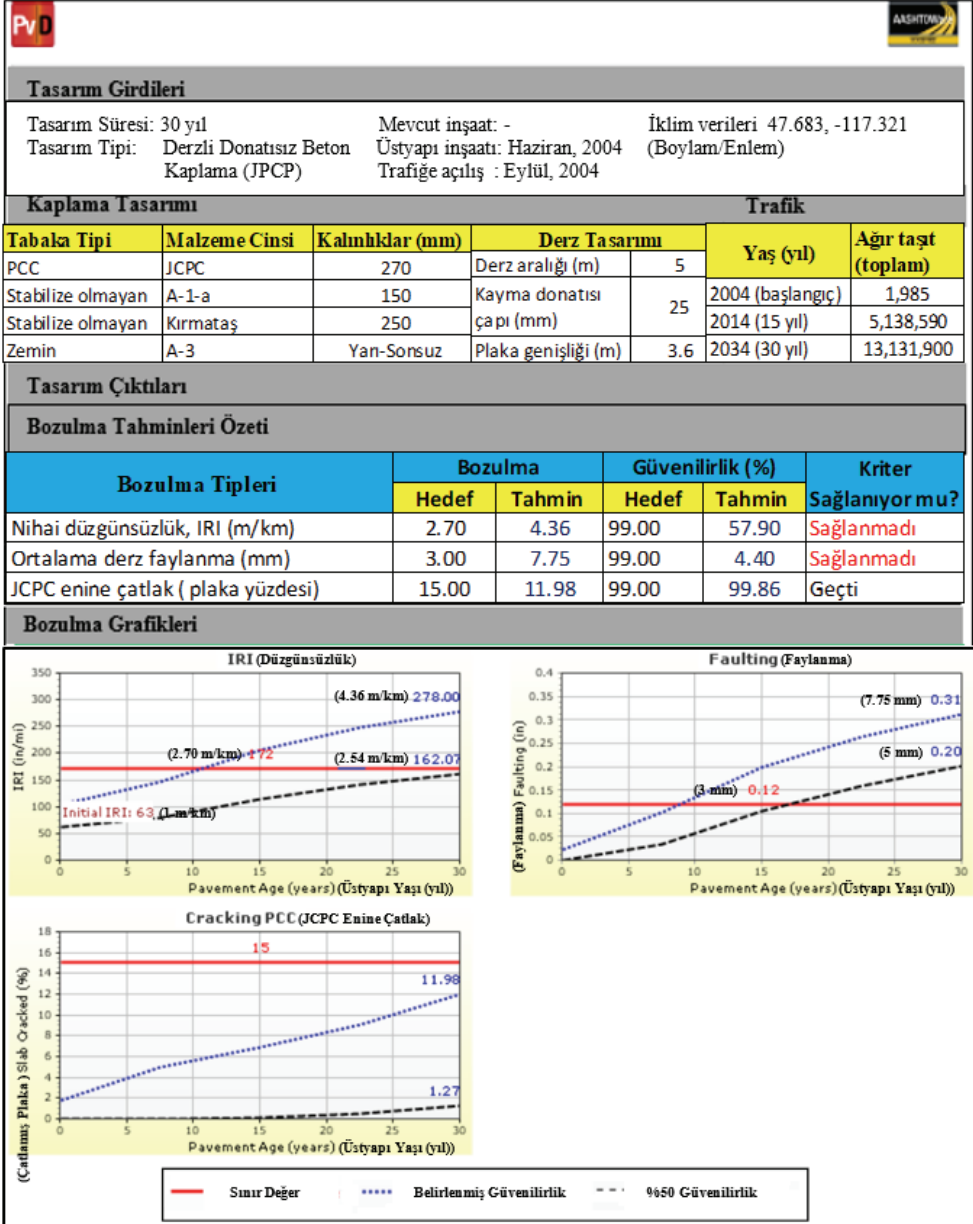
Güvenilirlik	Trafik Artış Yüzdesi	Proje Süresi			
		20 yıl		30 yıl	
		ESAL ($T_{8,2}$)	Tasarım kalınlığı (cm)	ESAL ($T_{8,2}$)	Tasarım kalınlığı (cm)
%85			28		31
%90	%3	29.963.386	29	53.057.607	32
%95			31		33
%99			33		35
%85			29		33
%90	%5	36.877.155	30	74.088.848	34
%95			32		35
%99			34		38
%85			31		35
%90	%8	51.028.081	32	126.321.263	36
%95			33		38
%99			35		41

5. MEKANİSTİK AMPİRİK (M-E) ÜSTYAPI TASARIMI

Çalışmanın bu kısmında mevcut beton yolun özellikleri kullanılarak AASHTOWare 2.0 sonlu elemanlar yöntemi ile yüzeydeki zamana karşı oluşacak bozulmalar, üstyapı performansı, analiz edilmiştir. Öztürk vd. [7] tarafından yapılan bir çalışmada ayrıntılı olarak ele alındığı üzere, bu yeni tasarım yöntemini diğer ampirik yöntemlerden ayıran en önemli özellik, tasarımın mekanik kısmını oluşturan trafik yüklerine ve çevresel koşullara bağlı olarak üstyapıda meydana gelecek gerilme, birim şekil değiştirme ve deformasyonların hesaplanabilmesidir. M-E tasarım yönteminin diğer yöntemlerden ayıran diğer önemli bir özelliği ise tasarım girdilerinin daha gerçekçi ve ayrıntılı bir şekilde tanımlanmasıdır. Özellikle trafik yüklerinin belirlenmesi için diğer yöntemlerden farklı olarak eşdeğer standart dingil yükü (ESAL) yaklaşımı yerine daha gerçekçi, her araca özel tam spektrumlu dingil yüklerinin ayrı ayrı tanımlanabilmesidir. Malzeme karakteristik özelliklerinin belirlenebilmesi için diğer yöntemlerdeki beton elastisite ve kopma modülünden farklı olarak ayrıca çekme dayanımı, basınç dayanımı, poisson oranı, termal genleşme katsayısı, birim hacim ağırlığı ve rötre birim şekil değiştirmesi gibi betonun karakteristik özellikleri de kullanılmaktadır.

Ayrıca, çevresel etkilerin performansa etkisinin hesaplanabilmesi için detaylı bir iklim verisinin kullanılması gerekmektedir. Tüm bu veriler, çalışmanın önemi ve mevcut veri detayına bağlı olarak program içerisinde üç seviyede (Seviye 1-2-3) tanımlanmıştır. Seviye 1'deki tasarım girdilerini zeminler için saha deney sonuçlarını, üstyapı beton malzemesi için ise laboratuvar testleri sonuçlarından elde edilen veriler oluşturmaktadır. Seviye 1 girdileri daha gerçekçi sonuçlar vermesine rağmen elde edilmesi uzun zaman almaktadır ve yüksek maliyetlidir. Seviye 2'deki tasarım girdileri yerel olarak kalibre edilmiş korelasyon denklemleri yardımıyla elde edilen verilerdir. Seviye 3'teki tasarım girdileri ise M-E tasarım kataloğunda önerilen standart tasarım verileridir. Seviye 3'teki veriler daha çoğunlukla ABD ve Kanada'da dışında yerel kalibrasyonun henüz tamamlanmadığı ülkelerde genel olarak tercih edilmektedir [14-25,33]. Ülkemizde henüz kalibrasyon çalışması olmadığı için bu çalışma kapsamında Seviye 3 tasarım verileri kullanılmıştır.

Bu çalışmada, Afyon-Emirdağ deneme kesimine ait beton yol tasarım verileri (Tablo 1) program girdisi olarak kullanılmıştır. Ayrıca, M-E tasarım yöntemini diğer ampirik yöntemlerden ayıran en önemli hususlardan bir diğeri ise iklim etkisidir. Buna ilişkin tasarımda ihtiyaç duyulan veriler ise yolun yapılacağı bölgeye ait günlük, aylık ve yıllık sıcak değerleri, yağış miktarları, rüzgâr hızları, nem ve güneş ışığı yüzdeleridir. ABD ve Kanada dışında bu verilere sahip ülkeler henüz bulunmadığı için bu ülke dışında M-E tasarımı yapılan çalışmalarda ABD eyaletlerine ait eşdeğer iklim verileri kullanılmıştır [15,16,20,22,25]. Bu çalışma kapsamında da Afyon-Emirdağ Ayrım yolu M-E beton yol tasarımında yapılan eşleştirmeler neticesinde eşdeğer iklim verisi için Afyonkarahisar bölgesi için eşleştirilen Spokane WA istasyon verileri kullanılmıştır [7]. Eşleştirmede yıllık ortalama minimum kış ayı sıcaklığı, yıllık ortalama maksimum yaz ayı sıcaklığı, yıllık ortalama ilkbahar ve sonbahar sıcaklık, yıllık ortalama sıcaklık ve yıllık ortalama yağış verileri ve yükseklik açısından benzerlik saptanan istasyonlar ön eşleşmeye tabi tutulmuş ve son eşleştirmede ise yıllık ortalama günlük güneşlenme şiddeti, ortalama rüzgâr hızı ve ortalama bağıl nem dikkate alınmıştır.



Şekil 3 - M-E analizleri ile %99 güvenilirlik ve %5 trafik artışı için 30 yıllık performans süresi sonunda Afyon-Emirdağ Beton Yolu Performans Değerleri (Türkçeye çevrilmiş program çıktısı).

Tablo 7 - M-E tasarımı ile mevcut yola ait performans analizi.

Güvenilirlik (%)	Bozulma Tipleri	Bozulma Tipi Limit Değerleri	Trafik Artış Hızı					
			3%			5%		
			30 yıl sonra hesaplanan değer	Kriter Sağlıyor Mu?	Limit Değere Ulaşma Yılı	30 yıl sonra hesaplanan değer	Kriter Sağlıyor Mu?	Limit Değere Ulaşma Yılı
85	Nihai Düzgünlük (IRI) m/km	2,7	3,2	X	21	3,4	X	17
	Ortalama Derz Faylanması (mm)	3	5,8	X	14	6,3	X	12
	Enine Çatlak Görülen Plaka Yüzdesi	15	5,2	✓	>30	6,0	✓	>30
90	Nihai Düzgünlük (IRI) m/km	2,7	3,4	X	17	3,5	X	16
	Ortalama Derz Faylanması (mm)	3	6,0	X	12	6,5	X	11
	Enine Çatlak Görülen Plaka Yüzdesi	15	6,2	✓	>30	7,2	✓	>30
95	Nihai Düzgünlük (IRI) m/km	2,7	3,6	X	15	3,8	X	13
	Ortalama Derz Faylanması (mm)	3	6,5	X	11	7,0	X	10
	Enine Çatlak Görülen Plaka Yüzdesi	15	7,7	✓	>30	8,8	✓	>30
99	Nihai Düzgünlük (IRI) m/km	2,7	4,1	X	11	4,4	X	10
	Ortalama Derz Faylanması (mm)	3	7,3	X	9	7,8	X	8
	Enine Çatlak Görülen Plaka Yüzdesi	15	10,5	✓	>30	12,0	✓	>30

%3 ve %5 olmak üzere iki farklı trafik artış yüzdesi ile %85-%90-%95 ve %99 olmak üzere dört farklı güvenilirlik düzeyi için ayrı ayrı gerçekleştirilerek toplamda sekiz analiz yapılmıştır. Analizler sırasında, yol geçişi boyunca 27 cm'lik minimum beton plaka kalınlığı sabit tutulmuştur. Yeğinobalı [2] tarafından belirtilen ve bazı bölgelerde gerekli yol kotunun sağlanması için 30 cm'e kadar artırılan plaka kalınlığı ve 1,5 cm'lik sathi kaplama analizlerde dikkate alınmamıştır. Analizlerde M-E tasarımın performans tahmini yapması için gerekli olan limit değerler; yüzey düzgünlüğü için 2,7 m/km, faylanma için 3 mm ve enine çatlaklar için %15 performans değerleri sınır değerler olarak kabul edilmiştir. Bu değerler, AASHTO tarafından önerilen tipik değerlerdir. Tipik bir analiz özeti Şekil 3'te gösterilmiştir. Bu analizden de görüleceği üzere 30 yıllık bir tasarım süresi ve %99'luk güvenilirlik için hedeflenen 2,70 m/km'lik IRI (Uluslararası Düzgünlük İndeksi), 3 mm'lik ortalama derz faylanması ve plakaların %15'inde enine çatlak oluşması durumu M-

E analizi sonucunda sırasıyla 4,36 m/km, 7,75 mm ve %11,98 olarak hesaplanmıştır. Bu durumda da beton yol 30 yıllık tasarım süresi sonrasında yüzey düzgünlüğü ve derz faylanması performans kriterlerini sağlayamayacak, enine çatlama performans kriterini ise sağlayabilecektir.

Bu şekilde yapılan M-E performans analizlerinin sonuçları Tablo 7’de özetlenmiştir. Bu tablodan da görüleceği üzere, 27 cm beton plaka kalınlığına ve 5 m derz aralığına sahip mevcut yolun 30 yıllık servis süresi içinde her durumda yüzey düzgünlüğü ve derz faylanması performans sınır değerlerini aşacağı, ancak enine çatlak performans sınır değerleri içerisinde kalacağı tespit edilmiştir (Tablo 7).

6. DEĞERLENDİRME

Mevcut deneme kesiminin AASHTO 93 ile yapılan analizlere göre hem trafik artış yüzdesinden hem de güvenilirlikten bağımsız olarak beton plaka kalınlığı için mevcuttaki 27 cm’den daha kalın sonuçlar elde edilmiştir. Seçilen güvenilirlik yüzdesine bağlı olarak önerilen plaka kalınlığının 4-5 cm değişebildiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca trafik artış yüzdesinin de plaka kalınlığını 1-2 cm değiştirdiği gözlemlenmiştir. Tasarım ömrünün 20 yıldan 30 yıla çıkarılması plaka kalınlığında 2-6 cm artışa sebep olduğu ayrıca göz önüne alınmalıdır. Bu bağlamda 20 yıllık bir tasarım ömrü ile yapılan tasarımı ve 20 yılın ardından yapılacak bir bakım-onarım ile toplam servis ömrünün 30 yıla çıkarılması veya 30 yıllık bir tasarım ömrü ile yapılan bir dizaynın ekonomik girdileri ve çıktıları ayrıca ele alınmalıdır.

Belçika Katalog Yöntemi ile üstyapı tasarımı gerçekleştirilirken proje trafik sınıfının B2(<65 Milyon ESAL 100 kN) olarak öngörüldüğü bilinmektedir [2]. Benzer trafik yük miktarına sahip olan tasarım Tablo 6’ya göre, 30 yıl tasarım ömrü ve %5 trafik artış yüzdesi ile yaklaşık 75 Milyon ESAL 80 kN olan tasarımıdır. Plaka tasarım kalınlıkları %85, %90, %95 ve %99 güvenilirlik için sırasıyla 33, 34, 35 ve 38 cm olarak hesaplanmıştır. KGM tarafından Esnek Üstyapı Tasarım Rehberinde [45] devlet yolları için belirtilen %85’lik güvenilirlik düzeyinin rijit üstyapılar için de aynı olduğu varsayılırsa plaka kalınlığının AASHTO 93 yöntemine göre mevcuttan 5 cm kalın olacak şekilde 33 cm olarak seçilmesi gerekmektedir. Fakat, bu noktada Afyon Emirdağ yol ayrımında 2004 yılından itibaren öngörülemeyen oranda ağır taşıt trafiğinde artış olduğu tahmin edilmektedir. Bu çalışmada da gerçek trafik artış değerleri kullanılması sebebiyle tasarım kalınlıkları daha yüksek çıkmaktadır.

Bu çalışmanın ikinci aşamasında ise, mevcut Afyon Emirdağ beton yolu için AASHTO tarafından önerilen hedef bozulma değerlerine kaçınıcı yılda ulaşılabileceği ve saha ölçümlerinden elde edilen performans değerleri ile M-E tasarım yönteminden elde edilen performans çıktılarının karşılaştırılması yapılmıştır. Beklenildiği üzere tasarımda güvenilirlik yüzdesi artırıldıkça tahmin edilen bozulma suresinde kısalma olmaktadır. Program çıktıları incelendiğinde tahminler arasında on yıla varan farklılıklar olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca analiz sonuçlarına göre yüzey düzgünlüğünün ve derz faylanmasının daha kritik bozulmalar olduğu görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında ayrıca M-E tasarım yönteminin işlevselliği, gerçekçiliği ve lokal kalibrasyonu adına M-E tasarım yönteminden elde edilen performans çıktıları ile halihazırdaki yola ait KGM tarafından ölçülen gerçek saha performans değerlerinin karşılaştırılması önemli olacaktır. Ancak Tablo 2’den de görüldüğü üzere mevcut yol

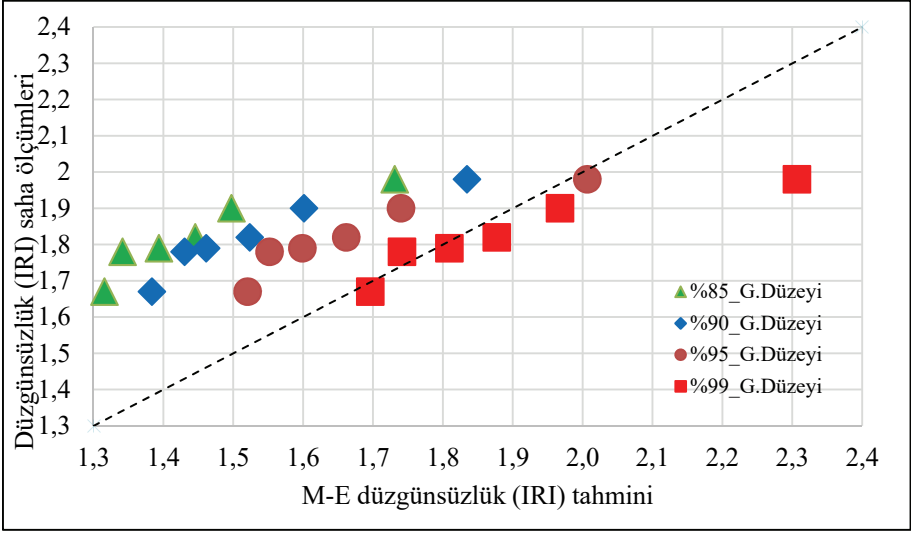
üzerinden KGM tarafından ölçülen farklı yıllara ait performans parametreleri ile M-E tasarım yönteminden elde edilebilen performans parametreleri karşılaştırıldığında ortak tek bir parametrenin yani IRI değerinin mevcut olduğu görülmektedir. Halihazırdaki yol için derz faylanması ve enine çatlak yüzdesine ait saha ölçümleri mevcut değildir. Diğer taraftan M-E tasarım yönteminde de SN değeri ve yol yüzeyi ortalama yapı derinliği performans çıktıları bulunmamaktadır. Bundan dolayı mevcut yola ait saha ölçüm performans değerleri ile M-E tasarım yönteminden elde edilen performans çıktılarından sadece IRI değeri karşılaştırabilmektedir. Ancak burada IRI değerinin üstyapı tasarımında kullanılan hizmet düzeyi (PSI) ile doğrudan ilişkili olduğu göz önüne alınırsa [46-48] ve ayrıca üstyapı performansının değerlendirilmesi için tek bir indeksin kullanılmasının benimsendiği çalışmalarda düzgünlüğün tercih edildiği düşünülürse [35] yapılacak bu karşılaştırmanın da ne kadar önemli olduğu anlaşılmaktadır.

Halihazırdaki yola ait KGM tarafından ölçülen farklı yıllara ait saha ölçüm IRI değerleri ile M-E tasarım yöntemi performans çıktısı IRI değerleri Tablo 8’de verilmiştir.

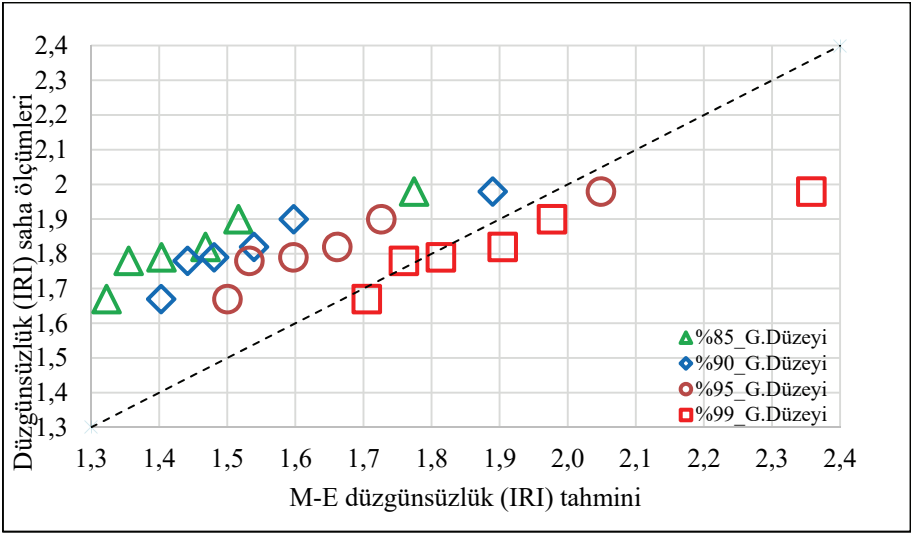
Tablo 8 - Afyon-Emirdağ Ayrım Yolu IRI saha ölçümlerinin ve M-E tahminlerinin karşılaştırılması.

Yıllar	IRI Saha Ölçümleri [1]	IRI M-E Sonlu Elemanlar Tahmini							
		% 3 Trafik Artışı				% 5 Trafik Artışı			
		Güvenilirlik Düzeyi				Güvenilirlik Düzeyi			
		% 85	% 90	% 95	% 99	% 85	% 90	% 95	% 99
2005	1,67	1,32	1,38	1,52	1,70	1,32	1,40	1,50	1,70
2006	1,78	1,34	1,43	1,55	1,74	1,35	1,44	1,53	1,76
2007	1,79	1,39	1,46	1,60	1,81	1,40	1,48	1,60	1,81
2008	1,82	1,45	1,52	1,66	1,88	1,47	1,54	1,66	1,90
2009	1,90	1,50	1,60	1,74	1,97	1,52	1,60	1,73	1,98
2012	1,98	1,73	1,83	2,01	2,31	1,77	1,89	2,05	2,36

Şekil 4’ten de görüldüğü üzere %99 güvenilirlik düzeyi için M-E AASHTOWare 2.0 Sonlu elemanlar yöntemi ile tahmin edilen IRI değerleri ve gerçek saha ölçümlerinden elde edilen değerler birbirine oldukça yakındır. Bu nedenle bu çalışmada Tablo 8’de %99 güvenilirlik düzeyi için tahmin edilen bozulma değerlerinin daha gerçekçi olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple 30 yıllık servis ömrünün sonunda hiçbir bakım onarım yapılmaması halinde yaklaşık 4 m/km nihai düzgünlük ve derzlerde 7 mm faylanma olması öngörülmektedir. Halihazırda yol yüzeyinde malzeme kaynaklı bazı çatlaklar gözlemlenmiş olup derzlerde faylanma henüz oluşmamıştır. Fakat elimizdeki açık veri kaynağı 2012 yılına kadar olduğu için sadece 2005-2012 yılları arasındaki sınırlı veri kullanılarak yukarıdaki öngörülerde bulunulmuştur. AASHTO 93 tasarım sonuçları da göz önüne alınarak beton plaka kalınlığının hem 20 hem de 30 yıllık servis ömürleri için yetersiz olduğu sonucuna varılmıştır.



(a) %3 trafik artışı



(b) %5 trafik artışı

Şekil 4 - Afyon-Emirdağ ayrımı ölçüme dayalı ve M-E analizi tahmini IRI değerlerinin korelasyonu.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Türkiye'nin ilk beton yolu olma özelliğine sahip Afyon Emirdağ Ayrımı 5+700 – 7+700 km'leri arası deneme kesimi Belçika katalog yöntemi ile 27 cm beton plaka kalınlığı ile üst

yapı tasarımı gerçekleştirilmiş olup 2004 yılında trafiğe açılmıştır. Bu çalışmada farklı trafik artış oranları ve farklı güvenilirlik düzeyleri ile aynı trafik yükü, zemin koşulları, temel kalınlıkları, üstyapı malzeme özellikleri dikkate alınarak AASHTO 93 ampirik yöntemi ile tasarlanmış ve yeni nesil mekanistik ampirik yöntemi (M-E) kullanılarak halihazırdaki yola ait tasarım analiz edilerek, yerel kalibrasyon çalışmalarına öncülük etmesi açısından mevcut ve tahmin edilen düzgünlük değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular neticesinde;

- Yaygın olarak tercih edilen üstyapı tasarım yöntemlerinin başında gelen AASHTO 93 ampirik yöntemi ile yapılan tasarımlarda hem trafik artış yüzdesinden hem de güvenilirlikten bağımsız olarak beton plaka kalınlığı için mevcuttaki 27 cm'den daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. %5'lik trafik artış oranı için halihazırdaki yolun 29 cm beton plaka kalınlığı ile 20 yıllık proje süresinin, 33 cm beton kalınlığı ile de 30 yıllık proje süresinin sağlanabileceği öngörülmüştür. Bunun bir sebebinin de bu yol kesiminde öngörülemeyen oranda gerçekleşen ağır taşıt trafiği artışı olduğu tahmin edilmektedir.
- M-E tasarım yöntemi ile hâlihazırdaki beton yolun performans tahmini yapılmış ve bu koşullarda güvenilirlik düzeyine bağlı olarak yüzey düzgünlüğü açısından ortalama 14. yıldan itibaren, derz faylanması nedeniyle de ortalama 10. yıldan itibaren performans kriterlerine göre sınır değerleri aşacağı, ancak çatlak yönünden 30 yıl süresince sınır değerler içinde kalacağı öngörülmüştür. Her iki yöntem birlikte göz önünde bulundurulduğunda beton plaka kalınlığının hem 20 hem de 30 yıllık servis ömürleri için ince olduğu sonucuna varılmıştır.
- M-E tasarım yönteminden elde edilen 1. yıl, 2. yıl, 3. yıl, 4. yıl, 5. yıl ve 8. yıl IRI tahmini performans değerleri sahada ölçülen IRI değerleri karşılaştırıldığında güvenilirlik düzeyleri artıkça düzgünlük değerlerinin gerçek saha değerlerine daha çok yaklaştığı görülmüştür. %99'luk güvenilirlik düzeyi için en yakın sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 4). Bu da yeni nesil M-E yönteminin daha kısıtlı şartlara sahip ampirik yöntemlere göre saha koşullarını daha iyi temsil ederek üstyapı tasarımını gerçekleştirebileceğini göstermektedir. Ancak daha önce de belirtildiği üzere, M-E tasarımlarının daha gerçekçi sonuçlar verebilmesi ve bozulma tahminlerini daha doğru yapabilmesi adına her ülke/eyalet/bölge/şehir bazında yerel kalibrasyon gerekmektedir. Ülkemizde ise beton yol uygulamasının oldukça kısıtlı olması ve var olan beton yolların da belediyeler tarafından uygulanması neticesinde bu şartlar altında sağlıklı verilere ulaşılabilmemesinin pek de mümkün olunamaması nedeniyle sadece çalışmada incelenen mevcut deneme kesimi için karşılaştırma yapılabilmektedir.

Ülkemizde henüz tecrübe edilmeyen ve dünyada ABD başta olmak üzere gelişmiş bazı ülkelerde yeni yeni kullanıma geçen ancak birçok ülke tarafından uygulanabilirliği için ön araştırma çalışmaları devam eden yeni nesil M-E yol üstyapı tasarım yöntemi, kullanımında uzmanlık gerektirmesi ve diğer yöntemlere göre daha fazla veriye ihtiyaç duymasına rağmen hem daha gerçekçi tasarımlar yapılabilmesi, hem de yol üstyapı hizmet ömrü boyunca yapısal ve performans ölçütleri açısından görülebilecek deformasyonları tahmin edebilmesi açısından oldukça önemli ve gerçekçi bir tasarım yöntemidir. Ülkemizde de KGM tarafından bir beton yol projelendirme rehberi hazırlanması ve bunu yaparken M-E tasarım yöntemini de referans alması önemlidir. Ayrıca diğer yöntemlerden farklı olarak M-E tasarımı için kalibrasyon seçeneği mevcuttur ve bu da bölgesel deneyimlerin, malzeme özelliklerinin ve

iklim koşullarının daha hassas bir şekilde tasarıma dahil edilmesini sağlamaktadır. Sonuç olarak, bu çalışma bir taraftan ülkemiz adına oluşturulması düşünülen beton yol projelendirme rehberi hazırlama sürecine bilgi birikimi olarak bir altlık oluştururken, diğer taraftan M-E tasarım yönteminin ülkemize uyarlanması için gerekli ilk basamağı oluşturan yerel kalibrasyonun yapılması adına bir başlangıç teşkil etmektedir.

Semboller

AASHTO	Amerikan Devlet Karayolu ve Taşımacılık İdareleri Birliği
AASHTO 93	Amerikan Devlet Karayolu ve Taşımacılık İdareleri Birliği 1993 Üstyapı Tasarım Rehberi
ABD	Amerika Birleşik Devletleri
ACPA	Amerikan Beton Yollar Birliği
C	Beton basınç dayanım sınıfı
CBR	Kaliforniya Taşıma Oranı
C_d	Drenaj katsayısı
D	Beton kaplama kalınlığı
E_c	Beton elastisite modülü
FEBELCEM	Belçika Çimento Birliği
FHWA	ABD Ulusal Karayolları İdaresi
IRI	Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi
J	Yük transfer katsayısı
k	Zemin yatak katsayısı
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
LS	Zemin zayıflama katsayısı
M-E	Mekanik-Ampirik Tasarım
MEPDG	Mekanik Ampirik Üstyapı Tasarım Rehberi
MR	Esneklik modülünü
NCHRP	Amerika Birleşik Devletleri Ulusal Karayolları Araştırma Programı
p_i	İlk servis kabiliyeti
p_t	Son servis kabiliyeti
S_0	Normal sapma
S_c	Beton kopma modülü
SN	Kayma direnci

TÇMB	Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
Z _R	Standart sapma
YOGT	Yıllık ortalama günlük trafik
Ø	Donatı çapı
W ₁₈	Eşdeğer standart trafik dingil yükü
ΔPSI	Servis kabiliyeti farkı

Teşekkür

M-E tasarım yöntemi ile yapılan analizler için kullanılan AASHTOWare 2.0 sonlu elemanlar yazılım programının lisans alma sürecinde maddi katkılarından dolayı TÇMB'ye ve IOWA Üniversitesi Öğretim Üyesi Prof. Dr. Halil Ceylan'a teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Güngör G., Sağlık A., Ünal N., Karayolu Beton Yol Deneme Kesimleri Performans Değerlendirmesi, Hazır Beton Kongresi, İstanbul-Türkiye, 1, 96-111, 2013.
- [2] Yeğinboğa A., Türkiye'nin İlk Beton Karayolları, TÇMB / AR-GE Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2010.
- [3] Hall K., Dawood D., Vanikar S., Tally R., Cackler T., Correa A., vd., Long-life Concrete Pavements in Europe and Canada, FHWA, ABD, 2007.
- [4] Ağar E., Sütaş İ., Öztaş G., Beton Yollar, İstanbul Teknik Üniversitesi Yayınları, İstanbul, Türkiye, 1998.
- [5] NCHRP Project 1-37A Report, Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, FHWA, ABD, 2004.
- [6] Huang Y. H., Pavement Analysis and Design, 2.cilt,Par entice Hall, ABD, 2008.
- [7] Ozturk H. I., Tan E. B., Sengun E., Yaman I. O., Comparison of jointed plain concrete pavement systems designed by mechanistic-empirical (M-E) method for different traffic, subgrade, material and climatic conditions, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 2018.
- [8] Sachs S., Vandenbossche J.M., Snyder M.B., Calibration of national rigid pavement performance models for the pavement mechanistic-empirical design guide, Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, 2524 (6), 59-67, 2015.
- [9] Mu F., Mack J.W., Rodden R.A., Review of national and state-level calibrations of AASHTOWare Pavement ME design for new jointed plain concrete pavement. Int J Pavement Eng, 19 (9), 825-831, 2018.

- [10] Kim S., Ceylan H., Ma D., Gopalakrishnan K., Calibration of pavement ME design and mechanistic-empirical pavement design guide performance prediction models for Iowa pavement systems, *J Transp Eng*, 140 (10), 2014.
- [11] Vandebossche J.M., Mu F., Burnham T.R., Comparison of measured vs. predicted performance of jointed plain concrete pavements using the Mechanistic–Empirical Pavement Design Guideline. *Int J Pavement Eng*, 12 (3), 239-251, 2011.
- [12] Johanneck L., Tompkins D., Clyne T., Khazanovich L., Minnesota Road Research Data for Evaluation and Local Calibration of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide’s Enhanced Integrated Climatic Model, *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 2226 (4), 30-40, 2011.
- [13] Li J., Uhlmeyer J., Mahoney J., Muench S., Updating the Pavement Design Catalog for the Washington State Department of Transportation: Using 1993 AASHTO Guide, Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, and Historical Performance, *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 2154 (12), 124-129, 2010.
- [14] Bustos M., Cordo O., Girardi P., Pereyra M., Calibration of Distress Models from the Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide for Rigid Pavement Design in Argentina, *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 2226 (1), 3-12, 2011.
- [15] Sadek H.A., Masad E.A., Sirin O., Al-Khalid H., Sadeq M.A., Little D., Implementation of mechanistic-empirical pavement analysis in the State of Qatar, *Int J Pavement Eng*, 15 (6), 495-511, 2014.
- [16] Romero M.J.M.E., Garro N.M.T., Zevallos G.G., Implementation of the mechanistic–empirical pavement design in northern Peru using a calibration coefficient for the International Roughness Index, *Constr Build Mater*, 102 (1), 270-280, 2016.
- [17] El-Shaib M.A., El-Badawy S.M., Shawaly E.-S.A., Comparison of AASHTO 1993 and MEPDG considering the Egyptian climatic conditions, *Innovative Infrastructure Solutions*, 2 (18), 2017.
- [18] Ameri M., Khavandi A., Development of mechanistic-empirical flexible pavement design in Iran, *J Appl Sci*, 9 (2), 354-359, 2009.
- [19] Ghosh A., Padmarekha A., Krishnan J.M., Implementation and proof-checking of mechanistic-empirical pavement design for Indian highways using AASHTOWARE pavement ME design software, *Procedia-Social Behav Sci*, 104 (2), 119-128, 2013.
- [20] Ma H., Wang D., Zhou C., Feng D., Calibration on MEPDG low temperature cracking model and recommendation on asphalt pavement structures in seasonal frozen region of China, *Adv Mater Sci Eng*, 2015.
- [21] Delgadillo R., Wahr C., Alarcón J., Toward implementation of the mechanistic-empirical pavement design guide in Latin America: Preliminary work in Chile, *Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board*, 2226 (16), 142-148, 2011.

- [22] Chehab G.R., Chehade R.H., Houssami L., Mrad R., Implementation Initiatives of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide in Countries with Insufficient Design Input Data–The Case of Lebanon. Int. Congr. Exhib. Sustain. Civ. Infrastructures Innovative Infrastructure Geotechnology, Springer, 2017.
- [23] Khattab A.M., El-Badawy S.M., Elmwafi M., Evaluation of Witczak E* predictive models for the implementation of AASHTOWare-Pavement ME Design in the Kingdom of Saudi Arabia, Constr Build Mater, 64, 360-369, 2014.
- [24] Seo Y., Distress Evolution in Highway Flexible Pavements: A 5-Year Study at the Korea Highway Corporation Test Road, Journal of Test Evaluation, 38, 32-41, 2009.
- [25] Ciro C., Local Calibration and Implementation of the Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide for Flexible Pavement Design, J Transp Eng, 138 (3), 348-360, 2012.
- [26] Rens L., Road Structures in Belgium and Specifications for Hydraulically Bound Mixtures for Base Layers, Brussels, Belgium, 2016.
- [27] Kırbaş U., Karaşahin M., Şehiriçi Yollarda Üstyapıların Mevcut Performansını Belirlemek İçin Bir Yöntem, Teknik Dergi, 29, 8459–8467, 2018.
- [28] Múčka P., International Roughness Index Specifications Around the World, Road Materials Pavement Design, 18, 929–965, 2017.
- [29] Kırbaş U., Konforlu Sürüş için Uluslararası Düzgünsüzlük İndeksi Sınır Değerlerinin Belirlenmesi, Journal of Engineering Science, 6 (2), 301–309, 2018.
- [30] ASTM E 950/E950M, Standard Test Method for Measuring the Longitudinal Profile of Traveled Surfaces with an Accelerometer-Established Inertial Profiling Reference, ASTM International, West Conshohocken, 2018.
- [31] Merritt D. K., Chang G. K., Rutledge J. L., Best Practices for Achieving and Measuring Pavement Smoothness, A Synthesis of State-Of-Practice, FHWA/LA. 14/550, Louisiana Transportation Research Center, 2015.
- [32] ACPA, Guide Specification- Smoothness Pavement Smoothness Requirements, American Concrete Pavement Association, 2013.
- [33] KGM, Beton Yollar Teknik Şartnamesi, Karayolları Genel Müdürlüğü ARGE Daire Başkanlığı, Ankara, Türkiye, 2016.
- [34] ASTM E 274/E274M, Standard Test Method for Skid Resistance of Paved Surfaces Using a Full-Scale Tire, ASTM International, West Conshohocken, 2015.
- [35] Hergüner A. T., Açar E., Türkiye Otoyol Ağı için Üstyapı Performans Tahmin Modellerinin Geliştirilmesi, İTÜ Dergisi, 9, 2011.
- [36] Hergüner A. T., Türkiye Otoyol Ağı İçin Üstyapı Yönetim Sistemi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2009.
- [37] TS EN 13036-1, Karayolunun ve Havaalanı Pistinin Yüzey Karakteristikleri - Deney Yöntemleri - Bölüm 1: Kaplama Yüzeyi Makro Doku Derinliğinin Hacimsel Alan Tekniği Kullanılarak Ölçülmesi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, 2015.

- [38] Kaçmaz B., Topal A., Şengöz B., Tanyel S., Farklı Tip Esnek Kaplamaların Yol Yüzey Özelliklerinin Arazi Ölçümleriyle Değerlendirilmesi, *Teknik Dergi*, 26, 7115–7137, 2015.
- [39] ACPA (American Concrete Pavement Association), *Agency Practices Explorer*. <http://1734298.sites.myregisteredsite.com/legacyapps/APD.aspx>. Erişim tarihi Temmuz 27, 2018.
- [40] Karayolları Genel Müdürlüğü, *Trafik Hacim Haritaları*. <http://www.kgm.gov.tr/Sayfalar/KGM/SiteTr/Trafik/TrafikHacimHaritasi.aspx>. Erişim tarihi Ağustos 7, 2018.
- [41] FHWA-HRT-13-091, *Verification, Refinement, and Applicability of Long-Term Pavement Performance Vehicle Classification Rules*, Georgetown Pike McLean, VA, ABD, 2014.
- [42] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide: A Manual of Practice*, A.B.D., 2008.
- [43] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), *Guide for Design of Pavement Structures*, vol. 1, 1993.
- [44] Elshaeb M.A., El-Badawy S.M., Shawaly E-S.A., *Development and Impact of the Egyptian Climatic Conditions on Flexible Pavement Performance*, *American Journal of Civil Engineering and Architecture*, 2 (3), 115-121, 2014.
- [45] KGM, *Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi*, Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye, 2008.
- [46] Haas R., Hudson W. R., Zaniewski J. P., *Modern Pavement Management*, Krieger Publishing Company Malabar, FL, 1994.
- [47] Shahin M. Y., *Pavement Management for Airports, Roads, and Parking Lots*, Springer New York, 2005.
- [48] Kırbaş U., Karaşahin M., *Performance Models for Hot Mix Asphalt Pavements in Urban Roads*, *Construction Building Materials*, 116, 281–288, 2016.

TEKNIK NOT

Mimari Restorasyon ve Konservasyon Projelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Uygulamaları

Mert UZUN¹

Deniz ÖZTÜRK²

Gürkan Emre GÜRCANLI³

ÖZ

Tarihi eser ve dokuların özgün biçimleriyle korunarak, gelecek kuşaklara aktarılması restorasyon projelerinin nihai hedefidir. Restorasyon işlerinin kendine özgü yapısı, özel bir uzmanlık gerektirmekte ve bu projelere özgü riskler özgün işçi sağlığı ve iş güvenliği(İSİG) önlemlerini zorunlu kılmaktadır. Türkiye’de mevzuata göre mimari restorasyon faaliyetleri inşaat sektörünün bir parçası olarak ele alınsa da, restorasyon alanına özgü İSİG önlemlerine dair çalışmalar yetersizdir. Bu çalışmada, mimari restorasyon faaliyetleri sırasında karşılaşılması olası riskler incelenmiş ve riskler mevzuat zorunlulukları ve saha gözlemlerine dayalı veriler ışığında fiziksel, kimyasal, biyolojik ve ergonomik tehlikeler bakımından sınıflandırılmıştır. Bu risklere ilişkin tartışmaların ardından, sağlıklı ve güvenli bir mimari restorasyon çalışması için risk değerlendirme rehberi ve akış şeması oluşturulmuştur.

Anahtar Kelimeler: İnşaat sektörü, mimari restorasyon, işçi sağlığı ve iş güvenliği, risk analizi.

ABSTRACT

Occupational Health and Safety Practices in Architectural Restoration and Conservation Projects

Preservation of historic buildings with their original state and conveyance that heritage to the next generations is the ultimate aim of the restoration projects. Restoration works requires special professional skills and the particular risks of these projects oblige peculiar occupational health and safety measures. Although, in Turkey, the architectural restoration works are regarded as a part of construction industry according to the legislation, research

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu’na 10 Temmuz 2019 günü ulaşmıştır. 16 Eylül 2019 günü yayımlanmak üzere kabul edilmiştir.

- 30 Kasım 2020 gününe kadar tartışmaya açıktır.

• <https://dx.doi.org/10.18400/tekderg.590368>

1 Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul - mertuzunn@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-1494-2547>

2 İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Restorasyon Programı, İstanbul - deniz1612@gmail.com - <https://orcid.org/0000-0002-8209-8157>

3 İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - gurcanlig@itu.edu.tr - <https://orcid.org/0000-0002-0807-2020>

upon peculiar occupational health and safety measures are not sufficient. In this study, possible risks during architectural restoration projects were examined and those risks were classified as physical, chemical, biological and ergonomical risks according to legislative obligations as well as the data obtained from site observations. After the discussions upon these risks, a risk assessment guide and flowchart were established for healthy and safe restoration work.

Keywords: Construction industry, architectural restoration, occupational health and safety, risk analysis.

1. GİRİŞ

Koruma düşüncesi, tarihte çok gerilere götürülebilmektedir. 18. yy'da bazı yasal düzenlemelerle korumanın ilk adımları atılmaya başlanmasıyla birlikte, onarımların bilimsel yöntemle yapılan bir uğraş olarak ortaya konması 19.yy'da başlamıştır. Günümüze çok eski tarihlerden ulaşan, anıtsal ya da anıtsallıktan uzak, ait olduğu dönemin gündelik yaşamına dair fikir veren ve bugüne değer aktaran, teknolojik gelişmelerin aşamalarını günümüze taşıyan, bilgi aktaran, teknoloji tarihi açısından önem taşıyan yapılar korunmaya değer bulunmaktadır [1]. Bu geniş yelpazeden de anlaşılacağı gibi, neyin korunacağı sorusu, koruma düşüncesi için temel sorulardan birisidir. 1976 yılında UNESCO tarafından kültürel geleneklerle ilgili maddi varlıkları da kapsamak üzere "kültürel varlık" tanımı ortaya konmuştur [2]. Ülkemizdeki koruma mevzuatı; değişik uygarlıkların sanat anlayışı, bilim ve teknik düzeyi, sosyal yaşamı hakkında somut veriler sağlayan ve korunmalarında kamu yararı görülen eşya ve yapıtları kapsamaktadır [3]. Burden, koruma düşüncesini "bir yapının bozulmasını, yıkılmasını, kötüye kullanımını veya bakımsızlığını önlemek üzere yapılan bakım ve müdahaleler" şeklinde tanımlamaktadır [4]. Bu tanımda "bakım" özellikle öne çıkarılmaktadır. Zakar, korumanın; "bir anıtı çevresiyle birlikte belgeleyerek, sürekli bakımını ve kullanımını sağlayarak, özgün durumunu muhafaza ederek, gerektiğinde en az müdahale ile onarma ve iyileştirme yollarına giderek varlığını sürdürme anlayışı" olduğunu söylemektedir [5]. Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu'nda koruma; taşınmaz ve tabiat varlıklarında muhafaza, bakım, onarım, restorasyon, fonksiyon değiştirme işlemleri olarak açıklanmaktadır [3]. Bu işlemlere tümleme, yenileme, yeniden yapım, taşıma, temizleme işlemleri de eklenebilir.

Restorasyon, koruma eyleminin en temel ve geniş kapsamlı bileşenlerinden birisidir. Hasar görmüş, özgünlüğünü yitirmiş, geleceğe sağlıklı ulaşamayacak yapı veya yapı grubunun elde edilen en güvenilir belge ve bilgi doğrultusunda, bilimsel teknik ve yöntemler eşliğinde, en az müdahale ile onarma ve yaşatma pratiğidir. Restorasyon faaliyetlerinin bahsedilen alt başlıklarının her biri özel uzmanlık gerektiren ve çoğu zaman disiplinlerarası çalışmayı zorunlu kılan faaliyetlerdir. Restorasyon çalışmalarına katılacak disiplinlerden biri de İSİG olmalıdır. Restorasyon uygulamaları, bu alana özgün durumlarda çalışan uzman, tekniker ve işçiler bakımından birçok tehlike ve riski barındırmaktadır.

Restorasyon çalışmaları, ulusal mevzuatta yapı iş kolunun bir alt bileşeni olarak tarif edilmektedir [6]. Buna göre ülkemizde yapı iş kolunu ilgilendiren İSİG mevzuatı restorasyon projeleri için de geçerlidir. Yapı iş kolu, içerisinde birçok özel uzmanlık gerektiren ve alt başlığı bulunan geniş bir üretim yapısına sahiptir. Yapı iş kolunun bu özgün durumu, İSİG bakımından da her bir alt başlığın kendi özgün tehlike ve risklerine odaklanılmasını zorunlu

kılmaktadır. Restorasyon faaliyetleri, geleneksel inşaat faaliyetlerinin tamamını bünyesinde barındırmakla birlikte, birçok inşaat projesinde karşılaşılmaması mümkün olmayan riskleri de aynı anda taşımaktadır. Çizelge 1’de geleneksel yapım faaliyetleri esnasında gerçekleşen iş kazalarının analizi gösterilmektedir. Çizelgedeki dikkat çekici husus, her farklı proje tipi için farklı kaza tiplerinin öne çıkmasıdır. Bu çizelgede yalnızca ölümle sonuçlanan kazalara yer verilmiş olup, yaralanmayla sonuçlanan kazaların büyük bir kısmının kayıt altına alınmamasından dolayı yaralanma verileri işlenmemiştir. Bu kaza tiplerinin birçoğu restorasyon faaliyetlerinde de geçerlidir; ancak çizelgede restorasyon faaliyetleri maalesef yer almamaktadır. Zira restorasyon uygulamalarındaki kazaların büyük bir kısmı çizelgedeki “Bina Projeleri” veya “Diğer” sütunu içinde yer almakta olup, verilerin kayıt altına alınmamasındaki eksikliklerden dolayı net bir yorum yapılamamaktadır. Öte yandan, kendine has özelliklerle taşımakla birlikte, restorasyon uygulamalarını incelerken “Bina” ve “Diğer” tip şantiyelere odaklanmak bir başlangıç noktası olacaktır.

Çizelge 1 - İnşaat sektöründeki iş kazalarının şantiyelere göre dağılımı [7]

Kaza Tipi / Şantiye Tipi	Bina	Yol	Demiryolu	Kanal	Köprü Viyadük	Tünel	Liman Mendirek	Baraj	Yıkım	Enerji Nakil	Diğer	Toplam
İnsan Düşmesi	880	8	1	19	15	0	2	13	8	22	60	1028
Malzeme Düşmesi	150	15	4	11	3	15	3	22	4	6	18	251
Malzeme Sıçraması	2	1	0	1	1	0	1	0	0	2	2	10
Kazı Kenarı Göçmesi	60	4	0	68	1	1	3	0	1	0		138
Yapı Kısımının Çökmesi	105	1	0	2	4	0	0	1	41	0	13	167
Elektrik Çarpması	255	1	0	5	0	0	4	6	1	9	12	293
Patlayıcı Madde Kaza.	4	24	0	8	0	5	0	3	0	1	5	50
Y. Makinası Kazaları	33	90	0	13	4	2	6	19	1	7	31	206
Uzuv Kaptır./Sıkış.	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	2
Şantiye İçi Trafik Kazası	22	74	21	13	2	1	3	14	1	5	12	168
Diğer Tip	23	9	0	7	6	0	2	7	0	6	25	85
Toplam	1535	227	26	147	36	24	24	85	58	58	178	2398

İnşaat faaliyetlerinin ve inşaatlarda gerçekleşen kazaların kayıt altına alınması için, her faaliyetin ilgili NACE (Nomenclature Générale des Activités Économiques dans les Communautés Européennes) kodlarına göre sınıflandırılması son derece önemlidir. İnşaat faaliyetleri 41 kodu ile başlayıp 43.99.15 NACE kodu ile biten ekonomik faaliyetleri kapsamaktadır. Restorasyon faaliyetleri “Mevcut ikamet amaçlı olan veya ikamet amaçlı

olmayan binaların yeniden düzenlenmesi veya yenilenmesi (büyük çaplı revizyon)” (NACE Kodu 41.20.05) kapsamında değerlendirilebilir. Öte yandan “Özel İnşaat Faaliyetleri” (NACE kodu 43) ve onun alt başlığı olan “Başka Yerde Sınıflandırılmamış İnşaat Faaliyetleri” (NACE Kodu 43.99) sınıflandırmasına girip girmeyeceği tartışmalıdır. Zira bu ekonomik faaliyetin de alt sınıfları arasında yer alan “İnşaat iskelesi ve çalışma platformunu kurma ve sökme işleri” (43.99.07), “Yapıların dış cepheleri için buharlı temizleme, kum püskürtme ve benzeri uzmanlaşmış inşaat faaliyetleri” (43.99.12) hemen hemen her türden restorasyon projesinde karşılaşılan faaliyetlerdir. Kendine özgü iş kalemleriyle geleneksel inşaat faaliyetlerinden farklılaşan ve kimi zaman sıradan bina inşaatları sınıflandırmasında değerlendirilen restorasyon faaliyetlerinin içerdiği farklı riskler ve bunları azaltma/yok etme yöntemleri bu çalışmanın kapsamını oluşturmaktadır. Bu makalede başlık olarak “mimari restorasyon” ifadesi kullanılmıştır. Zira bu çalışma, laboratuvarı ya da arkeolojik alanlarda yapılan restorasyon ve konservasyon uygulamalarındaki iş güvenliği ve işçi sağlığı uygulamalarını içermemektedir. Öte yandan, metni daha kolay okunur kılması bakımından, mimari restorasyon ve konservasyon çalışmalarını ifade etmek için metin içinde sadece “restorasyon” terimi kullanılmıştır.

2. RESTORASYON PROJELERİNE ÖZGÜ RİSK ETMENLERİ

Genel olarak restorasyon işlerinde belli bir rutin oluşturmak son derece zor olup, her proje kendi özgünlüğü içerisinde ele alınmak zorundadır. Restorasyon işleri, yeni bir yapıyı inşa etmekten farklıdır ve en genel anlamıyla hali hazırda tümü ya da bir kısmı var olan bir tarihi yapıya, tüm hasar ve eldeki imkanlar değerlendirilerek koruma ve onarım anlamında en uygun müdahaleleri etmek demektir. Öte yandan müdahale edilen yapının eski olması, restorasyon işlerini Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği’nde belirtilen “yenileme”, “tadilat”, “tamir” ve “montaj” işlerinden de ayırmaktadır. Dolayısıyla var olan yönetmeliklere uygun olmayan, modern yapım tekniklerinden farklı tekniklerin kullanıldığı, belirsizliklerin çok olduğu bu projelerde iş programı yapmak son derece güç olup, her tarihi yapıda konvansiyonel projelere göre göz önünde bulundurulması gereken çok daha fazla parametre bulunmaktadır. Genel olarak inşaatlarda alınacak önlemlerin yanı sıra, yapının inşa edildiği malzemenin çeşitliliği, ülkemizde çoğunlukla yığma olarak yapılan binaların malzemelerinin mekanik özelliklerinin tespitindeki zorluk ve belirsizlikler, bilgisayar ortamında kurgulanan yapısal modelleri her zaman sorgulanır kılmakta, yapının sorunlarının kesin biçimde bilinemezliği riskleri çeşitlendirmektedir [8].

Öte yandan restorasyon projelerinde “şantiye” tanımı ve sınırları oldukça belirsiz ve değişkendir. Genellikle trafiğin ve halkın yoğun olduğu, turizm faaliyetlerinin kümelendiği, dar sokak kurgusuna sahip tarihi kent dokusunun içindeki bölgelerde restorasyon uygulamalarının daha ağırlıklı gerçekleştiği söylenebilir. Bu etkenlere aşağıda ayrıntılı bir şekilde belirtilecek toz (ne tozu olduğunu saptamak bile zordur), kendi döneminde kullanılan ve değerli olan, ama günümüzde zararlı olduğu bilinen (Scheele Yeşili gibi) kimyasal boya ve malzemelerin varlığı, restorasyondaki yapıyı koruma ilkesi gereği yapı şartlarına uygun çalışma zorunluluğundan kaynaklı ergonomik risk etmenleri, yapıların içinde bulunan hayvan ölüleri (yarasa, fare gibi) ve ahşabı tahrip eden mantar ile böcek faaliyeti sonucu ortaya çıkan biyolojik riskler eklendiğinde, restorasyon uygulamalarındaki çalışma ortamının oldukça farklı olduğu görülmektedir. Restorasyon projeleri, yapı iş kolundaki birçok ana disiplini içerisinde barındırmasından kaynaklı olarak bu disiplinlerin kendine özgü tehlike ve

risklerini de içermektedir. Yapı iş kolunda sıklıkla karşılaşılan iş kazalarındaki ana risk unsuru restorasyon faaliyetlerinde de geçerli olmakla birlikte restorasyon faaliyetlerinde riskin biçimi ve önem derecesi farklılık gösterebilmektedir. Restorasyon faaliyetleri iş kazalarının haricinde özellikle meslek hastalıklarına yakalanma riski bakımından da inşaat sektörünün diğer disiplinlerine göre oldukça fazla faktörü bünyesinde barındırmaktadır. Aşağıda temel risk etmenleri verilmektedir.

Yapıdaki hasar nedeniyle karşılaşılan riskler: Restorasyon projeleri çoğunlukla koruma altındaki yapıda herhangi bir hasar varsa, bu hasarın nedeninin belirlenip yapıya müdahale yöntemini belirlemeyi gerektirir. Yapılardaki hasarlar çoğu zaman zemin özellikleri, yanlış malzeme kullanımı, kötü işçilik, tasarım hatası, malzemenin doğal süreçler ile bozulması, afetler, savaşlar, yangınlar gibi sebeplerle ortaya çıkabilir. Yapıdaki hasarın risk olarak ortaya çıkması yapının henüz belgeleme aşamasında dahi ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle hasarın tespiti ve hasara nasıl müdahale edileceği, belgeleme çalışması ile birlikte düşünülmelidir. Buradan hareketle yapıdaki hasarlara ilişkin gerekli önlemler alınmadan, belgeleme çalışması yapma amacıyla yapıda çalışmaya başlamanın bile başlı başına önemli bir risk olduğunu söylemek mümkündür. Bu nedenle, yapıdaki döşemelerin sağlamlığı, elektrik tesisatının güvenliği gibi fiziksel risk etmenlerine ek olarak yapı içerisinde zaman içerisinde oluşan bazı bitkiler (ısırgan otu ya da dikenli bitkiler gibi), kemirici hayvanlar, böcekler (akrep, pire gibi) gibi biyolojik risk etmenleri de tespit edilmelidir. Buradan hareketle restorasyonda İSİG yapı ya da yapı grubunun belgelenmesi aşamasından itibaren düşünülmesi gerektiğinin altı çizilmelidir. Restorasyonun uygulama aşamasında ise yapının statik kontrolü iş takviminde en öne konulması gereken başlıktır. Zira koruma altındaki binalarda taşıyıcı yapı elemanlarındaki yorulmalar ve hasarlar, yapının restorasyon faaliyetine alınmasının çoğu durumda gerekçesi durumundadır. Bu durum, yapının statik sorunlarının, aynı zamanda güçlendirme çalışmaları esnasında çalışanlar bakımından da ek riskler oluşmasına neden olmaktadır. Yapının çoğu zaman güçlendirme çalışmalarının sürdürüğü esnada diğer ince işçilikler de devam etmektedir. Bu durum ise birbirinden farklı risklere sahip aktivitelerin benzer alanlarda kesişmesine ve öngörülen risklerin farklılaşmasına neden olmaktadır.

Yüksekten düşme: Koruma altındaki yapıların büyük bir kısmı “bina” tipi yapılar olup, en fazla karşılaşılan iş kalemleri genellikle yüksekte çalışmaları içermektedir. Keza tarihi su kemerleri, surlar, köprüler, çeşitli anıtsal yapılarda da yüksekte çalışma önde gelen “tehlike” kaynağıdır. Yüksekte çalışmanın yarattığı yüksekten düşme riski, tıpkı diğer inşaat aktivitelerinde olduğu gibi restorasyon faaliyetlerinde de en önemli risktir. Restorasyon faaliyetlerinde bu riski arttıran unsur, yüksekte çalışma koşullarını zorlaştıran durumların varlığıdır. Yüksekte çalışma için kullanılacak erişim ekipmanlarının koruma altındaki yapıda güvenli bir şekilde konumlandırılması önemli bir sorundur. Örneğin yeni bir yapı inşasında iskele, yapının uygulanması sırasında süreç ile birlikte düşünülmekte ve tasarlanmaktadır. Restorasyon uygulamasında ise var olan ve hem güvenliğinden emin olunamayan hem de tarihi bir belge olarak korunması gereken yapı duvarları; iskelenin sabitlenmesine, buralara geçici ankraj ekipmanlarının yerleştirilmesine engel oluşturmaktadır. Benzer şekilde yatay ve düşey yaşam hatlarının yapı üzerine montajı da ek sorunlar yaratmaktadır. Restorasyon uygulamalarında yüksekte çalışma için alınacak önlemler ve çözümler her yapıya özgü olmak zorundadır. Çalışılan yapının bir kültür varlığı olduğu asla unutulmadan planlama yapılmalıdır. Restorasyon ve konservasyon çalışmaları yapılacak yapıların cephe tasarımları, inşa edildikleri dönemin mimari yaklaşımlarının izlerini üzerinde barındırmaktadır. Yeni

dönemde daha fazla üzerinde durulan “tasarım yoluyla iş güvenliği” yaklaşımından uzak olan bu yapıların cephelerinde (temizlik, plastik onarım vb.), çatılarında (kurşun yenileme vb.) yapılacak bazı işler için genellikle iskele kurulmakta ve yüksekte çalışma yapılmaktadır. İskele ile güvenli çalışma için belirlenmiş normlara göre iskelenin yapı ile arasındaki mesafesinin 30 cm olması tavsiye edilmektedir [9]. Ancak çoğu zaman standart tip iskeleler ile çalışmanın yapılacağı ve genellikle standart iskelelerin restorasyona konu olan yapıların cephelerinde gerekli esnekliği sağlayamamaları sebebiyle, tavsiye edilen mesafeyi yakalamak mümkün olmamaktadır. Bu durum, boşluksuz ve düşme tehlikesi barındırmaması gereken iskele çalışma alanında düşme riskini arttıran boşlukların oluşmasına neden olmaktadır. Bu nedenle özellikle iskele konusunda özel çözümleri düşünmek gereklidir. Benzer şekilde, iskelelerin yapı yüzeyinden ankre edilmesi (iskelenin yapı yüzeyine ankrajı) çoğu projede mümkün olamamaktadır. Bu durumda da her işe özel statik çözümler ile iskele kurulumunun gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Ayrıca birçok projede uygulandığı üzere ahşap malzemelerden üretilen iskeleler, çelik alaşımlı iskele malzemelerinin zati yüklerinin fazla olması ve bu iskelelerin yapı geometrisine uygun monte edilememesi vb. nedenlerle tercih edilmektedir. Ne var ki uygulamalarda ahşap iskeleler ile ilgili EN 338 gereklilikleri karşılayan ahşap malzemeler ve yine EN 12811 iskele performans kriterlerini sağlayan kurulumlarının yaygın olmadığı belirtilmelidir.

Malzeme düşmesi: Eski eserdeki statik sorunlar yalnızca yüksekten düşme tipindeki kazaların oluşmasına değil aynı zamanda eserde bulunan bazı öğelerin (örneğin avize, tablo, duvar panosu vb.) bağlantı noktalarındaki zayıflamalar sonucu düşmesi ya da duvar vb. yapı elemanlarının devrilmesi ile çalışanların malzeme düşmesi sonucu kazaya maruz kalmasına neden olmaktadır. Ayrıca restorasyon çalışmaları esnasındaki artık malzemelerin binadan uzaklaştırılması esnasında ve malzemelerin çalışma alanlarına ulaştırılması esnasında ek riskler mevcuttur. Projenin gerçekleştirileceği alanda yapılacak kaldırma operasyonlarının planlanması bu bakımdan büyük önem taşımaktadır. Özellikle yapı meskun mahalde yer alıyorsa yapı çevresinde malzeme düşme riskine karşı özel önlemler (sınırlandırmalar, trafik ve yaya güvenliği) alınmalıdır.

Toz: Toza maruziyet, restorasyon uygulamalarında farklı yer ve yoğunlukta gerçekleşmektedir. Tozla Mücadele Yönetmeliği’nde belirtildiği üzere tozlu işlerde risk değerlendirmesi için toz ölçümleri yapılmalı ve sonuçları değerlendirilerek önlemleri alınmalıdır [10]. Uygulamalarda en yaygın kullanılan yapı malzemelerinden birisi doğal taştır. Geleneksel yapı malzemesi olması sebebiyle koruma çalışmalarında da benzer özellikteki malzeme kullanımı tercih edilmektedir. Kullanılan doğal taşlardan bazıları; Küfeki gibi kireç taşları, çeşitli mermer türleri ve bazalt gibi volkanik taşlardır. Taşların işlenmesi sırasında oluşacak taş tozu hem o taşı işleyen işçi, hem sahada çalışanlar, hem de önlem alınmadığı takdirde saha çevresindeki halk sağlığı açısından risk taşımaktadır. Bir diğer risk oluşturan restorasyon uygulaması ise özellikle cephe temizliğinde kullanılan kontrollü kumlama. Mikro kumlama olarak da anılan bu yöntem; özel aletlerle, basınçlı hava veya azot kullanılarak, yüzeydeki kir üzerine doğrudan metal esaslı, mikro cam küre, mineral esaslı (kum gibi), çeşitli organik (findık kabuğu gibi) aşındırıcı malzemenin püskürtülmesi ile gerçekleştirilir. Dünyadaki en yaygın mineral olan ve kum, kumtaşı, granitte bulunan silika; özellikle kumlama işleminde kullanılmaktadır. Bu uygulama sırasında da önlem alınmadığı durumda basınçla püskürtülen organik veya inorganik malzeme soluma yoluyla risk oluşturmaktadır. Bu tozların bulunduğu birçok solunum yolu rahatsızlığına ve kansere neden olduğu bilinmektedir. Bunun için asbest” ve “eriyonit”

gibi akciğer kanserine neden olan güçlü hastalık yapıcı tozların kullanılan malzemelerde olup olmadığına incelenmelidir. [11].

Özellikle Nevşehir taşının kullanımı ve pek çok taş işçiliği, toza maruziyet nedeniyle oluşabilecek hastalıkları tetiklemektedir. Bu hastalıkların genel adı pnömokonyozlar olup, kabul edilen son tanımlaması “akciğerlerde inorganik tozların birikmesi ve buna karşı gelişen doku reaksiyonudur” şeklindedir. [12]

Taş, kumlama gibi toza maruziyet oluşturabilecek alanlarda çalışanların koruyucu önlemleri alması, periyodik akciğer taramasından geçmeleri gerekmektedir. Ne yazık ki ülkemizde pek çok sektörde olduğu gibi, restorasyon çalışmalarında da meslek hastalıklarının kayıt altına alınması ve tanı konması neredeyse hiç gerçekleşmemektedir. Restorasyonun ele aldığı konusu gereği tarihi yapı ya da yerleşkede farklı dönemlerin teknolojileriyle üretilen, günümüzde özellikle sağlık sebebiyle kullanılmayan ya da tanınmayan malzemeler bulunabilir. Yine bu malzemeler de toza maruziyete önlem kapsamında uygulama öncesi malzeme analizi ile tespit edilmeli ve önlemi alınmalıdır.

Asbest: Restorasyon projelerinde karşılaşılabilecek önemli risklerin başında asbest maruziyeti gelmektedir. Asbestin üretimi, kullanımı ve asbest içeren eşyaların piyasaya sunulmasını “Bazı Tehlikeli Maddelerin, Müstahzarların ve Eşyaların Üretimine, Piyasaya Arzına ve Kullanımına İlişkin Kısıtlamalar Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik” ile yasaklanmıştır [13]. Ancak eski yapılarda asbest varlığını sürdürmektedir ve asbestli alanlarda yapılacak yenileme çalışmaları esnasında asbest liflerinin solunması ciddi sağlık sorunlarına yol açmaktadır. Asbest 20 yy. ilk çeyreğinden sonra Dünya Sağlık Örgütü ve Uluslararası Kanser Araştırma Merkezi tarafından “Kanserojen Maddeler” listesinde Grup 1A kanserojen madde olarak belirlenmiştir. “Mezotelyoma” veya “akciğer kanseri” can kaybına yol açarak, asbestin sebep olduğu en tehlikeli hastalık olarak bilinmektedir [14]. Kentsel dönüşüm sürecinde yıkılan binalarda olduğu gibi, restorasyon projelerinde de asbest ciddi sağlık risklerine yol açmakta olup, bu projelerde “Asbestle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Yönetmeliği” hükümlerine uygun çalışma yapılmalıdır [15]. Restorasyon projelerinde asbestli alanların kırılması/kazınması/yıkılması asbest liflerinin ortaya çıkmasına yol açtığından, bu projelere özgün bir risk faktörü olarak göz önünde bulundurulmalıdır.

Kurşun ve Kalay: Her iki madde de ağır metaller arasında yer almakta olup, her ikisi de biyobirikme eğilimli maddelerdir. Biyobirikim zamanla biyolojik bir organizmada bir kimyasal konsantrasyonun, kimyasalın doğadaki konsantrasyonu ile karşılaştırıldığında artması demektir. Eski eserlerde sıklıkla kullanılan bir malzeme olan kurşun; kenet vb. metal bağlantılarda eritilerek, kaplama olarak kullanımında serilerek, dövülerek uygulanmaktadır. Restorasyon işlerinde çalışan işçiler, uzun yıllar boyunca özellikle kurşun ve kalay gibi ağır metallerle maruziyet nedeniyle kurşun zehirlenmelerine ve uzun vadede ciddi hastalıklara yakalanma riski taşımaktadır [16]. Bu maddelere maruziyet yalnızca projelerde çalışan işçiler bakımından değil halk sağlığı bakımından da önemlidir. Zira 2019 yılında Paris’te bulunan Notre Dame Katedrali’nde çıkan yangın sonrasında, katedralin çatısında bulunan 300 tona yakın kurşun malzeme tamamen erimiş ve kurşun partikülleri havaya karışmıştır. Yangından iki ay sonra Paris merkezinde bir çocuğun kanında normal sınırların üzerinde kurşun tespit edilmesi üzerine ise halk sağlığı için özel önlemler alınması tavsiye edilmiştir [17].

Kimyasal maddeler: Restorasyon uygulamalarında kimyasal madde maruziyeti iki boyutlu olabilir: İlki yapıdan kaynaklı kimyasallara maruziyet, ikincisi ise uygulama sırasında kullanılan kimyasal malzemelere maruziyettir. Yapıdan kaynaklı kimyasallar; harcın, boyanın, malzeme üzerindeki bir konservasyon malzemesinin içeriğinde olabilir. Bu riski tespit etmek amacıyla işin başında malzeme analizi yapılması büyük önem arz etmektedir. Eski yapıdaki boyanın sökümü işi, uygulama sırasında işçi sağlığı açısından önlem alınması gereken iş kalemlerinden birisidir. Özellikle ahşap mimari elemanların üzerindeki yağlı boyaların sökümünde kullanılan tekniğe göre farklı kimyasallara maruziyet söz konusudur. Boya sökümü amacıyla raspa yapılıyorsa toza maruziyet, boya sökücüler kullanılıyorsa deriyle temasında ve sıcak hava tabancası ile uygulama yapılıyorsa soluma yoluyla kimyasala maruziyet gerçekleşebilir. Bunun haricinde restorasyon çalışmaları sırasında en fazla kimyasal malzeme kullanılan temizlik çalışmalarındadır. Standart bir inşaat faaliyetinden farklı olarak restorasyon faaliyetlerinde birbirinden farklı nitelikte ve riskte özel kimyasal temizleyiciler, yapıştırıcılar kullanılmaktadır. Taş temizliği çalışmalarında kullanılan kir absorblayıcı jeller (AB57 vb.), taş onarımında kullanılan epoksiler, metalraspa çalışmalarında (alem temizliği gibi) tercih edilen organik çözücüler bunlara örnek olarak verilebilir. Uygulanırken zararlı buharlar açığa çıkaran bu tür kimyasallara maruziyet bir diğer önemli risktir. Bu nedenle çalışmalarda kullanılacak kimyasal malzemelerin “Malzeme Güvenlik Bilgi Formları” mutlak suretle çalışma öncesinde incelenmeli, yapılacak risk değerlendirmesi neticesinde çalışanlar bilgilendirilerek gerekli önlemler alınmalıdır.

Yangın: Faaliyetler esnasında birçok fiziksel etmene (elektrik, sıcak çalışma vb.) bağlı olarak gelişebileceği gibi, çalışmanın yürütüldüğü eserin yapısı (ahşap olması vb.), projede kullanılan kimyasal malzemeler vb. birçok unsur yangın riskini artırır. Restorasyon projeleri sıcak çalışmalar (kaynak, kesim vb.) aynı zamanda yanıcı malzemelerin bulunduğu alanlarda yapılmak zorunda olması nedeniyle yüksek yangın riski içermektedir. Bu binalardaki ahşap ve benzeri yanıcı malzemelerin -ki ahşap tozları son derece önemlidir- restorasyon işlerinin bir parçası olan yalıtım malzemeleriyle bir arada bulunması, kimi zaman bir el fenerinin veya kaynak makinasından gelecek kıvılcım ve alaz ile tutuşmaya yol açabilir. Yalıtım işlerinde kullanılan pürmüz gibi araçlar ise sıradan inşaata nazaran çok büyük risk unsurdur. Keza sigara içilmesinin kesinlikle önlenmesi önemlidir.

Bozunmuş organik bileşikler ve diğer biyolojik risk etmenleri: Eser bünyesinde bulunabilen hayvan dışkısı, yaşamını yitirmiş hayvanlardan kalan organik çözünmüş maddeler ve mikroorganizmalar çalışanlar için biyolojik riskleri de beraberinde getirmektedir. Özellikle ahşap binalarda döşeme ve kısıtlı alanlarda bu riskler mevcuttur. Ayrıca bazı bitkiler (ısırgan otu ya da dikenli bitkiler gibi), kemirici hayvanlar, böcekler (akrep, pire gibi) gibi biyolojik risk etmenleri tespit edilmeli ve çalışanları bu risklere karşı korumak için gerekli önlemler alınmalıdır.

3. RESTORASYON PROJELERİNDE SAĞLIK VE GÜVENLİK FAALİYETLERİ

Restorasyon projelerinde etkin bir İSİG faaliyeti, bu faaliyetlerin yapı iş kolunda olduğu gibi projenin hazırlık aşamasından uygulama aşamasına uzanan evrelerinin tamamını kapsayacak şekilde kurgulanmalıdır. Faaliyetlere özgü riskler ve yapı iş kolunun diğer riskleri beraberce ele alınarak aşağıda belirtilen başlıklarda çalışmalar yapılmalıdır. Projenin hazırlık aşamasında proje risklerinin nasıl yönetileceğine ilişkin çalışmalar proje hazırlık ekibi

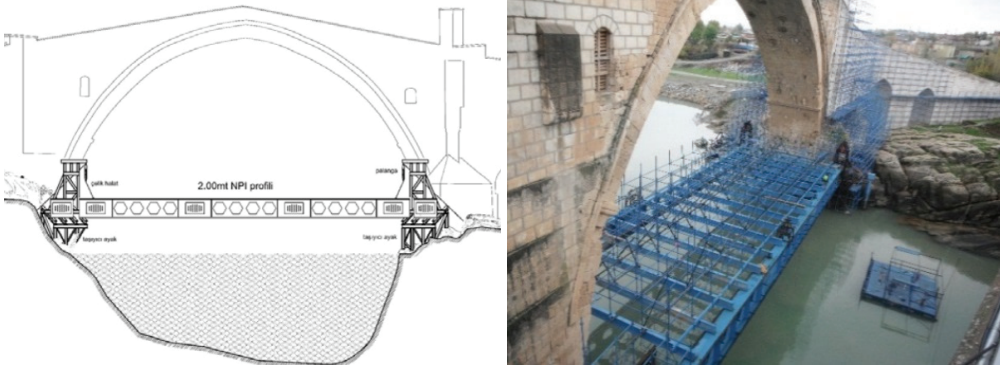
tarafından gerçekleştirilmelidir. Bu kapsamda mevzuatta tanımlı görevlendirmeler (Proje Sorumlusu ve Sağlık ve Güvenlik Koordinatörü) gerçekleştirilmeli ve proje hazırlık faaliyetlerinde İSİG faaliyetleri planlanmalıdır. Projenin gerçekleştirileceği eserde ilk olarak ön risk analizi yapılmalı ve proje başlamadan alınması gereken önlemler belirlenmelidir. Bu başlıkta, projenin meskun mahalde olduğu hallerde kamu güvenliğinin sağlanması için oluşturulacak şantiye alanının sınırlarının belirlenmesi, şantiye giriş çıkış noktalarının tespiti, malzeme düşme riskine karşı alınacak tedbirler vb. önlemler planlanmalıdır. Binalarda taşıyıcı yapı elemanlarıyla birlikte yapısal olmayan malzemelere de yönelik kırılma analizlerinin yapılması gereklidir [18]. Yapılacak ön risk analizinde yapı stabilitesine dair gerekli numuneler alınarak yapıda öncelikle çalışanların güvenliğini sağlamak için güçlendirilmesi gereken alanlar tespit edilmelidir. Şekil 1’de bir güçlendirme örneği görülmektedir.



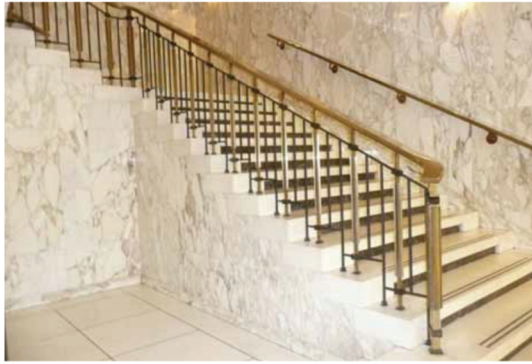
Şekil 1 - Mihrimah Sultan Camii mihrap cephesinde 1999 Kocaeli depremi sonrası kurulan çelik askı sistem ile güçlendirme çalışması [19].

Restorasyonu gerçekleştirilecek eserde asbest kullanılıp kullanılmadığı, asbest varsa kullanım alanların tespiti ve asbest içeren öğelerin sökülmesi için idari ve pratik faaliyetlerin nasıl yürütüleceği planlanmalıdır. Restorasyonu yapılan yapıda yüksekte ya da geniş açıklıkta yapılacak çalışmalar için uygun erişim ekipmanlarının malzeme seçimi, niteliğinin belirlenmesi (ahşap ya da ön yapımlı çelik bileşen), bağlantı noktalarının tespit edilerek iskele projelerinin hazırlanması gerekmektedir. Özelleşmiş iskele projeleri, mutlak suretle deneyimli mimar ve mühendislerce tasarlanmalıdır. Şekil 2’de bir restorasyon projesine özgü kurulmuş çelik konstrüksiyon ve iskele sistemi görülmektedir.

Tarihi yapılarda bulunan korkuluk veya merdiven korkulukları çoğunlukla yürürlükteki mevzuata uygun değildir. Bazen yapının özgün özelliklerini bozmadan bazı güvenlik önlemleri eklenebilir. Sürekli işçilerin inip çıktığı merdivenler, döşeme kenarları, balkonlar buna örnek verilebilir. Şekil 3’te Ottawa’da bulunan Ulusal Arşiv ve Kütüphane binası merdiven parmaklıklarının arasının basit bir uygulamayla sıklaştırıldığı ve yönetmeliğe uygun hale getirilerek düşmelere karşı önlem alındığı görülmektedir [21].



Şekil 2 - Malabadi Köprüsü restorasyonu sırasında kurulan iskele sistemi [20].



Şekil 3 - Tarihi bir yapıdaki merdiven korkuluklarının yürürlükteki mevzuata uygun hale getirilmesi.[21]

Faaliyetler boyunca yürütülecek aktivitelerin her biri için aktivite bazlı risk analizi çalışmaları yapılmalı ve aktivite bazlı güvenlik önlemleri tanımlanarak güvenli yapım yöntemleri oluşturulmalıdır. İş izni gerektiren çalışmalar (sıcak çalışma, kapalı alan çalışmaları vb.) bu analizlerin bir parçası olarak oluşturulmalıdır. Projedeki olası acil durumlara karşı analizler gerçekleştirilmeli ve projenin acil durum eylem planı henüz hazırlık aşamasındayken oluşturulmalıdır. Restorasyon faaliyetlerine özgü diğer risklere yönelik özellikli çalışmaların da analizi gerçekleştirildikten sonra yürütülecek diğer inşaat faaliyetleri için mevzuatta tanımlanan sağlık ve güvenlik planı hazırlanmalı, proje aşamasında yürütülecek tüm İSİG faaliyetleri bir sistematik içinde ele alınmalıdır.

Restorasyon uygulamalarında kimi zaman koruma uygulaması yapılan yapı ya da yapı grubu ziyaretçi kabul etmeye devam edebilir. Bu durumda restorasyon uygulamasındaki sağlık ve güvenlik önlemleri ziyaretçileri de kapsamalıdır. Şekil 4'te bir restorasyon projesinin devam ettiği esnada ziyaretçi kabulüne ilişkin güvenlik önlemleri (malzeme düşmesine engel olmak için ağ, örtü sistemleri, alan temizliği ve sınırlandırılması vb.) görülebilmektedir. Sahaya girilirse bile şantiye sınırı tanımının oldukça değişkenlik göstermesi sebebiyle uygulama

yapılan alanın özgün durumuna göre şantiye dışına dönük önlemler değerlendirilmelidir. Örneğin, tarihi yarımadada (İstanbul) bulunan dar bir sokaktaki bir çeşmenin restorasyon çalışmaları planlanırken yoğun turizm işlevi ve ulaşılabilirlik alınacak önlemler ve zaman planlaması bakımından hesaba katılmalıdır. Projede yüklenici seçimi, süre planlaması, malzeme seçimi vb. diğer idari ve pratik faaliyetler ele alınırken gerçekleştirilen bu analizlerden faydalanılmalı ve daima risk kontrol hiyerarşisi uyarınca çalışmalar sürdürülmelidir.



Şekil 4 - Belgrad'taki Aziz Sava Katedrali'nin restorasyon uygulaması sırasında ziyaretçi kabulü

Aşağıda yer alan tabloda restorasyon projelerinde İSİG önlemleri bakımından önemli risklerin klasik inşaat projelerinden farkları belirtilmiştir.

Projenin uygulama aşamasında, hazırlık aşamasında oluşturulan sağlık ve güvenlik planı çerçevesinde faaliyetlere başlanmalıdır. Bu çerçevede, yapı işine ilişkin idari bildirimler, uygulama aşaması için yapılması gereken görevlendirmeler projenin ilk adımı olarak gerçekleştirilmelidir. Restorasyon projesi için oluşturulacak şantiye düzeni daha önce yapılmış planlamalara göre sağlanmalıdır. Çalışmaların yapılacağı eserde ilk çalışmalar, ön risk analizi sonucunda ortaya çıkan, çalışanların ve kamu güvenliğinin sağlanmasına yönelik çalışmalar olmalıdır. Projenin güvenli bir çalışma ortamını sağladığından emin olunduktan sonra ise daha önce proje için hazırlanan sağlık ve güvenlik planının işletilmesine geçilmelidir.

Ayrıca yine ulusal mevzuata göre projenin tamamlanmasının ardından, işletme sürecinde ya da bakım/onarım işlerinde çalışacakların sağlık ve güvenlik ile ilgili dikkat etmesi gereken hususlarla ilgili sağlık ve güvenlik dosyası hazırlanmalıdır. Bu dosyada, proje ile ilgili teknik bilgilere yer verilmeli ve işletme safhasında projenin yapımından kaynaklanan riskler ortaya çıkmışsa gerekli uyarılar yapılmalı, alınan güvenlik önlemleri var ise bunlar tariflenmelidir. Bunun için binanın mevcut fonksiyonu ve iyileştirme çalışması yapıldıktan sonraki (restorasyon sonrası) fonksiyonu tanımlanmalıdır. Örneğin tescilli kültürel varlık niteliğinde olan bir banka binasının, restorasyon sonrası müze fonksiyonuna dönmesi sürecinde, binanın işletim aşamasındaki sağlık ve güvenlik parametreleri göz önüne alınmalıdır.

Çizelge 2 - Restorasyon projelerine özgü İSİG önlemleri

No	Uygulama	İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Uygulamasına İlişkin Faaliyetler
1	İskele Kurulumu	Standart yönetmeliğe tabi olmakla birlikte, yapıya zarar vermeme ilkesi gereği her zaman iskele yapıya sabitlenemeyebilir. Bu karar işi yaptıran idarenin kontrol teşkilatının izni ve yapının statik anlamda güvenilirliğinin tespiti sonrasında verilebilir. Ayrıca yapının kütleli özellikleri (kubbe, tonoz, yivli duvarlar gibi) de iskele kurulumunu ve yapıya yaklaşmayı zorlaştıran etmenlerdir. Bu nedenle ahşap iskele kurulması durumu oluştursa EN normlarına uygun ahşap iskele projesinin hazırlanmasına özen gösterilmelidir.
2	Bina İçinde Boşlukları Kapatma	Yapıya zarar vermeme ilkesi gözetilerek yerine getirilmelidir. Bunun için zemine kapama malzemelerinin çakılması çoğu zaman mümkün olmamaktadır.
3	Korkuluk Yerleştirme	Yapıya zarar vermeme ilkesi gereği yerine getirilerek uygulanmalıdır. Büyük oranda yere ankre edilebilen geçici kenar koruma sistemleri yerine denge ağırlıklarına sahip EN 13374 standartlarına uygun kenar koruma sistemleri tercih edilmelidir.
4	Gırgır Vinç/Yük Asansörü	Yapıya zarar vermeme ilkesi yerine getirilmeli ve gerekli durumda da yapının statik anlamda güvenilirliği tespit edilmelidir.
5	Ahşap İskele	Yapıda iskele projelendirmesinde gözetilecek hususlardandır. İskele zati yüklerinin yapıya zarar verme potansiyeli taşıdığı yerlerde hafif bir malzeme olması nedeniyle tercih edilebilir. İskele Tebliği uyarınca 13,5 metreye kadar olan yüksekliklerde ahşap iskelede C16 mukavemetine sahip ve standartlara uygun ahşaplardan imal edilmiş iskele kullanılmalıdır.
6	Güvenlik Ağı Yerleştirme	Güvenlik ağı ankraj noktalarının stabilite analizi yapılmaksızın ve yapıyı koruma ilkesi gözetmeksizin kullanımı mümkün olmayabilir. Bu durumda toplu koruma önlemi olarak hava yastıklarından faydalanılabilir.
7	Yaşam Hatları Kurulumu	Yaşam hatlarının ankraj noktaları için yapıyı koruma ilkesi gereğince uygun dayanıma sahip bağlantı noktaları belirlenmelidir. Ankraj noktaları için özel projelendirme yapılmalıdır. Ankraj yapmanın mümkün olmadığı durumlarda denge ayaklarına sahip EN normalarına uygun mobil yaşam hatları tercih edilmelidir.
8	Yangına Karşı Koruma	Yapı içerisinde sıcak çalışma (kaynak, kesim vb.) yapılması durumunda yapıyı koruma ilkesi gereği iş izin sistemi kurulmalıdır. Kaynak battaniyesi vb. özel önlemler sıcak çalışmaların olduğu alanlarda uygulanmalıdır.
9	Elektrik Tesisatı	Yapının elektrik tesisatının çoğu durumda eskimiş olacağı gözetilerek şantiye kurulumundan önce elektrik tesisatı ile ilgili uygunsuzluklar tespit edilmelidir. Yangın riskini önemli ölçüde artıran elektrik uygunsuzlukları giderilmeden çalışmalara başlanmamalıdır.
10	Malzeme Düşmesine Karşı Önlem	Koruma altına alınacak yapıların çoğunun meskun mahalde olması ihtimaline karşı, proje başlangıcında öncelikli olarak çevre güvenliği projelendirilmelidir. Ayrıca restorasyonu yapılan yapının bazı kısımlarının yerinden kopması, kırılması, devrilmesi gibi inşaatlarda pek rastlanmayan durumlara ilişkin de önlemler (güvenlik ağıları, alan sınırlandırmalar vb.) alınmalıdır.
11	Kaldırma Operasyonları	Yapı üzerine kurulacak makara, caraskal vb. kullanarak yapılan kaldırma operasyonları için yapı dayanımına uygunluğun gözetilmesi gerekmektedir. Mutlak suretle bu operasyonlar için kaldırma planı hazırlanmalıdır.
12	Eğitim	Restorasyon projelerinde çalışacak işçilerin "Restorasyon Elemanı" mesleki eğitimi almış çalışanlar olmasına dikkat edilmelidir. Ayrıca işçiler projeye özgü İSİG riskleri ve alınan önlemler konusunda ayrıca bilgilendirilmelidir.
13	Sağlık Risklerine Karşı Önlemler	Yapıda asbest, kurşun, kalay gibi zararlı malzemelerin varlığı saptanmalıdır. İş kalemleri arasında toz çıkaracak iş kalemleri varsa, toz ölçümü yapılmalı gerekli önlemler alınmalıdır. Biyolojik riskler önceden saptanmalı, kişisel koruyucu, aşı, ilaçlama gibi önlemler alınmalıdır. Restorasyon işine özgü sağlık riskleri konusunda çalışanlar bilgilendirilmelidir.

Güvenli bir restorasyon projesi gerçekleştirmek için projenin hazırlık aşamasında atılması gereken adımlar çalışmanın ekinde verilen Şekil 5'te akış şeması olarak tariflenmiştir. Bu şemada yer verilen hususlar yalnızca projenin hazırlık aşamasında bazı özel risklere odaklanmış olup projenin uygulama aşamasında uygulanacak diğer İSİG çalışmalarının detaylarını içermemektedir. Unutulmamalıdır ki eksiksiz bir İSİG faaliyeti, projenin tamamlanmasının ardından, işletmesi safhasında risklerin minimize edilerek teslim yapılmasıdır. Bunun için de inşaat projelerinde bu kapsamı karşılayacak İSİG yönetim sisteminin kurulması önem arz etmektedir [22].

4. SONUÇ

Restorasyon faaliyetleri, her ne kadar yapı iş kolunun genel özelliklerini içerisinde barındırır da kendine özgü riskleri bulunan özellikli faaliyetlerdir. Bu çalışmada, restorasyon faaliyetlerinin bu özel durumu ele alınmış ve yürütülecek faaliyetler esnasında dikkat edilmesi gereken ana unsurlara değinilmiştir. Herhangi bir inşaat projesinde olduğu gibi, restorasyon projelerinde de hazırlık aşaması son derece önemli olup, inşaat proje yönetiminin temel başlıkları arasında yer alan İSİG yönetimi açısından, inşaat öncesi evrede yapılacaklar önem kazanmaktadır. Restorasyon projelerine başlamadan önce diğer inşaat projelerinde de yapılması zorunlu olan risk değerlendirmesi, iş güvenliği analizi, alınması gereken önlemlerin belirlenmesi, hazırlanması gereken belgelerin düzenlenmesi gibi birçok başlık bir yönetim sistemi çerçevesinde ele alınmalıdır. [23] Başarılı bir İSG performansı için inşaat faaliyetlerine özgün bir İSG yönetim sistemi tayin edilmelidir. [24] Bu çalışmada restorasyon çalışmalarına özelleşen tehlike ve risklere dikkat çekilmiş, yapım faaliyetleri ile restorasyon faaliyetleri arasındaki farklara vurgu yapılmış ve kolay uygulanabilir bir yol haritası önerilmiştir. Bu ekin restorasyon faaliyetlerinde çalışan/çalışacak mühendis, mimar ve diğer teknik elemanlara bir rehber olacağı düşünülmektedir.

Kaynaklar

- [1] Ahunbay, Z., Tarihi Çevre Koruma ve Restorasyon, Yapı Yayın, İstanbul, 2004.
- [2] UNESCO, Kültür Varlıklarının Uluslararası Mübadelesine İlişkin Tavsiye Kararı, Nairobi, 1976
- [3] 2863 sayılı Kültür ve Tabiat Varlıklarını Koruma Kanunu, 23 Temmuz 1983, T.C. Resmi Gazete, sayı 18113
- [4] Burden, E.E., Illustrated Dictionary of Architectural Preservation: Restoration, Renovation, Rehabilitation, Rese, McGraw-Hill, 2004.
- [5] Zakar, L., Eyüpgiller, K.K., Mimari Restorasyon Koruma Teknik ve Yöntemleri, İstanbul, 2015.
- [6] Yapı İşlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetmeliği, 05/10/2013 tarihli ve 28786 sayılı Resmi Gazete <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/10/20131005-2.htm>, Erişim Tarihi: 30.03.2019.

- [7] Gürcanlı G.E., İnşaat Şantiyelerinde Bulanık Kümeler Yardımıyla İş Güvenliği Risk Analizi Yöntemi, Yayınlanmamış Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2006.
- [8] Kocaman, İ., Okuyucu, D., Kazaz, İ., Tarihi Yapı Malzeme Özelliklerinin Dinamik Parametrelerle Belirlenmesi: Lala Paşa Camii Örneği, Teknik Dergi, 30 (3), 9125-9146, 2019.
- [9] DIN EN 12811 Standardı
- [10] Tozla Mücadele Yönetmeliği, 05/11/2013 tarihli ve 28812 sayılı Resmi Gazete <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/11/20131105-9.htm>, Erişim Tarihi: 08.07.2019.
- [11] Atabey, Eşref. (2009). Türkiye’de Asbest, Eriyonit, Kuvars ve Diğer Mineral Tozları ve Etkileri, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü
- [12] Türk Toraks Derneği, Akciğerde Toz Birikmesi: Pnömonyoz, <https://www.toraks.org.tr/news.aspx?detail=2578>, Erişim tarihi:06.09.2019
- [13] Bazı Tehlikeli Maddelerin, Müstahzarların ve Eşyaların Üretimine, Piyasaya Arzına ve Kullanımına İlişkin Kısıtlamalar Hakkında Yönetmelikte Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik, 21/11/2014 tarihli ve 29182 sayılı Resmi Gazete <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2014/11/20141121-6.htm>, Erişim Tarihi: 08.07.2019
- [14] Akboğa, Ö., Baradan, S., Asbestin İnşaat Sektöründeki Yeri ve Maruziyetin Önlenmesi, Türkiye Mühendislik Haberleri, 469-6/2011-5
- [15] Asbestle Çalışmalarda Sağlık ve Güvenlik Önlemleri Yönetmeliği, 25/01/2013 tarihli ve 28539 sayılı Resmi Gazete <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/01/20130125-24.htm>, Erişim Tarihi: 08.07.2019
- [16] Özbolat, G., & Tuli, A., Ağır Metal Toksisitesinin İnsan Sağlığına Etkileri, Arşiv Kaynak Tarama Dergisi, 25(4), 502-521, 2016.
- [17] <https://www.livescience.com/65451-notre-dame-sky-high-lead-levels.html>, Erişim Tarihi: 08.07.2019
- [18] Kuzucuoğlu, A.H, Karatepe, Y., Tümer, E., Koruma Altındaki Binalarda Sağlık-Güvenlik Parametreleri Açısından Tehlike Etmenleri, Uluslararası Hakemli Beşeri ve Akademik Bilimler Dergisi, Ekim/Kasım/Aralık-Sonbahar Dönemi, 4, 14, 2015.
- [19] Sesigür, H., Çelik, O.C., Çılı, F., Tarihi Yapılarda Taşıyıcı Bileşenler, Hasar Biçimleri, Onarım ve Güçlendirme, İMO İstanbul Bülten, 89, 10-21, 2007.
- [20] Halifeoğlu, F.M, Noyan, C., Halifeoğlu, Z., Tarihi Malabadi Köprüsü’nün Restorasyon Çalışmasında Kullanılan İskele Sisteminin Özellikleri ve Korumadaki Önemi, Uluslararası Katılımlı 6. Tarihi Yapıların Korunması ve Güçlendirilmesi Sempozyumu, 579-587, Trabzon, 2017.
- [21] Provincial, A. F., & Collaboration, T., Standards and Guidelines for the Conservation of Historic Places in Canada, 2014.

- [22] Uzun M., Gurcanli G.E., Change in Occupational Health and Safety Management System: ISO 45001, 5th International Project and Construction Management Conference, IPCMC2 018,16-18 November 2018
- [23] Yilmaz F, Alp S., (2016)Underlying Factors of Occupational Accidents: The Case of Turkey, Open Journal of Safety Science and Technology, 2016, 6, 1-10
- [24] Uzun M., Gürcanlı G.E, (2016)İnşaatlarda İşçi Sağlığı ve Güvenliği Yönetimi, Türkiye Mühendislik Haberleri Dergisi, TMH 489-2016/1, Page No: 20-27

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 6 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 verilmiş 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, yayımlandığı yer, yayımlandığı 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, yayımlandığı 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

ENDER ARKUN

Kuraklık Riski Altındaki Havzalarda Gölet Haznelerinin Tasarımı:
Seyhan Havzası'nda Bir Uygulama..... 10189
Ali Demir KESKİNER, Mahmut ÇETİN, Mehmet ŞİMŞEK, Sabri AKIN

Akifer Parametrelerinin Optimizasyon Tabanlı Bir Eğri Çakıştırma Yaklaşımı
Kullanılarak Belirlenmesi..... 10211
M. Tamer AYVAZ, Gürhan GÜRARSLAN

Kanalizasyon Sistemlerinin Diferansiyel Evrim Algoritması Kullanılarak
Optimum Tasarımı..... 10229
Erhan TAN, Derya SADAK, M. Tamer AYVAZ

Mekanistik-Ampirik ve Geleneksel Beton Yol Tasarım Yöntemlerinin
Karşılaştırılması: Afyon-Emirdağ Deneme Kesimi..... 10251
Emin ŞENGÜN, Hande I. ÖZTÜRK, İ. Özgür YAMAN

TEKNİK NOT

Mimari Restorasyon ve Konservasyon Projelerinde İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği
Uygulamaları..... 10275
Mert UZUN, Deniz ÖZTÜRK, Gürkan Emre GÜRCANLI

ISSN: 1300-3453