



TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Teknik Dergi

*Technical Journal
of
Turkish Chamber of Civil Engineers
Volume 28 Number 3 July 2017*

Cilt 28 Sayı 3 Temmuz 2017

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası

Teknik Dergi

Sahibi:

TMMOB İnşaat Mühendisleri
Odası adına
Cemal GÖKÇE

Yazı İşleri Müdürü:

Hüseyin KAYA

Yazışma Adresi:

Teknik Dergi
İnşaat Mühendisleri Odası
Necatibey Cad. No:57
Kızılay 06440 Ankara
Tel : 0 (312) 294 30 00
Faks: 0 (312) 294 30 88
Web: www.imo.org.tr
E-posta: teknikdergi@imo.org.tr

Yayın Kurulu:

Süheyl AKMAN
Ender ARKUN
İsmail AYDIN
Özer ÇİNİCİOĞLU
Metin GER
Gürkan Emre GÜRCANLI
Alper İLKİ
Cem OĞUZ
Kutay ORAKÇAL
Günay ÖZMEN
Baki ÖZTÜRK
İsmail ŞAHİN
Tuğrul TANKUT

Yayın Sıklığı:

Üç ayda bir yayımlanır

Editör:

Tuğrul TANKUT

Yardımcı Editörler:

Ender ARKUN
İsmail AYDIN
Özer ÇİNİCİOĞLU
Metin GER
Gürkan Emre GÜRCANLI
Alper İLKİ
Kutay ORAKÇAL
İsmail ŞAHİN

Yayın Sekreteri:

Cemal ÇİMEN

ISSN : 1300-3453

Danışmanlar:

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

Emine AĞAR
Hasan U. AKAY
Sami Oğuzhan AKBAŞ
Hüseyin AKBULUT
Ali Payidar AKGÜNGÖR
M. Vefa AKPINAR
Zuhal AKYÜREK
A. Burcu ALTAN SAKARYA
Cem AYDEMİR
M. Tamer AYVAZ
Yusuf AYVAZ
Eray BARAN
Emine BEYHAN YEĞEN
Niyazi Özgür BEZGİN
İlknur BOZBEY
Zafer BOZKUŞ
Burcu BURAK BAKIR
Erdem CANBAY
Halim CEYLAN
Hikmet Kerem CİGİZOĞLU
Özgür ÇAKIR
Hilmi Berk ÇELİKOĞLU
FeYZa ÇİNİCİOĞLU
Mustafa Kürşat ÇUBUK
Ender DEMİREL
Ümit DİKMEN
Ahmet DOĞAN
Emrah DOĞAN
İsmail DURANYILDIZ
Nilay ELGİNÖZ KANAT
M. Emin EMİROĞLU
Ercan ERDİŞ
Gökmen ERGÜN

Orhan EROL
Uğur ERSOY
Güngör EVREN
Ergun GEDİZLİOĞLU
Mustafa GÖĞÜŞ
İlgin GÖKAŞAR
Veysel GÜLDAL
M. Halis GÜNEL
Mehmet Şükrü GÜNEY
Aslı Pelin GÜRGÜN
Soner HALDENBİLEN
Zeynep İŞİK
Hande İŞİK ÖZTÜRK
Murat KARACASU
Engin KARAESMEN
Halil KARAHAN
Cevza Melek KAZEZYILMAZ ALHAN
Engin KEYDER
Veysel Şadan Özgür KIRCA
Gökhan KIRKİL
Niyazi Uğur KOÇKAL
Nuri MERZİ
Yetiş Şazi MURAT
Sepanta NAIMI
Dilek OKUYUCU
Akin ÖNALP
Bihrat ÖNÖZ
Hızır ÖNSOY
Ali Hakan ÖREN
Orkan ÖZCAN
Halit ÖZEN
Mehmet ÖZGER
Hulusi ÖZKUL

Beliz ÖZORHON ORAKÇAL
Turan ÖZTURAN
Nilüfer ÖZYURT ZİHNİOĞLU
Serdar SELAMET
Osman SİVRİKAYA
Serdar SOYÖZ
İbrahim SÖNMEZ
Rifat SÖNMEZ
Nermin ŞARLAK
Burak ŞENGÖZ
Aykut ŞENOL
A. Ünal ŞORMAN
Mehmet Ali TAŞDEMİR
Gökmen TAYFUR
Erhan TEKİN
Turgut TOKDEMİR
Nabi Kartal TOKER
Mustafa TOKYAY
Tamer TOPAL
Cem TOPKAYA
Mehmet UTKU
Tanvir WASTI
İsmail Özgür YAMAN
A. Melih YANMAZ
Emine Beyhan YEĞEN
Nevzat YILDIRIM
Osman YILDIZ
Koray Kamil YILMAZ
M. Tuğrul YILMAZ
M. Semih YÜCEMEN
Yeliz YÜKSELEN AKSOY

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 bir dergidir.

Teknik Dergi

Cilt 28 Sayı 3 Temmuz 2017

İÇİNDEKİLER

- Türkiye'nin En Uzun Sulama Tüneli Suruç Tünelinde Geoteknik ve Tahkimat Tasarımları 7897
Celal AĞAN, Serkan ERTÜRK
- Toplu Ulaşımında Bekleme Süresini Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi: Güvenilirlik, Yolcu Bilgilendirme Sistemi ve Fiziksel Koşullar 7927
Gizem DOĞAN, Mustafa ÖZUYSAL
- Baraj Yıkılması Sonrası İki Boyutlu Taşkın Yayılımının Yerleşim Bölgeleri İçin Modellenmesi 7955
Şebnem ELÇİ, Gökmen TAYFUR, İsmail HALTAŞ, Bülent KOCAMAN
- Kiriş-Kolon Birleşim Bölgesinin Depreme Karşı Çelik Donatılarla Güçlendirilmesi 7977
Hande GÖKDEMİR, Tuğrul TANKUT
- Uydu Kaynaklı Yağmur Verilerinin Hata Oranlarının Deniz Kıyılarına Olan Uzaklığa Bağlı Analizi 7993
Meriç YILMAZ, Muhammad AMJAD, Burak BULUT, M. Tuğrul YILMAZ
- Çelik-Beton Kompozit Kat Döşemesi Yangın Dayanım Deneyi 8007
Serdar SELAMET, Taygun Fırat YOLAÇAN

Önsöz

İKİ DİLLİ TEKNİK DERGİ

Bilindiği gibi, Teknik Dergi, ilk sayısı olan Ocak 1990 sayısından bu yana, hiç aksamadan yılda dört Türkçe ve yıl sonunda bir de seçme yazılardan oluşan, Digest başlıklı İngilizce bir sayı olmak üzere beş sayı düzeni içinde yayımlana gelmiştir.

Öte yandan, Teknik Dergi 2009 yılında Science Citation Index Expanded kapsamına alınmış ve içerdiği yazıların aldığı atıflar bakımından düzenli olarak değerlendirilmeye başlanmıştır. Teknik Dergi'nin bu alanda çok başarılı olmadığı, özellikle "etki katsayısı-impact factor" açısından çok gerilerde kaldığı açıktır. Bu duruma neden olan faktörlerin başında, Türkçe yayımlanan bu derginin yurt dışında fazla okunamamasının geldiği bellidir. Bir diğer faktör de, yazarların Teknik Dergi'de yayımlanan çalışmalarını, bazı geliştirmelerden sonra yurt dışında İngilizce olarak da yayımlamak eğiliminde olmalarıdır. Bu durumda, atıfları doğal olarak İngilizce olan yazılar almaktadır.

Yayın Kurulu tarafından uzun süreden beri irdelenen bu sorunun çözümlenebilmesinin tek yolunun yayın dilinin değiştirilmesi ya da iki dilli yayın olduğu düşüncesinde oybirliği sağlanmıştır. Böyle bir değişikliğin yaratması beklenen olumlu gelişmeler yanı sıra, içereceği güçlüklerin aşılması yolları uzun süre araştırılmış ve çeşitli uğraşlar sonunda, bundan sonra Teknik Dergi'nin iki dilli olarak yayımlanabileceği kanısına ulaşılmıştır. Teknik Dergi'nin temel ilkelerinden biri, inşaat mühendisliği alanındaki araştırma ve geliştirme çalışmalarını, yabancı dille okuma olanağı bulamayan meslektaşlarımıza Türkçe olarak ulaştırmak olmuştur. Öte yandan, çalışmalarını Türkçe olarak yayımlamayı yeğleyen önemli sayıda araştırmacımız bulunduğu da yadsınamaz. Bu iki temel düşünce göz önünde bulundurularak, Teknik Dergi'nin tümüyle İngilizce yayın diline geçmesi yerine, tüm gereksinimleri karşılayabilecek bir orta yol olarak, iki dilli yayın ilkesi benimsenmiştir.

Ocak 2018 sayısından başlayarak Teknik Dergi iki dilli yayın düzenine girecektir. Bundan böyle, (4+1) yerine (3+3) düzeni uygulanacak, Ocak, Mayıs ve Eylül sayıları Türkçe, Mart, Temmuz ve Kasım sayıları İngilizce olacaktır. "Teknik Dergi" başlığının korunması, ancak İngilizce sayıların kapağında "Teknik Dergi" başlığı altında "Technical Journal" alt başlığının da verilmesi uygun görülmüştür.

Geçiş döneminin kolay olmayacağı, ilk sayılar için İngilizce yazı toplanmasında güçlüklerle karşılaşılacağı düşünülmektedir. Olanağı ve hazırlığı bulunan yazarlarımızın bundan sonra İngilizce yazılara ağırlık vermeleri, bu güçlüğü aşılmasına kuşkusuz yardımcı olacaktır. Hatta, Türkçe yazıları değerlendirme aşamasında olan yazarların da, eğer tercih ederlerse, bu yönde bir değişiklik yapmaları memnunlukla karşılanacaktır.

Değerli okurlarımızın, yazarlarımızın ve danışmanlarımızın bilgisine saygılarımızla sunarız...

Yayın Kurulu adına
Tuğrul Tankut, Editör

Foreword

BI-LINGUAL TEKNİK DERGİ

Starting from its first issue of January 1990, Teknik Dergi has regularly published each and every year four issues in Turkish and a fifth December issue called “Digest” consisting of the English translations of the selected papers out of those published that year.

Teknik Dergi has started to be covered by the Science Citation Index Expanded in 2009. Since then, its citation performance is being evaluated and reported regularly. It is evident from the “impact factor” it has been receiving over the years that Teknik Dergi is not performing satisfactorily in this respect. The obvious cause of this failure is the fact that a scientific journal in Turkish cannot get a sizeable international readership. On the other hand, Teknik Dergi authors tend to republish their work in English after certain modifications. This may well be another cause of poor citation performance, since the same work usually gets the citation to the English version, instead of the Teknik Dergi version.

The Editorial Board has been investigating possible solutions for this long lasting problem. The natural, possibly the sole, alternative is to change the medium of publication to English or to convert Teknik Dergi into a bi-lingual journal. Besides its advantages, the complications this change will unavoidably cause were carefully considered and ways to overcome these difficulties were eventually proposed; thus, the critical decision to have a bi-lingual Teknik Dergi could be taken. One major objective of Teknik Dergi has always been to familiarise the Turkish civil engineering community, where English literacy is rather low, with the recent research and technological developments in the civil engineering area. Besides, a significant number of authors are known to prefer to report their work in Turkish. In view of these two considerations, a bi-lingual Teknik Dergi was preferred as a compromise between the two extreme alternatives of a fully Turkish or a fully English Teknik Dergi.

Starting from the January 2018 issue, Teknik Dergi will adopt a bi-lingual publication policy. From then on, Teknik Dergi will annually publish three Turkish and three English issues; January, May and September issues in Turkish, March, July and November in English. The title “Teknik Dergi” will be maintained. However, a subtitle “Technical Journal” will also take place on the cover of the issues in English.

Considering the difficulty of creating a sufficient and sustainable manuscript inflow, a somewhat difficult transition period is anticipated. Our potential authors who have the capability are strongly encouraged to produce manuscripts in English over the next few years. Their effort will definitely help us to overcome the initial shortage of papers in English. Furthermore, the authors who have their manuscripts presently under review should be reminded that publication of their work may possibly be accelerated, if they take the trouble of resubmitting their papers in English.

With kind regards to the readers, authors and reviewers of Teknik Dergi,

On behalf of the Editorial Board,
Tuğrul Tankut, Editor-in-Chief

Türkiye'nin En Uzun Sulama Tüneli Suruç Tünelinde Geoteknik ve Tahkimat Tasarımları

Celal AĞAN¹
Serkan ERTÜRK²

ÖZ

Bu çalışma Suruç ovasının sulanması amacıyla inşa edilen Suruç tüneli güzergahındaki geoteknik çalışmaları ve tünel destek tasarımını kapsamaktadır. Suruç tüneli (7.9 m kazı çapı), Türkiye'nin birinci, dünyanın ise beşinci en uzun sulama tüneli olacaktır (17.2 km). Tünel kireçtaşı ve marl birimlerinden geçmektedir. Saha çalışmaları sondaj, numune alımı, geçirgenlik deneyleri, laboratuvar testleri, kaya kütesinin karakterize edilmesi (RMR, Q ve GSI sistemleriyle), süreksizlik ölçümleri ve kinematik analizleri kapsamaktadır. Kinematik analiz sonuçlarına göre kazı şevlerinde, tünel giriş ve çıkışında kayma riski olmadığı için daha detaylı şev duraylılık analizlerine gerek görülmemiştir. Tünel basınçları, yenilme zonu sınırları ve destek tasarımları ampirik, analitik ve sayısal yöntemlerle belirlenmiş, doğrulukları convergence-confinement yöntemiyle ve Plaxis 8.2 yazılımı ile sınanmıştır. Tünelin desteksiz, Q sisteminin önerdiği elemanlarla desteklendiği (kaya saplama ve püskürtme beton destekli) ve önceden dökülmüş hazır betonla desteklendiği durumlar karşılaştırılmış, en küçük deformasyonlar önceden dökülmüş hazır beton destek elemanlarıyla (0.90 mm) elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kaya kütesi sınıflama yöntemleri, Hoek-Brown yenilme kriteri, Convergence-confinement yöntemi, sayısal analiz, tünel destek tasarımı, Suruç Tüneli.

ABSTRACT

Geotechnical and Support Design of Suruç Tunnel, Turkey's Longest Irrigation Tunnel

This research concerns with geotechnical and support designs along the Suruç tunnel, which will be used for irrigation of the Suruç Plain. The tunnel has a diameter of 7.9 m. It will be the Turkey's 1st and the World's 5th longest irrigation tunnel (17.2 km). The tunnel runs through limestone and marly formations. Field studies include rock mass characterization (by using RMR, Q and GSI systems), discontinuity surveying, drilling, permeability tests and sampling. Support requirements were determined by using the rock

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 05.06.2014 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2017 gününe kadar tartışmaya açıktır.
- DOI: 10.18400/tekderg.310455

1 Harran Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa - agancelal@hotmail.com

2 Harran Üniversitesi, Yapı İşleri Daire Başkanlığı, Şanlıurfa - ser_erturk@hotmail.com

mass classification systems, and evaluated by the convergence-confinement method and Plaxis 8.2 software. The minimum deformations (0.90 mm) occurred in precast lining.

Keywords: Rock mass classification system, Hoek-Brown failure criterion, Convergence confinement method, numerical analyses, Tunnel support design, Suruç Tunnel.

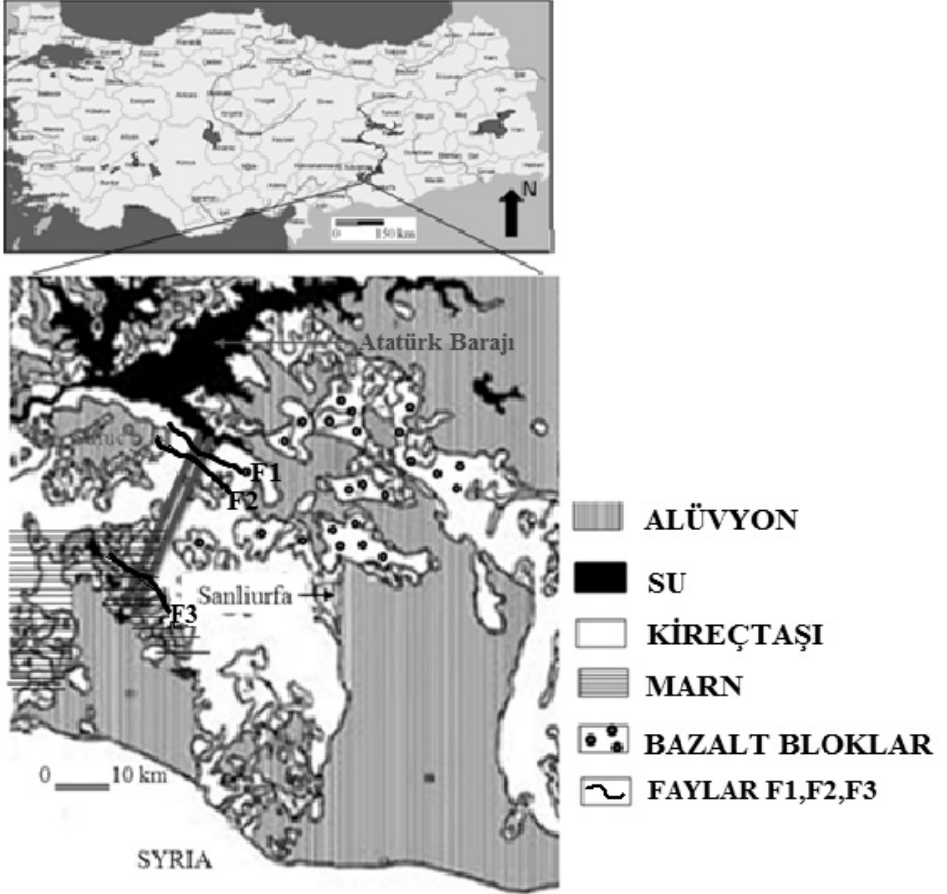
1. GİRİŞ

Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP), Türkiye'nin Güneydoğu Anadolu bölgesinde yaşayan 9 milyon kişinin [1] sürdürülebilir kalkınması amaçlı çok sektörlü bir bölgesel kalkınma projesidir. GAP'ın temel hedefleri tarım, sulama, hidroelektrik enerji üretimi, kentsel ve kırsal altyapı, ormancılık, eğitim ve sağlıktır. GAP'ın tamamlanmasıyla 1.82 milyon hektar alan sulamaya açılacak ve GAP kapsamında 22 baraj ve 19 hidroelektrik santralleri ve sulama şebekeleri hizmete girecektir. GAP'ın belkemiği olan Atatürk Barajı temelden 169 m yüksekliğe sahiptir. 84.5 milyon m³ dolgu hacmi ile dünyanın en büyük altıncı barajıdır. 1,2 milyon m² enjeksiyon perdesine sahip dünyadaki en büyük yapıdır. Atatürk barajında iki adet 26.5 km uzunluğunda ve 7.62 m çapında sulama tüneli (Şanlıurfa Tüneli) bulunmaktadır. Şanlıurfa tünelleri 1995 yılından beri çalışmakta olup amacı Urfa, Harran ve Ceylanpınar ovalarını (toplam 4763.7 km²) sulamaktır. Suruç ve Bozova ilçelerinin sulanması amacıyla yapılmakta olan Suruç tüneli (7.9 m kazı çapı, 7 m tünel son kesit çapı), 17.2 km uzunluğu ile Türkiye'nin birinci dünyanın ise beşinci en uzun sulama tüneli olacaktır. Bu proje ile ekonomisi daha çok tarıma dayalı olan ve 1980'li yıllara kadar bereketli bir bölge olan Suruç ve Bozova ilçe merkezlerine bağlı 105 yerleşim yerine ait toplam 94814 ha bereketli tarım arazisi suya kavuşacaktır. Suruç tüneli DSİ kontrolünde [1] tarafından tasarlanmış olup, tünel kazısı İlcı Yapı Grubu tarafından yapılmaktadır.

Çalışma sahası MTA'nın 1/25 000 ölçekli topografik haritalarına göre N41-a1, N40-b2, N40-b3, N40-b4, N40-c1, N40-c2 and N40-c3 paftalarına düşmektedir. Tünel girişi Şanlıurfa'nın 40 km kuzeybatısında olup, Şanlıurfa-Gaziantep O-52 karayolundan ulaşım sağlanmaktadır (Şekil 1).

Bu çalışmanın amacı; böylesine büyük bir ölçeğe ve öneme sahip Suruç tüneline (i) tünel güzergahı boyunca karşılaşılabilecek kaya malzemelerinin ve kütlelerinin geoteknik ve mekanik parametrelerini tespit etmek, (ii) tünel giriş, çıkış ve kazı kesitlerinin şev duraylılık analizlerini yapmak ve (iii) üç farklı jeolojik birimden geçecek olan tünel için uygun destek tasarımı önermektir.

Bu amaçla, tünel güzergahı boyunca detaylı jeolojik, geoteknik ve kinematik incelemeler yapılmış, ayrıca sondaj, numune alımı, geçirgenlik deneyleri ve laboratuvar testleri yapılmıştır. Tünel giriş, çıkış ve kazı kesitlerinin şev duraylılık analizlerini yapmak için, Dips 2.2 yazılımı [2] kullanılarak kinematik analizler yapılmıştır. Kaya kütleli sınıflandırmaları için uygun bulunan yüzleklere RMR, Q and GSI sınıflama sistemleri uygulanmıştır. Çeşitli araştırmacılar tarafından RMR, Q and GSI sınıflama sistemleri baz alınarak önerilen ampirik bağıntılarla, kaya kütlelerinin dayanım parametreleri belirlenmiştir. Destek önerileri için Q sistemi kullanılmıştır. Daha sonra, deformasyonlar, gerilme konsantrasyonları ve tünel çevresindeki gevşeme zonu kalınlığı convergence-confinement yöntemiyle çözümlenmeli olarak, Plaxis 8.2 [3] yazılımıyla sayısal olarak irdelenmiştir. Son olarak, önerilen destek sistemlerinin performansı değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Suruç tüneli konum ve jeolojik haritası

2. JEOLJİ

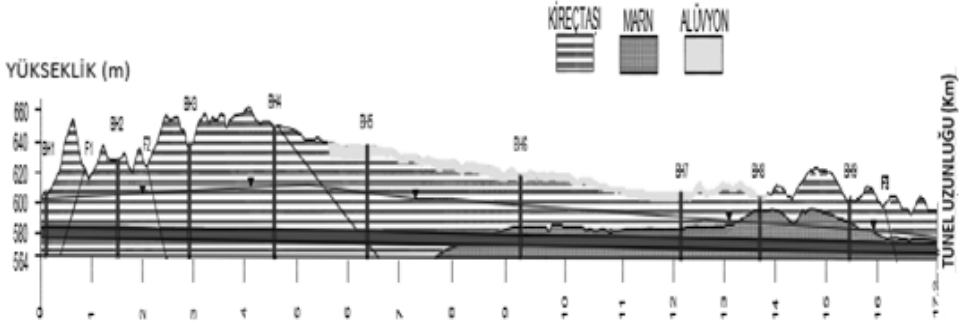
Tünel jeolojik koşullarının bilinmesi kazı yöntemi, uygun malzeme, ekipman ve destek tipi belirlenmesi açısından önemlidir. Ayrıca, inşaat maliyeti ve jeolojik koşulların aydınlatılmadığı yerlerde ki bazı projelerde iyileştirme maliyeti orijinal bütçeyi fazlasıyla aşmaktadır [4].

17.2 km uzunluğunda planlanan Suruç tüneli kireçtaşı ve marn birimlerinden oluşan Gaziantep birimi içerisinde kazılmaktadır. Güzergahın 8.1 km'si kireçtaşı ve 9.1 km'si marn birimlerinden geçmektedir. Gaziantep birimi, ince-orta tabakalı, yer yer kalın tabakalı, açık gri, bej, beyaz, açık kahve renklerde kırılğan, yer yer marn ara seviyeli killi kireçtaşlarından oluşur. Suruç tüneline en fazla örtü kalınlığı marnda 80 m ve kireçtaşında 50 m'dir.

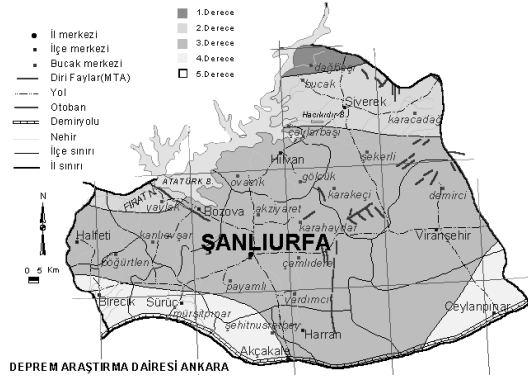
Güzergahın bazı kısımlarında yüzeyde alüvyon ve yamaç molozundan oluşan Kuvaterner çökelleri görülmektedir. Alüvyon, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine [5] göre

SW-SP olarak sınıflandırılır ve çakıl, kum, silt ve kil ve düzgün taneli malzemelerden oluşur. Sondaj sonuçlarına göre alüvyonun kalınlığı en fazla 10 m'dir. Yamaç molozu CL-ML olarak sınıflandırılır ve ince taneli çakıl, kum ve siltli kilden oluşmaktadır. Sondaj sonuçlarına göre yamaç molozunun kalınlığı en fazla 2 m'dir (Şekil 2).

Çalışma alanında üç adet KB-GD doğrultulu fay gözlenmiştir (Şekil 2). Arap plakasının Anadolu plakasını itmesiyle oluşan bu kırıklar, 580 km uzunluğuyla Doğu Anadolu fay zonu Türkiye'nin en önemli tektonik özelliklerinden biridir. Faylar Suruç tünelinin 0.3 km, 2.1 km ve 16.2 km'sinde görülecektir (Şekil 2). Birinci ve üçüncü faylar normal fay, ikinci fay ise ters faydır.



Şekil 2. Tünel güzergahının boyuna jeolojik kesiti ve sondaj kuyularının yerleri



Şekil 3.

Bu bölge [6] tarafından hazırlanan Türkiye deprem haritasına göre kısmen 3. ve kısmen de 4. derece deprem bölgesi içinde yer almaktadır (Şekil 3).

3. GEOTEKNİK İNCELEMELER

Suruç tüneli kireçtaşı, marn ve fay zonu olmak üzere üç ayrı birime ayrılmış ve her birimin geoteknik özellikleri ayrı ayrı incelenmiştir. Geoteknik incelemeler ve kaya mekaniği çalışmaları süreksizlik ölçümleri, kinematik analizler, sondaj, geçirgenlik testleri ve laboratuvar testlerini ihtiva etmektedir.

3.1. Süreksizlik ölçümleri, kinematik analizler

Süreksizliklerin aralığı, açıklığı, devamlılığı ve yönelimleri gibi özellikleri kaya kütesinin özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Bu süreksizlik özellikleri [7] standartlarına uygun olarak yerinde tespit edilmiştir. Tünel güzergahında ölçülen 75 süreksizlik ölçümüyle 1 hakim (baskın) eklem seti tespit edilmiştir. Ayrıca, tünel girişleri, kazı kesitleri ve kaya tabakalarının doğrultu ve eğim açıları ölçülmüştür. Jeolojik birimlere ait içsel sürtünme açıları da girdi olarak kullanmak üzere kinematik analize dahil edilmiştir.

Hakim (dominant) eklem seti; $D : N45^{\circ}W / 80^{\circ}NE$

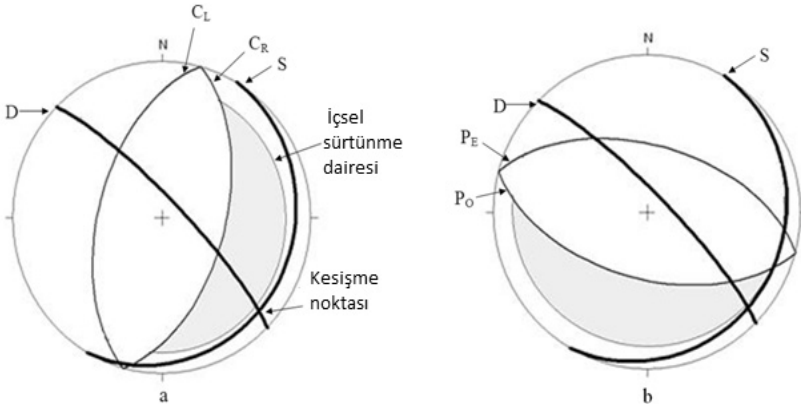
Tabakalaşma (stratification); $S : N30^{\circ}E / 12^{\circ}SE$

Tünel giriş (P_E) ve çıkış (P_O) portalları; $P_E : N75^{\circ}W / 55^{\circ}NE$, $P_O : N75^{\circ}W / 55^{\circ}SW$

; $C_L : N15^{\circ}E / 55^{\circ}NW$, $C_R : N15^{\circ}E / 55^{\circ}SE$

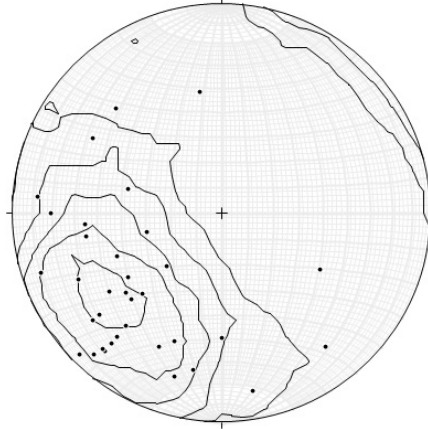
Kireçtaşı (\emptyset_L) ve marn (\emptyset_M) en düşük içsel sürtünme açıları; $\emptyset_L : 25^{\circ}$, $\emptyset_M : 15^{\circ}$

Bu ölçümler eşit alanlı stereografik çizime dayalı Dips 2.2 yazılımı [2] ile değerlendirilmiştir. Kazı şevlerinde, tünel giriş ve çıkışında herhangi bir düzlemsel ve kama tipi kayma riski tespit edilmemiştir (Şekil 3). Bu nedenle Kazı kesitleri sol (C_L) ve sağ (C_R) yamaçlar, daha detaylı şev duraylılık analizlerine gerek görülmemiştir.



Şekil 4. (a) Kazı kesitleri sol (C_L) ve sağ (C_R) yamaçlarda ve (b) tünel giriş (P_E) ve çıkış (P_O) portallarında kinematik analizler

Ölçülebilen 75 adet eklem ve tabakaların kutup dağılım şekli ve kontur diyagramı Şekil 4'de sunulmuştur.



Şekil 5. Ölçülebilen 75 adet eklem ve tabakaların kutup dağılım şekli ve kontur diyagramı

3.2. Sondaj

Tünel güzergahı boyunca litolojinin belirlenmesi, temel kayaç koşullarının daha iyi anlaşılması, yeraltı su seviyesinin (YASS) ölçülmesi ve geçirgenlik deneylerinin yapılması amacıyla toplam 530 m uzunluğunda 10 adet sondaj kuyusu DSİ tarafından açılmış (SK-1, SK-2, SK-3, ... SK-10) ve laboratuvar testleri için bu kuyulardan karot numune alınmıştır (Şekil 2). Ayrıca, her bir sondaj kuyusu için kaya kalite değeri (RQD, 10 cm veya daha fazla uzunluklarda sondaj karotu yüzdesi), toplam karot verimi (TKV, sondaj deliği karot verimi yüzdesi) ve jeolojik birimlerin Lugeon cinsinden geçirgenlik değerleri belirlenmiş ve Tablo 1'de özetlenmiştir.

3.3. Geçirgenlik testleri

Sondajlar sırasında toplam 51 adet basınçlı su testi yapılmış ve bu birimlerin geçirgenlikleri Lugeon değerleri olarak tespit edilmiştir.

Tablo 1'deki veriler incelendiğinde, düşük kaya kalitesi ile geçirgenliğin arttığı görülmektedir. Ancak, geçirgenlik ve derinlik arasında hiç bir bağıntı tespit edilememiştir. Lugeon sonuçlarına göre kireçtaşı geçirgen, marn ise geçirimsiz olarak sınıflandırılmıştır. Tünelin kireçtaşı içerisinde kazıldığı bölümlerde, su sızıntılarını önlemek için mutlaka enjeksiyon yapılmalıdır.

Tablo 1. Sondajlardan elde edilen geoteknik parametreler [1]

Sondaj no	Derinlik (m)	Birim	YASS (m)	RQD (%)			TKV (%)			Lugeon		
				min	mak	ort	min	mak	ort	min	mak	ort
SK-1	38	Kireçtaşı	-	0	95	30	60	100	85	1.2	3.4	2.0
SK-2	58	Kireçtaşı	-	0	85	29	30	100	70	2.4	7.8	4.7
SK-3	70	Kireçtaşı	32	15	85	50	60	100	87	2.3	2.8	2.5
SK-4	81	Kireçtaşı	38	0	85	55	35	100	85	2.1	3.6	2.6
SK-5	70	Kireçtaşı	32	0	90	22	15	100	71	4.6	8.3	6.1
SK-6	53	36 m kireçtaşı 17 m marn	23	0	43	9	30	65	48	-	-	-
				10	90	33	45	95	70	0.1	0.7	0.3
SK-7	43	26 m kireçtaşı 17 m marn	17	15	70	41	65	100	80	-	-	-
				10	85	48	65	95	82	0.1	1.3	0.5
SK-8	42	11 m kireçtaşı 31 m marn	16	0	0	0	15	50	33	-	-	-
				0	90	60	40	100	84	0.1	0.3	0.2
SK-9	42	16 m kireçtaşı 26 m marn	16	10	30	16	33	75	59	-	-	-
				50	85	70	90	100	97	0.13	0.52	0.31
SK-10	31	10 m kireçtaşı 21 m marn	14	0	17	10	25	70	54	-	-	-
				0	95	30	25	100	66	0.16	0.77	0.49

3.4. Laboratuvar test sonuçları

Sondajlardan alınan 77 adet numune [7] standartlarına uygun olarak DSİ laboratuvarlarında test edilmiş, kaya numunelerine ait birim ağırlık, tek eksenli basınç dayanımı (UCS), Elastisite modülü ve Poisson oranı belirlenmiştir. Direk kesme kutusu deneyiyle kohezyon ve içsel sürtünme açıları belirlenmiştir. Bu verilere sayısal analizlerde girdi parametreleri olarak da ihtiyaç vardır. Sonuçlar Tablo 2’de sunulmuştur.

Tablo 2. Laboratuvar test sonuçları [1]

Parametreler	Kireçtaşı			Marn		
	min	ort	mak	min	ort	mak
Kohezyon (MPa)	2.3	4.0	5.2	3.1	3.5	3.9
İçsel sürtünme açısı (°)	25.0	30.0	36.0	15.0	22.0	30.0
Birim ağırlık (kN/m ³)	19.8	23.0	24.2	19.3	23.1	24.9
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	4.1	20.0	44.0	2.0	8.1	13.5
Elastisite modülü (GPa)	2.5	9.0	15.1	1.0	3.2	5.7
Poison oranı	0.15	0.20	0.25	0.24	0.30	0.38

4. KAYA KÜTLESİNİN KARAKTERİZE EDİLMESİ

Kaya kütlelerinin doğru karakterize edilmesi tünel tasarımının, kazı yönteminin, destek türünün doğru seçilmesi açısından önemli bir jeolojik faktördür. Kaya kütlesi karakterize etme çalışmaları sondaj verileri de kullanılarak, mevcut yüzlelerde ve yamaçlardaki kaya yüzeylerinde yapılmıştır.

Günümüze kadar araştırmacılar tarafından birçok kaya kütle sınıflandırma sistemi geliştirilmiştir [8]. Ancak, kireçtaşı ve marn birimlerini karakterize etme çalışmaları için en çok bilinen yöntemler olan, RQD [9], RMR [10], Q [11], RMİ [12] ve GSI [13] yöntemleri kullanılmıştır. Tercihen, modifiye edilmiş versiyonların RMR [14], Q [15] ve GSI [16-18], kullanımına özen gösterilmiştir. Sınıflandırma sistemleriyle elde edilmiş en yüksek (mak), en düşük (min) ve ortalama (ort) değerler tablolar halinde sunulmuştur.

RMR sisteminin girdileri UCS, RQD, süreksizlik aralığı, süreksizlik koşulları, yeraltı suyu koşulları ve süreksizlik yönelimidir. RMR tahminlerin özeti Tablo 3'de sunulmuştur.

Tablo 3. RMR çalışmasının girdileri ve sonuçları

Birim	UCS (MPa)	RQD (%)	Süreksizlik aralığı (mm)	Süreksizlik yüzeylerinin durumu	Su	Eklem uyum derecesi	RMR değerleri
Kireçtaşı	min	4.1	0	60	10-25 lt/dak	olumlu	34
	ort	20	40	200			43
	mak	44	95	2000			69
Marn	min	2	0	60	<10 lt/dak		37
	ort	8.1	65	500			49
	mak	13.5	95	2000			71
Fay	1	0	10			Çok olumsuz	15

RMR sistemi gerilme parametrelerinden yoksun olduğundan, kaya kütlelerini karakterize etme çalışmaları Q sistemiyle de yapılmıştır. Q sisteminin girdileri RQD, çatlak seti sayısı (Jn), çatlak pürüzlülük (Jr), eklem değişiklikleri (Ja), çatlak su indirgeme faktörü (Jw) ve gerilme indirgeme faktörüdür (SRF).

Kaya kütlelerinin Q değerlerini hesaplamak için aşağıdaki eşitlik kullanılır.

$$Q = (RQD / J_n) \cdot (J_r / J_a) \cdot (J_w / SRF) \quad (1)$$

[19] Q'nun gerilmeden serbest hali olan Q_N'i aşağıdaki denklem ile ifade etmektedir. Q_N hesaplamak için SRF'nin 1 olduğu varsayılır.

$$Q_N = (RQD / J_n) \cdot (J_r / J_a) \cdot (J_w) \quad (2)$$

[20] tünel kalite indeksini Q' olarak güncellemiş ve aşağıdaki denklemle bulmayı önermiştir. Q' hesaplamak amacıyla, J_w 'nin 1 olduğu varsayılır. Böylece, Denklem 2 aşağıdaki hali alır.

$$Q' = (RQD / J_n) \cdot (J_r / J_a) \quad (3)$$

Son olarak, [21] Q sistemi güncelleyerek Q_C parametresini önermiştir. Aşağıdaki denklem yeni bir parametre ile mevcut mühendislik parametreleri arasındaki bağıntıların belirlenmesi amacıyla önerilmiştir. σ_{ci} bozulmamış kayanın UCS değeridir.

$$Q_C = Q \cdot (\sigma_{ci} / 100) \quad (4)$$

Q tahminlerinin özeti Tablo 4'de sunulmuştur.

Tablo 4. Q çalışmasının girdileri ve sonuçları

Birim	σ_{ci} MP a	RQD %	J_n	J_r	J_a	J_w	SRF	Q	Q_N	Q'	Q_C
Kireçtaşı	min	-	-	-	-	-	-	0.03	-	-	-
	ort	20	40	6	3	2	0.66	1.3	6.6	9.8	0.26
	mak	-	-	-	-	-	-	3.1	-	-	-
Marn	min	-	-	-	-	-	-	0.02	-	-	-
	ort	8.1	65	6	3	6	1	1.1	5.4	5.5	0.09
	mak	-	-	-	-	-	-	1.6	-	-	-
Fay	1.0	15	6	0.5	8	0.33	10	0.0052	$\frac{0.0}{5}$	0.2	0.0005

Son olarak, kaya kütesinin karakterize edilmesi GSI sistemi tarafından yapılmıştır. R_r (pürüzlülük derecesi), R_w (bozunma derecesi), R_f (dolgu derecesi), SCR (yüzey koşulları derecesi), S_x (x yönünde süreksizlik sayısı), S_y (y yönünde süreksizlik sayısı), S_z (z yönünde süreksizlik sayısı), J_v (hacimsel eklem sayısı) ve SR (yapısal derece) parametrelerinin seçimi için [17]'nin önerileri takip edilmiştir. Çünkü çalışma sahasında üç eksenli yüzler ile J_v değerlerinin belirlenmesi için bazı uygun yüzlekler tespit edilmiştir.

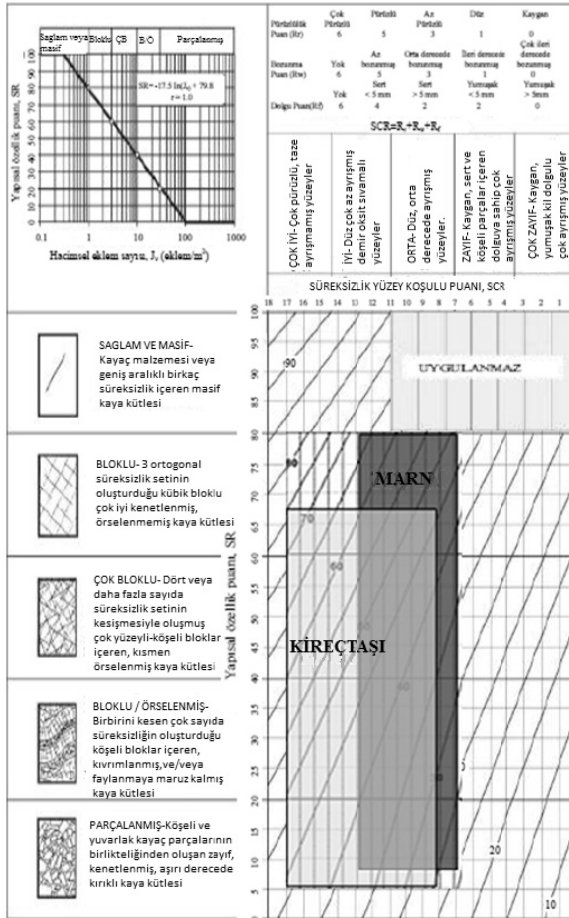
Ayrıca, [18] tarafından yakın zamanda güncellenmiş GSI grafiği, GSI değerlerinin değerlendirilmesi için kullanılmıştır. GSI tahminlerinin bir özeti Tablo 5'de sunulmuştur.

Farklı birimler için GSI değerlerinin aralıkları [18] tarafından önerilen GSI grafiğine işlenmiş ve Şekil 4'de sunulmuştur. Kireçtaşı ve marn için GSI'nin en yüksek, en düşük ve ortalama değerleri birbirine oldukça yakındır. Bütün birimler için kesişen GSI değerleri tarandığında, 25-62 arasında değişen tüm GSI değerlerinin bütün tünel güzergahını temsil edebileceği yorumu yapılmıştır.

Tablo 5. GSI çalışması girdileri ve sonuçları

Birim		R _r	R _w	R _f	SCR	S _x , S _y , S _z * (cm)	J _v	SR	GSI
Kireçtaşı	min	1	3	2	6	2, 20, 25	1000	5	23
	ort	3	5	4	12	15, 40, 100	17	18	42
	mak	5	6	6	17	50, 60, 200	2	66	74
Marn	min	1	2	2	5	2, 20, 35	715	8	22
	ort	1	3	2	6	15, 50, 150	9	52	39
	mak	3	5	4	12	100, 100, 200	1	80	68
Fay		1	1	2	4	2, 5, 10	10000	0	16

* süreksizlik aralığı in x, y, z eksenleri



Şekil 6. GSI değerleri ve aralıkları (Sonmez ve Ulusay, 2002)

5. KAYA KÜTLESİ PARAMETRELERİ

Suruç tünel güzergahındaki kaya kütlelerinin dayanım özellikleri RMR, Q, GSI ve UCS değerlerini kullanan Hoek-Brown'un ampirik yenilme kriteri [20] ile belirlenmiştir. Ayrıca, geomekanik kalite göstergeleri olan RMR, Q ve GSI değerleri kullanılarak, kireçtaşı ve marn birimlerine ait deformasyon modülleri dolaylı olarak belirlenmiştir.

5.1. Hoek-Brown kaya kütleli sabitleri

m_i , m_b , s ve a kaya kütleli sabitleri, [20] tarafından önerilen ve aşağıda verilen formüller kullanılarak tespit edilmiştir. Sağlam kaya sabiti m_i [20] önerilerine göre kireçtaşı için 10 ve marn için 8 seçilmiştir. D kaya kütleli kazısının örselenme faktörü olarak ifade edilmektedir. Tam kesit TBM kazı sırasında çok az örselenmeye neden olduğundan D bu çalışmada sıfır olarak kabul edilmiştir.

$$m_b / m_i = \exp [(GSI - 100) / (28 - 14.D)] \quad (5)$$

Eğer, $GSI < 25$

$$s = 0 \quad (6)$$

$$a = 0.65 - (GSI / 200) \quad (7)$$

Eğer, $GSI > 25$

$$s = \exp [(GSI - 100) / 9] \quad (8)$$

$$a = 0.5 \quad (9)$$

[22] tünelde m_b ve s sabitlerini hesaplamak için 10 numaralı denklemi önermiştir.

$$m_b / m_i = 0.135 \cdot (Q_N)^{1/3} \quad (10)$$

$$s = 0.002 \cdot Q_N \quad (11)$$

[23]'de m_b ve s sabitlerini hesaplamak için aşağıdaki denklemleri önermiştir. [24]'ün açıkladığı kaya kütleli eklemlenme parametresi (J_p) kireçtaşı için 0,2 ve marn için ise 0.3 olarak girilmiştir.

$$m_b = m_i \cdot (J_p)^{0.64} \quad (\text{örselenmiş kayalar için}) \quad (12)$$

$$m_b = m_i \cdot (J_p)^{0.875} \quad (\text{örselenmemiş kayalar için}) \quad (13)$$

$$s = (J_p)^2 \quad (14)$$

Hesaplanan kaya kütleli sabitleri olan m_b , m_i , a ve s değerleri Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Tünel güzergahı boyunca hesaplanan kaya kütlesi parametreleri

Parametre	Denklemler No	Kireçtaşı			Marn			
		min	ort	mak	min	ort	mak	
m_i		10	10	10	8	8	8	
m_b	5	0.64	1.26	3.95	0.49	0.91	2.55	
	10	-	2.38	-	-	2.18	-	
	12	-	3.56	-	-	3.70	-	
Ortalama			2.40			2.26		
S	8	-	0.0016	0.056	-	0.0011	0.029	
	6	0	-	-	0	-	-	
	11	-	0.013	-	-	0.011	-	
	14	-	0.04	-	-	0.09	-	
Ortalama			0.018			0.034		
A	9	-	0.5	0.5	-	0.5	0.5	
	7	0.53	-	-	0.54	-	-	
Ortalama			0.5			0.5		
σ_c (kütile) (MPa)	16	-	0.97	-	-	2.25	-	
	17	0.26	1.86	12.09	0.14	0.97	4.03	
	18	0.82	4.0	8.8	0.6	2.43	4.05	
	20 (denklemler 11, 8'den s)	0	0.81	10.4	0	0.27	2.29	
	20 (denk.11'den s)	-	2.28	-	-	0.85	-	
	22	-	17.57	-	-	16.69	-	
	23	10.78	19.39	63.27	13.32	26.89	67.96	
	24	0.15	1.15	9.33	0.08	0.63	3.17	
	25	3.84	6.59	31.40	4.61	9.45	35.40	
	26	0.32	2.23	11.9	0.18	1.12	3.91	
	27	-	6.68	-	-	3.61	-	
	28	-	7.34	-	-	5.17	-	
	Ortalama			5.07			4.32	
	$E_{(kütile)}$ (GPa)	29	-	-	38	-	-	42
30		3.98	6.68	-	4.73	9.44	-	
31		2.32	8.01	10.29	0.91	2.73	3.74	
33		1.68	2.91	14.03	2.01	4.18	15.84	
34		-	2.84	-	-	1.03	-	
35		1.67	6.43	12.75	0.68	2.38	4.87	
36		2.56	5.88	31.35	3.45	9.33	34.69	
37		0.42	2.82	26.41	0.28	1.51	10.36	
38		3.93	7.95	32.85	5.06	11.76	35.79	
40		-	6.38	-	-	4.48	-	
41	0.13	1.64	12.09	0.05	0.48	3.96		
Ortalama			5.15			4.73		

5.2. Kaya kütlelerine ait dayanımı

[25] kaya kütle dayanımını hesaplamak için bir denklem önermiştir ve bu denklemdeki σ_{ci} bozulmamış kayanın MPa cinsinden UCS değeridir.

$$\sigma_{c(kütle)} = \sigma_{ci} \cdot \exp[7.65 \cdot (RMR - 100) / 18.75] \quad (\text{MPa}) \quad (15)$$

[26] $\sigma_{c(kütle)}$ 'yi hesaplamak için bir denklem önermiştir. Burada B metre cinsinden tünel genişliği, γ ise t/m^3 cinsinden kaya kütlelerinin birim hacim ağırlığıdır.

$$\sigma_{c(kütle)} = [5.5 \cdot \gamma \cdot (Q_N)^{1/3}] / [\sigma_{ci} \cdot (B)^{0.1}] \quad (\text{MPa}) \quad (16)$$

[27] kayaçların $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = \sigma_{ci} \cdot \exp[(RMR - 100) / 24] \quad (\text{MPa}) \quad (17)$$

[12] kayaçların $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = \sigma_{ci} \cdot J_p \quad (\text{MPa}) \quad (18)$$

[20] aşağıdaki gibi geliştirilmiş ampirik yenilme kriteri önermiştir;

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \cdot [m_b \cdot (\sigma'_3 / \sigma_{ci}) + s]^a \quad (\text{MPa}) \quad (19)$$

Burada σ'_1 etkili en büyük asal gerilme, σ'_3 ise etkili en küçük asal gerilmedir. Kaya kütlelerinin UCS'sini belirlerken, σ'_3 0 olarak kabul edilir ve σ_{ci} ise laboratuvar testlerden elde edilir. Böylece, Denklem 12 Denklem 13 haline dönüştürülerek σ'_1 hesaplanır. Bu değer $\sigma_{c(kütle)}$ adını alarak aynı zamanda kaya kütlelerinin UCS'si haline gelir.

$$\sigma_{c(kütle)} = \sigma_{ci} \cdot s^a \quad (\text{MPa}) \quad (20)$$

[28] $Q > 10$ olan sert kayaçlar için $\sigma_{c(kütle)}$ 'yi hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = (\sigma_{ci}/100) \cdot 7 \cdot \gamma \cdot (Q)^{1/3} \quad (\text{MPa}) \quad (21)$$

[22] $Q < 10$ ve $\sigma_{ci} > 2$ olan kayaçlar için Denklem 21'i aşağıdaki gibi değiştirilmiştir.

$$\sigma_{c(kütle)} = 7 \cdot \gamma \cdot (Q)^{1/3} \quad (\text{MPa}) \quad (22)$$

[29] kayaçların $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma_{c(kütle)} = 0,0016 \cdot (RMR)^{2.5} \quad (\text{MPa}) \quad (23)$$

[30] kayaçların $\sigma_{c(kütle)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma_c (\text{kütle}) = \sigma_{ci} \cdot \exp[(\text{RMR} - 100) / 20] \quad (\text{MPa}) \quad (24)$$

[31] kaya kütlelerinin RMR değerlerini kullanarak $\sigma_c(\text{kütle})$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma_c (\text{kütle}) = 0.5 \cdot \exp(0.06 \cdot \text{RMR}) \quad (\text{MPa}) \quad (25)$$

[32] kayaçların $\sigma_c(\text{kütle})$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma_c (\text{kütle}) = \sigma_{ci} \cdot [\text{RMR} / (\text{RMR} + 6 \cdot (100 - \text{RMR}))] \quad (\text{MPa}) \quad (26)$$

[33] kaya kütlelerinin Q değerlerini kullanarak $\sigma_c(\text{kütle})$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma_c (\text{kütle}) = 5 \cdot \gamma \cdot [Q \cdot (\sigma_{ci}/100)]^{1/2} \quad (\text{MPa}) \quad (27)$$

[21] kaya kütlelerinin Q_C değerlerini kullanarak $\sigma_c(\text{kütle})$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$\sigma_c (\text{kütle}) = 5 \cdot \gamma \cdot (Q_C)^{1/3} \quad (\text{MPa}) \quad (28)$$

Hesaplanan $\sigma_c(\text{kütle})$ değerleri Tablo 6'da sunulmuştur.

5.3. Kaya kütlelerinin deformasyon modülü

Kaya kütlelerinin yerinde deformasyon modülü olan $E_{\text{kütle}}$ 'yi RMR, Q, GSI ve UCS değerleri kullanarak dolaylı olarak tahmin edebilecek bazı önermeler literatürde bulunmaktadır.

[34] $\text{RMR} > 50$ olan kaya kütlelerinin RMR değerleri kullanılarak $E_{\text{kütle}}$ hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{\text{kütle}} = 2 \cdot \text{RMR} - 100 \quad (\text{GPa}) \quad (29)$$

[35] $\text{RMR} \leq 50$ olan kaya kütlelerinin RMR değerlerini kullanılarak $E_{\text{kütle}}$ değerini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{\text{kütle}} = 10^{(\text{RMR} - 10) / 40} \quad (\text{GPa}) \quad (30)$$

[36] kaya kütlelerinin E_i ve RF değerlerini kullanılarak $E_{\text{kütle}}$ değerini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{\text{kütle}} = E_i \cdot \text{RF} \quad (\text{GPa}) \quad (31)$$

E_i bozulmamış kaya elastik modülü ve RF ise [36] tarafından ifade edilen yüzde olarak azalma faktörüdür;

$$RF = 0.0028 \cdot RMR^2 + 0.9 \cdot \exp(RMR / 22.82) \quad (32)$$

[37] zayıf kayaçlardaki 50 m'den derin tüneller için $E_{(küttele)}$ değerini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{(küttele)} = 0.3 \cdot H^\alpha \cdot 10^{(RMR-20)/38} \quad (\text{GPa}) \quad (33)$$

Burada H tünel derinliğidir, α ise çok zayıf kayalar için 0,30 - çok sert kayalar için 0.16 arasında değişen bir faktördür. Bu çalışmada, H 80 m, α ise 0.2 olarak seçilmiştir.

[15] $Q>1$ olan kaya kütlelerinin $E_{(küttele)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{(küttele)} = 25 \cdot \log Q \quad (\text{GPa}) \quad (34)$$

[38] kayaçların $E_{(küttele)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{(küttele)} = E_i \cdot 0.5 \cdot [1 - \cos \pi (RMR / 100)] \quad (\text{GPa}) \quad (35)$$

[29] kayaçların $E_{(küttele)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki gibi bir denklem önermiştir;

$$E_{(küttele)} = 0.0097 \cdot (RMR)^{3.54} \quad (\text{MPa}) \quad (36)$$

[39] $\sigma_{ci}<100$ MPa olan zayıf kayaçların GSI değerini kullanarak $E_{(küttele)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{(küttele)} = (\sigma_{ci} / 100)^{0.5} \cdot 10^{(GSI - 10) / 40} \quad (\text{GPa}) \quad (37)$$

[40] kayaçların RMR değerini kullanarak $E_{(küttele)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{(küttele)} = 0.1 \cdot (RMR / 10)^3 \quad (\text{GPa}) \quad (38)$$

[12] $RMI>0.1$ olan kayaçların $E_{(küttele)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{(küttele)} = 5.6 \cdot (RMI)^{0.375} \quad (\text{GPa}) \quad (39)$$

[21] kaya kütlelerinin Q_c değerini kullanarak $E_{(küttele)}$ 'yi hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{(küttele)} = 10 \cdot (Q_c)^{1/3} \quad (\text{GPa}) \quad (40)$$

Son olarak [41] kayaçların E_i ve D değerini kullanarak $E_{(küttele)}$ 'sini hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$E_{(küttele)} = E_i \cdot \{0.02 + [1 - (D/2)]/[1 + \exp((60 + 15 \cdot D - GSI) / 11)]\} \quad (\text{GPa}) \quad (41)$$

Tünel güzergâhından elde edilen kaya kütleleri sabitleri m_i , m_b , s ve a , kaya kütleleri dayanımı σ_c (kütle) ve kaya kütlelerinin yerinde deformasyon modülü $E_{(kütle)}$ değerleri Tablo 6'da topluca sunulmuştur.

6. TAHKİMAT BASINCININ BELİRLENMESİ VE TAHKİMAT TASARIMI

Bu çalışmada tahkimat basınçlarının (P_i) tahmininde Q ve RMR kaya kütleleri sınıflandırma sistemleri kullanılmıştır. Ancak, kaya kütleleri sınıflandırma sistemleri her ne kadar destek basıncı ve destek ihtiyaçlarının belirlenmesinde başarılı olsa da, tüneli çevreleyen kaya kütleleriyle destekler arasındaki etkileşimleri yok sayarlar. Bu zaafiyet ortadan kaldırmak ve emniyetli tünel destek tasarımı yapabilmek amacıyla, aynı hesaplamalar analitik ve sayısal yöntemler de tekrarlanarak, ampirik yöntemlerle elde edilen sonuçlar kontrol edilmiştir.

6.1. Tahkimat basıncının tahmini

[11] kaya kütlelerinin Q değerleri kullanarak destek basıncını (P_i) hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$P_i = 0.2 \cdot Q^{-1/3} / J_r \quad (\text{MPa}) \quad (42)$$

[42] kaya kütlelerinin RMR, γ ve B değerlerini kullanarak P_i hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$P_i = [(100 - \text{RMR}) / 100] \cdot \gamma \cdot B \quad (\text{MPa}) \quad (43)$$

[19] 50 m 'den derin tüneldeki kaya kütlelerinin RMR, B ve H değerlerini kullanarak P_i hesaplamak için aşağıdaki denklemi önermiştir;

$$P_i = (7.5 \cdot B^{0.1} \cdot H^{0.5} - \text{RMR}) / 20 \cdot \text{RMR} \quad (\text{MPa}) \quad (44)$$

Tünel güzergahındaki kireçtaşı ve marn jeolojik birimlerinin destek basınç miktarları hesaplanmış ve Tablo 7'de sunulmuştur.

Tablo 7. Suruç tüneli için destek basıncı hesapları (MPa)

Denklem no	Kireçtaşı	Marn	Fay zonu
42	0.06	0.07	2.31
44	0.05	0.09	0.22

6.2. Ampirik Yöntemler

Ampirik yöntemler olan RMR ve Q sistemleri kullanılarak tünel için gerekli destek sistemleri seçilmiştir. Kireçtaşı ve marn için ortalama RMR değerleri sırasıyla, 43 ve 49'dur. Her iki birimde III sınıf kaya kütleleri sınıfındadır. III. sınıf kaya kütleleri için RMR

sistemi 4 m uzunluğunda sistematik kaya saplaması, duvarlarda ve taç kısmında 1,5-2 m aralıklı tel hasır, tavanda 50-100 mm duvarda ise 30mm kalınlığında püskürtme beton önermektedir.

[11] tarafından önerilen eşdeğer boyut (D_e) kazı destek oranı (KDO) ve kazı açıklığı parametreleriyle aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$D_e = \text{Kazı açıklığı, çap veya yükseklik (m)} / \text{Kazı Destek oranı, KDO} \quad (45)$$

Suruç tünelinin kazı açıklığı 7 m ve KDO 1,6 olarak kabul edilmiş, D_e 4.37 olarak hesaplanmıştır.

[11] ve [15] D_e ve Q değerlerine göre bazı destek grafikleri önermektedir. Bunlarda kireçtaşı birimi için D_e değeri 4.37 ve Q değeri de 1.3 olduğundan, 1.8 m aralığında ve 3.7 m uzunluğunda kaya bulonunun ve 4.5 cm kalınlıkta çelik lif takviyeli püskürtme betonu önerilmiştir. Marn için D_e değeri 4.37 ve Q değeri de 1.1 olduğundan, 1.7 m aralığında ve 3.7 m uzunluğunda kaya bulonları ve 5 cm kalınlıkta çelik lif takviyeli püskürtme betonu önerilmiştir.

6.3. Çözümlemeli yöntem

Destek ihtiyacı çözümlemeli olarak convergence-confinement yöntemi ile belirlenmiştir. Bu yöntem ilk olarak [43] tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde zeminin ve uygulanacak desteğin deformasyon özelliklerine ihtiyacı vardır. Böylece, destek üzerine tahmini yükler uygulanabilmektedir. Convergence-confinement yöntemi Hoek-Brown yenilme kriterini karşılayan kaya kütleleri için uygun olup, ilk olarak [44-47] tarafından uygulanmıştır.

Tünel yarıçapı R , yarıçapa bağlı düzgün gerilme alanı S_0 ve tünel iç basıncı p_i olarak kabul edilirse, kritik destek basıncı p_i^{cr} aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$p_i^{cr} = [P_i^{cr} - (s / m_b^2)] \cdot m_b \cdot \sigma_{ci} \quad (\text{MPa}) \quad (46)$$

Burada P_i^{cr} aşağıdaki formül ile elde edilebilen ölçekli kritik basınçtır.

$$P_i^{cr} = 0.0625 \cdot [1 - (1 + 16 \cdot S_0)^{0.5}]^2 \quad (\text{MPa}) \quad (47)$$

S_0 aşağıdaki formül ile verilen ölçekli gerilme alanıdır.

$$S_0 = (\sigma_0 / m_b \cdot \sigma_{ci}) + (s / m_b^2) \quad (\text{MPa}) \quad (48)$$

Eğer $p_i > p_i^{cr}$ ise yenilme beklenmez. Bu durumda, kaya kütlelerinin çevresi elastik davranış gösterir. Aşağıdaki denklem ise, tünel duvarlarındaki içe doğru elastik yer değiştirmeyi verir. Kaya kütlelerinin kayma modülüne G_{rm} denir.

$$u_r^{el} = R \cdot (\sigma_0 - p_i) / (2 \cdot G_{rm}) \quad (\text{mm}) \quad (49)$$

Eğer $p_i < p_i^{cr}$ den düşük ise yenilme beklenir. Kırık bölgenin yarıçapı R_{pl} aşağıdaki gibi tanımlanır;

$$R_{pl} = R \cdot \exp[2 \cdot (P_i^{cr} - P_i)^{0.5}] \quad (m) \quad (50)$$

[13] bazı durumlarda plastik hacmin değişmediğini varsaymanın daha uygun olabileceğini belirtmiştir. Bu durumda, toplam içe doğru plastik deformasyon aşağıdaki gibi hesaplanır;

$$u_r^{pl} = [(\sigma_0 - p_i^{cr}) / (2 \cdot R \cdot G_{rm})] \cdot \{[(1 - 2 \cdot \nu) / 2] \cdot [(P_i^{cr})^{0.5} / (S_0 - P_i^{cr})] + 1\} \cdot (R_{pl} / R) + \{(1 - 2 \cdot \nu) / [4 \cdot (S_0 - P_i^{cr})]\} \cdot [\ln(R_{pl} / R)]^2 - [(1 - 2 \cdot \nu) / 2] \cdot [(P_i^{cr})^{0.5} / (S_0 - P_i^{cr})] \cdot [2 \cdot \ln(R_{pl} / R) + 1] \quad (mm) \quad (51)$$

Burada ν Poisson oranıdır. Bu çalışmada parametrelerin hesaplanması için [45]'in önerileri izlenmiştir. Suruç tünel için R ve σ_0 değerleri kireçtaşı ve marn'da benzerdir ve bunlar sırasıyla 7 m ve 1.84 MPa olarak alınmıştır. İç destek basıncı p_i , tünelin desteklenmeyen kısımları için sıfır kabul edilmiştir. Kritik destek basıncı, desteklenmeyen tünel için en fazla deformasyonlar, plastik bölgelerin yarıçapı ve gerilme değerleri Tablo 8'de sunulmuştur.

Tablo 8. Kritik destek basıncı, plastik bölge, en fazla deformasyon ve yüzdeleri

Birim	Kritik destek basıncı p_{cr} , MPa	Plastik zon bölgesi R_{pl} , m	En fazla deformasyon u_{max} , mm	Deformasyon, %
Kireçtaşı	0.023	4.7	18.7	0.27
Marn	0.009	4.0	16.4	0.24

[48] gerilmeler, geoteknik sorunlar ve destek türleri arasındaki bazı ilişkileri için Tablo 9'u önermiştir.

Tablo 8 ve 9'dan görüldüğü gibi, kireçtaşı ve marn birimlerinin her ikisinin de gerilme değerleri %1'den azdır. Kaya kütlesi sınıflama sistemleri tarafından tavsiye edilen destek sistemleri Tablo 10'da sunulmaktadır.

Tablo 9. Deformasyon geoteknik problemler ve destek tipleri arasındaki ilişki [48]

Deformasyon ε %	Geoteknik problemler	Destek tipi
	A < 1	Çok basit tünel destekleri. Bazı duraylılık sorunları olabilir. Kaya kütlesi sınıflama sistemi tasarım için uygun bir dayanak oluşturur.

Tablo 9. Deformasyon geoteknik problemler ve destek tipleri arasındaki ilişki [48] (devam)

Deformasyon ϵ %	Geoteknik problemler	Destek tipi
B 1 - 2.5	Convergence-confinement yöntemi bölgenin aşamalı gelişiminin, farklı destek türleri arasındaki etkileşimin ve tüneldeki kaya kütlelerini çevreleyen plastik zonun oluşumunu öngörmek için kullanılır.	Tavan saplamaları ve püskürtme beton kaplama. Bazı durumlarda çelik bağlar gerekebilir.
C 2.5 - 5	Sıkışmanın düzeyi daha belirgindir. Genellikle kazı 'alın duraylılığı' önemli bir sorun oluşturmaz.	İksanın hızlı bir şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Püskürtme beton kaplaması içinde ağır profilli çelik desteklerin yerleştirilmesi gerebilir.
D 5- 10	Tünel tasarımında iki boyutlu sonlu analizler kullanılır. Alın duraylılık problemleri yoğunlaşmaktadır.	Çok ciddi sıkışma ve alın duraylılık sorunları olmaktadır. Hızlı bir şekilde püskürtme beton ile birlikte çelik destek yerleştirilmesi gerekmektedir.
E > 10	Şiddetli alın duraylılık sorunuyla beraber sıkışma olmaktadır.	Aşırı sıkışma nedeniyle tavanda süren ve alında güçlendirme gerekmektedir. Sıkışmanın denetimi açısından püskürtme beton kaplaması içinde esnek çelik bağ kullanımı tercih edilebilir.

Tablo 10. Kaya kütlesi sınıflama sistemi tarafından önerilen Suruç tünelinin destek sistemi

Yöntem	Birim	Kireçtaşı	Marn	Fay
Q	Q	1.3	1.1	0.0052
	Span/ESR	4.37	4.37	4.37
	Destek	2m uzunluğunda sistematik bulon, 1.8 m aralıklı, 4.5 cm liflerle güçlendirilmiş püskürtme beton	2m uzunluğunda sistematik bulon, 1.7 m aralıklı, 5 cm liflerle güçlendirilmiş püskürtme beton	2m uzunluğunda sistematik bulon, 0.8 m aralıklı, 20 cm liflerle güçlendirilmiş püskürtme beton

Tablo 10. Kaya kütlesi sınıflama sistemi tarafından önerilen Suruç tünelinin destek sistemi (devam)

Yöntem	Birim	Kireçtaşı	Marn	Fay
RMR	RMR	43	49	15
	Destek	4m uzunluğunda sistematik bulon, taç kısmında tel kafes ile duvar ve taç kısımlarında 1.5-2 m aralıklı. Püskürtme beton taç kısmında 5-10 cm, kenarlarda 3 cm	4m uzunluğunda sistematik bulon, taç kısmında tel kafes ile 1.5-2 m aralıklı. Püskürtme beton taç kısmında 5-10 cm, kenarlarda 3 cm	5-6 m uzunluğunda sistematik bulon, tel kafes ile duvar ve taç kısmında 1-1.5 m aralıklı. invert saplaması. püskürtme beton taç kısmında 15-20 cm, kenarda 15 cm, ve yüzeyde 5 cm. ortalama ağırlıktaki nervür mesafesi 0.75 m çelik kaplama ve destek kesit kapatılmalı gereklidir.

6.4. Sayısal yöntem

Gerilmeleri, deformasyonları ve destek basınçlarını modellemek amacıyla Plaxis 8.2 yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım iki-boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle çözüm yapabilmektedir [3]. Sonlu elemanlar analizine kaya kütlesi davranışlarını daha iyi yansıtabilmek amacıyla Hoek-Brown yenilme kriteri kullanılmıştır. Hoek-Brown yenilme kriteriyle uyumlu olabilmek için, lineer-elastik malzeme modeli seçilmiştir. Lineer-elastik malzeme modeline uyumlu olduğu için [3], malzeme tipi olarak gözeneksiz davranış seçilmiştir. Girdi parametreleri birim ağırlık, Young modülü, Poisson oranı ve içsel sürtünme açısıdır.

Modelin dış sınırı tünel çapının 2 katı olarak tasarlanmıştır. Tünel çapı 7 m olarak girilmiştir. Kireçtaşı ve marn için yüzeyin altında tünel kazı derinliği sırasıyla 80 m ve 50 m olarak varsayılmıştır. Kaya kütlesinin giriş parametreleri için Bölüm 4'te verilen değerler seçilmiştir. Emniyetli tarafta kalabilmek için mekanik parametrelerin artık değerlerinin pik değerlerin yarısı kadar oldukları varsayılmıştır. Düşey gerilmelerin örtü kalınlığının bir fonksiyonu olduğu varsayılmıştır. Yeraltı suyu yüzeyden 20 m derinde olarak girilmiştir. Böylece, Plaxis 8.2 yazılımı analizlerine göre yerinde düşey gerilmeler 1.1 MPa, yatay gerilmeler 1.6 MPa hidrostatik basınç ise 0.68 MPa olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlar [29]'un önerileriyle uyumlu bulunmuştur.

Analiz üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci analizde desteksiz kazı koşulları, ikinci analizde Q sistemiyle destekli ve üçüncü analizde ise tam kesit TBM kazı sistemiyle beton kaplama destek sistemleri incelenmiştir. RMR sisteminde gerilme, eklem pürüzlülüğü ve eklem dolgusu gibi parametreler dikkate alınmadığı için, Q sistemi destek önerilerinin incelenmesi uygun görülmüştür. Otomatik ağ oluşturma seçeneği kullanılmış olup, tünel

çevresi daha sık ağlarla modellenmiştir. Daha sonra tünel çevresinde oluşan gerilmeler ve deformasyonlar hesaplanmıştır. Kireçtaşı ve marn birimleri için hesaplanan gerilmeler, deformasyonlar ve plastik noktalar Şekil 7 ve Şekil 8'de sunulmuştur.

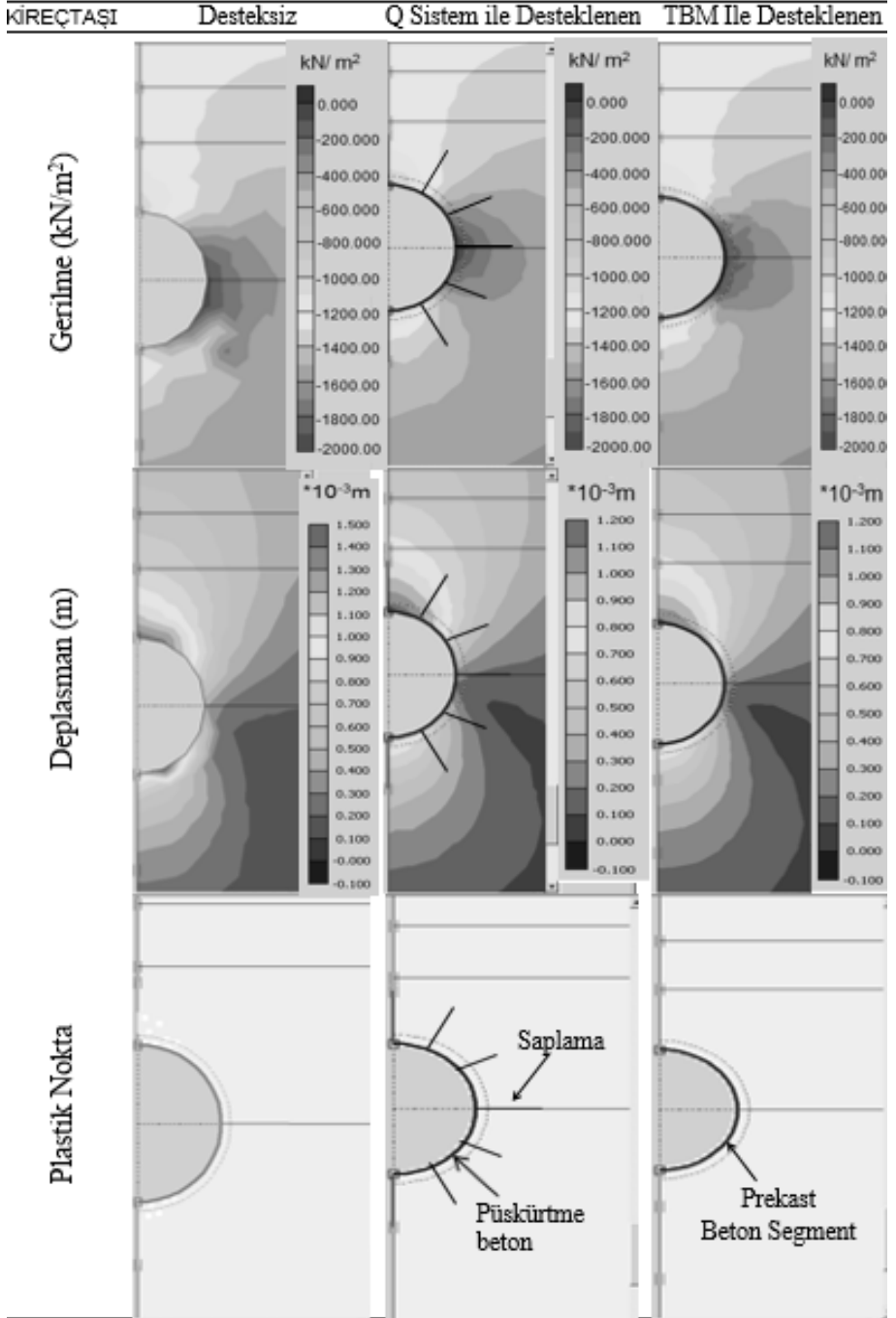
Desteklenmiş ve desteklenmemiş durumlar için plastik bölgenin ölçütü, tünelin deformasyonları ve gerilmeleri incelemiştir. Tablo 11'de görüldüğü gibi deformasyonlar çok küçük olmasına rağmen (1.47 mm), kireçtaşı ve marn birimlerinden geçen fay zonları ve tünelin desteklenmeyen kısımlarında bazı duraysızlıklar olacağı anlamına gelmektedir.

Deformasyonlar ve plastik bölgenin büyüklüğü TBM sistemindeki beton destek kaplamaları ve Q sisteminin destek elemanları tarafından en aza indirgenmiştir. Bunlar önerilen desteklerin yeterli olduğu anlamına gelmektedir. Şekil 7 ve Şekil 8'den görüldüğü gibi, kaya saplamaları aşırı gerilme altındaki zonu aşmaktadır. Ancak, fay zonlarında daha fazla destek elemanları gerekebilir. Fay zonunun bulunduğu yerde FEM için gerekli laboratuvar testleri gerçekleştirilemediğinden, fay zonları için sayısal analizler yapılamamıştır.

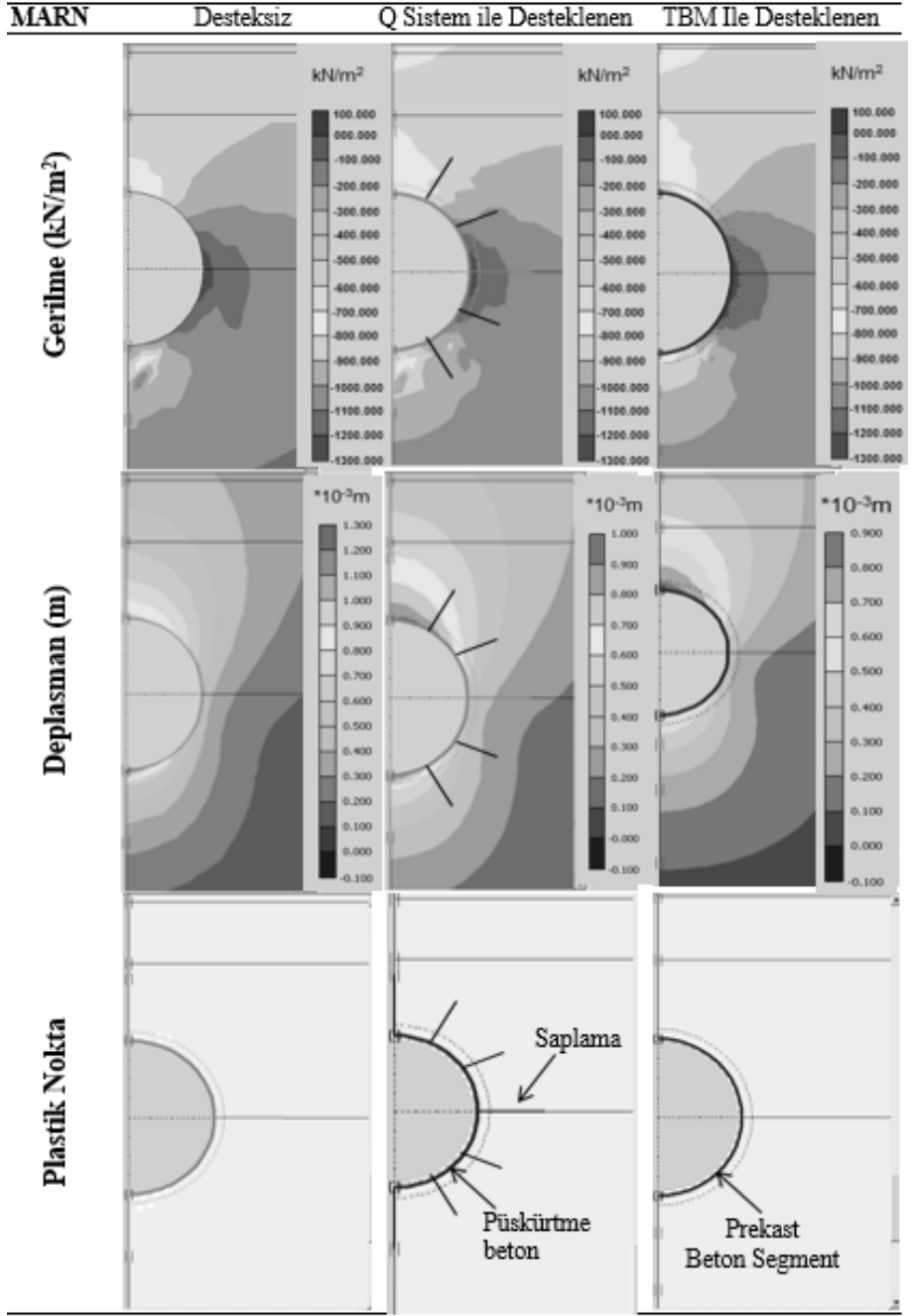
Analitik yöntemde belirlenen kalıcı deformasyona uğramış plastik bölgenin yarıçapı sayısal analizlerle belirlenenlerden daha büyüktür. Ancak, bazı sonlu elemanlar programlarının çok küçük gerilmelerde ve sayısal modelde sonlu ayrışmaların yol açtığı küçük farklılaşmalara uygun olmayabilecekleri unutulmamalıdır. Bu yüzden [47]'nin belirttiği gibi, yenilmenin büyüklüğünden ziyade, plastik zonun yayılımının tespit edilmesi bu analizler açısından daha anlamlıdır.

Tablo 11. Plastik zonun yarıçapı, en büyük deformasyonlar ve destek basınçları

		Kireçtaşı	Marn
Plastik zonun yarıçapı, R_{pl} , m	Desteksiz	4.6	4.1
	Q sistemi ile destekleme	3.6	3.6
	TBM kaplaması ile destekleme	3.6	3.6
En büyük deformasyon, u_{kittle} , mm	Desteksiz	1.47	1.22
	Q sistemi ile destekleme	1.18	0.99
	TBM kaplaması ile destekleme	1.15	0.90
Destek basıncı, MPa		1.95	1.25



Şekil 7. Kireçtaşı bölgesindeki tünel için gerilmeler, yer değiştirmeler ve plastik noktalar



Şekil 8. Marn bölgesindeki tünel için gerilmeler, yer değiştirmeler ve plastik noktalar

7. YORUM VE ÖNERİLER

Ülkemizde her ne kadar karayolu tünelleriyle ilgili araştırmalar daha yaygın olsada [49], bu çalışmada Türkiye'nin birinci dünyanın beşinci en uzun sulama tüneli olan Suruç tüneline ait geoteknik araştırmalar, kaya kütlesi karakterizasyonu ve tahkimat tasarımları irdelenmiştir. Tünel kireçtaşı ve marn birimleri içerisinde kazılmaktadır. Kaya kütlelerinin karakterizasyonu RMR, Q ve GSI sistemleriyle, mekanik özellikleri ise laboratuvar testleriyle tespit edilmiştir. Süreksizliklerin niceliksel açıklamaları, doğrultuları ve eğimleri yerinde ölçümlerle tespit edilmiştir.

Bu çalışmanın sonuçlarına göre, kireçtaşı, marn ve fay zonu için bazı duraysızlık sorunları beklenmektedir. Çözümlemeli ve sayısal yöntemlerle, deformasyonlar ve tünelin desteksiz bölgelerindeki plastik alanlar belirlenmiştir. Ampirik yöntemle göre, destek sistemleri olarak kaya saptaması ve püskürtme beton önerilmiştir. Ayrıca, Suruç tüneli tam kesit TBM ile kazılmakta olduğu için prekast beton kaplama da incelenmiştir. Analiz sonuçlarına göre, önerilen destek sistemleri sayesinde deformasyonlar ve plastik bölge sınırları azaltılmıştır. Deformasyonlardaki en fazla azalma beton kaplama destek sistemi ile elde edilmiştir.

Bu sonuçlara göre, bu çalışmada uygulanan ampirik, çözümlemeli ve sayısal analizler uyumlu sonuçlar vermiştir. Bundan dolayı, bu analizlerin tünel destek tasarımı projelerinde birlikte kullanılması önerilmektedir.

Bu çalışmanın en büyük noksanlığı, belirlenen deformasyonların tünelde yapılacak gerçek deformasyon ölçümleriyle teyit edilememesidir. Gerek kazı işleminin tam kesitli TBM ile yapılması gerekse de şantiye çalışmalarını aksatmamak adına gerçek deformasyon ölçümleri yapmak üzere tünelin çeşitli bölgelerinde teçhizatlandırma işlemi için çalışma izni alınmamıştır. Bundan sonraki çalışmalarda, ön tahminde bulunulmuş tünel deformasyon değerlerinin ve önerilen destek sistemlerinin doğruluğunun teyidi için, kazı çalışmaları sırasında ve sonrasında yerinde deformasyon ölçümlerinin yapılması önerilir.

Semboller

a	Kaya kütlelerinin yüzey pürüzlülük katsayısı
ASTM	American Society for Testing and Materials
CL	Düşük plastisiteli kil
C _L	Sol kazı kesiti
C _R	Sağ kazı kesiti
ML	Silt
D	Hakim eklem seti
D	Kazı metoduna bağlı olarak kaya kütlesi örselenme katsayısı
D _e	Eşdeğer boyut
DSİ	Devlet Su İşleri
E _(Küttele)	Kaya kütlelerinin yerinde deformasyon modülü
E _i	Kaya numunesinin elastik modülü

ε	Deformasyon (mm)
GAP	Güneydoğu Anadolu Projesi
GD	Güneydoğu
GSI	Geological strength index (jeolojik dayanım indeksi)
G_{rm}	Kaya kütlelerinin kayma modülü
H	Örtü kalınlığı
ha	Hektar
J_p	Kaya kütlelerinin eklemleme parametresi
J_n	Çatlak seti sayısı
J_a	Eklem değişiklikleri
J_r	Çatlak pürüzlülük
J_v	Hacimsel eklem sayısı
J_w	Çatlak su indirgeme faktörü
KB	Kuzeybatı
KDO	Kazı destek oranı
km	Kilometre
km^2	Kilometrekare
m	Metre
m^2	Metrekare
m^3	Metreküp
mak	Maksimum
min	Minimum
m_i	Sağlam kayacın petrografik katsayısı
m_b	m_i katsayısının indirgenmiş hali
mm	Milimetre
ort	Ortalama
p_i^{cr}	Kritik destek basıncı
P_i^{cr}	Ölçekli kritik destek basıncı
P_i	Destek basıncını
P_E	Tünel girişi
P_O	Tünel çıkışı
Q	Barton kaya kütle sınıflama sistemi
RMR	Rock mass rating (kaya kütle puanı)
RMI	Rock mass index (kaya kütle indeksi)
RQD	Rock quality designation (kaya kalite göstergesi)

R _r	Pürüzlülük derecesi
R _w	Bozunma derecesi
R _f	Dolgu derecesi
R _{p1}	Kırık bölgenin yarıçapı
S	Tabakalaşma
s	Taneler arası tutunma derecesi
SCR	Yüzey koşulları derecesi
S _x	x yönünde süreksizlik sayısı
S _y	y yönünde süreksizlik sayısı
S _z	z yönünde süreksizlik sayısı
SR	Yapısal derece
S ₀	Ölçekli gerilme alanı
SK	Sondaj kuyusu
SRF	Gerilme indirgeme faktörü
SP	Kötü derecelenmiş kum
SW	İyi derecelenmiş kum
TBM	Tunnel boring machine (tünel delme makinesi)
TCR	Toplam karot verimi
TKV	Karot verimi yüzdesi
UCS	Tek eksenli basınç dayanımı
u _r ^{el}	Elastik yer değiştirme
YASS	Yeraltı su seviyesi
Ø _M	İçsel sürtünme açısı (marn)
Ø _L	İçsel sürtünme açısı (kireçtaşı)
v	Poison Oranı
σ' ₁	Etkili büyük asal gerilme
σ' ₃	Etkili küçük gerilme
σ _{ci}	Bozulmamış kaya tek eksenli basınç dayanımı (MPa)
σ _c (kütle)	Kaya kütlelerinin basınç dayanımı (MPa)
γ	Kaya kütlelerinin birim hacim ağırlığı (t/m ³)

Teşekkür

Yazarlar DSİ 15. Bölge Müdürlüğüne, İlci İnşaat A.Ş.'ye, Bar-Su ve Geotecna Progetti Srl. Şirketlerine, Editör ve hakem kuruluna teşekkürlerini sunar.

Kaynaklar

- [1] Bar-Su and Geotecna Progetti Srl. Engineering Companies, Suruç tunnel report, 2010.
- [2] Diederichs, M.S., Hoek, E., DIPS 2.2. Advanced Version Computer Programme, Rock Engineering Group, Department of Civil Engineering, University of Toronto, 1989.
- [3] Plaxis B.V., User manual for Plaxis 8.2. Computerlaan 14, 2628 XK Delft, The Netherlands, 2000.
- [4] Ichikawa, K., Geological investigation of dams. Proc. of 2nd Asian Symposium on Engineering Geology and the Environment. Malaysian National Group, Bangi, Malaysia, s 1-57, 1999.
- [5] ASTM D2487-11, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes, Unified Soil Classification System (USCS). ASTM International, USA, 1984.
- [6] AFAD (Afet ve Acil Durum Yönetimi), Deprem Dairesi Başkanlığı: <http://www.deprem.gov.tr>, (1996).
- [7] ISRM (International Society for Rock Mechanics): The complete ISRM suggested methods rock characterization, testing and monitoring:1974-2006, Editors: R. Ulusay, J.A. Hudson, ISBN: 978-975-93675-4-1, Kozan Ofset, Ankara, Turkey, p 613 (2007).
- [8] Ulusay, R., Sonmez, H.: Kaya kütlelerinin mühendislik özellikleri (in Turkish), TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, No: 60, Ankara (2002).
- [9] Deere, D.U.: Geological consideration. In: Stagg, K.G., Zienkiewicz, O.C. (Eds.), Rock Mechanics in Engineering Practice. Wiley, London (1968).
- [10] Bieniawski, Z.T.: Engineering classification of jointed rock masses. Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng. 15, 335-344 (1973).
- [11] Barton, N.R., Lien, R., Lunde, J.: Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mech. 4, 189– 239 (1974).
- [12] Palmstrom, A.: RMi - a rock mass characterization system for rock engineering purposes. PhD Thesis, Oslo University, Norway. p 400 (1995).
- [13] Hoek, E., Brown, E.T.: Practical estimates of rock mass strength. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr. 27 (3), 227– 229 (1997).
- [14] Bieniawski, Z.T.: Engineering Rock Mass Classifications. Wiley, New York. pp 251 (1989).
- [15] Grimstad, E., Barton, N.: Updating the Q-system for NMT. Proc. Int. Symp. on Sprayed Concrete, Fagernes, Norway, Norwegian Concrete Association, Oslo, p 20 (1993).
- [16] Hoek, E., Marinos, P., Benissi, M.: Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses: the case of the Athens

- schist formation. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 57, 151-160 (1998).
- [17] Sonmez, H., Ulusay, R.: Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36 (6), 219–233 (1999).
- [18] Sonmez, H., Ulusay, R.: A discussion on the Hoek –Brown failure criterion and suggested modifications to the criterion verified by slope stability case studies. *Yerbilimleri* 26, 77–99 (2002).
- [19] Goel, R.K., Jethwa, J.L., Paithankar, A.G.: Indian experiences with Q and RMR systems. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 10 (1), 97– 109 (1995).
- [20] Hoek, E., Kaiser, P.K., Bawden, W.F.: Support of underground excavations in hard rock. Balkema, Rotterdam, Brookfield, p 213 (1995).
- [21] Barton, N.: Some new Q-value correlations to assist in site characterization and tunnel design. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 39 (1), 185– 216 (2002).
- [22] Singh, B., Viladkar, M.N., Samadhiya, N.K., Mehrota, V.K.: Rock mass strength parameters mobilized in tunnels. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 12 (1), 47–54 (1997).
- [23] Palmstrom, A.: Recent developments in rock support estimates by the RMI. *J. Rock Mech. Tunn. Technol.* 6 (1), 1–19 (2000).
- [24] Palmstrom, A.: Characterizing rock masses by the RMI for use in practical rock engineering: Part 1: The development of the Rock Mass Index (RMI). *Tunn. Undergr. Space Technol.* 11 (2), 175-188 (1996).
- [25] Ramamurthy, T.: Stability of rock mass. *Indian Geotechnical Journal*, 1–74 (1986).
- [26] Goel, R.K.: Correlations for predicting support pressures and closures in tunnels. PhD Thesis, Nagpur University, Nagpur, India, p 308 (1994).
- [27] Kalamaris, G.S., Bieniawski, Z.T.: A rock mass strength concept for coal incorporating the effect of time. *Proceedings of the Eighth International Congress on Rock Mechanics*, vol. 1. Balkema, Rotterdam, 295–302 (1995).
- [28] Bhasin, R., Grimstad, E.: The use of stress–strength relationships in the assessment of tunnel stability. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 11 (1), 93–98 (1996).
- [29] Aydan, O., Ulusay, R. and Kawamoto, T.: Assessment of rock mass strength for underground excavations. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 34 (3/4), 777-786 (1997).
- [30] Sheorey, P.R.: *Empirical Rock Failure Criteria*. Balkema, Rotterdam (1997).
- [31] Trueman, R.: An evaluation of strata support techniques in dual life gateroads. PhD Thesis, University of Wales, Cardiff. In Read, S.A.L., Richards, L.R., and Perrin, N.D., 1999. Applicability of the Hoek–Brown failure criterion to New Zealand greywacke rocks. *Proceeding 9th International Society for Rock Mechanics Congress*, Paris, 2, 655–660 (1998).

- [32] Aydan, O., Dalgic, S.: Prediction of deformation behavior of 3 lanes Bolu tunnels through squeezing rocks of North Anatolian Fault Zone (NAFZ). Proceedings of the Regional Symposium on Sedimentary Rock Engineering, Taipei, 228–233 (1998).
- [33] Barton, N.: TBM Tunnelling in Jointed and Faulted Rock. Rotterdam, Balkema, pp 169 (2000).
- [34] Bieniawski, Z.T.: Determining rock mass deformability: experience from case histories. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech Abstr.* 15, 237–247 (1978).
- [35] Serafim, J.L., Pereira, J.P.: Considerations of the geomechanics classification of Bieniawski. Proceedings International Symposium Engineering Geology and Underground Construction, vol. 1. Balkema, Rotterdam, 1133–1142 (1983).
- [36] Nicholson, G.A., Bieniawski, Z.T.: A non-linear deformation modulus based on rock mass classification. *Int. J. Mining and Geological Engineering* 8, 181–202 (1990).
- [37] Verman, M.K.: Rock mass-tunnel support interaction analysis, PhD Thesis, University of Roorkee, Roorkee, India (1993).
- [38] Mitri, H.S., Edrissi, R., Henning, J.: Finite element modeling of cable-bolted slopes in hard rock underground mines. SME Annual Meeting 14–17 February, New Mexico. SME, Albuquerque, 94–116 (1994).
- [39] Hoek, E., Brown, E.T.: Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 34 (8), 1165–1186 (1998).
- [40] Read, S.A.L., Richards, L.R., Perrin, N.D.: Applicability of the Hoek–Brown failure criterion to New Zealand greywacke rocks. Proceeding 9th International Society for Rock Mechanics Congress, Paris, vol. 2, 655–660 (1999).
- [41] Hoek, E., Diederichs, M.S.: Empirical estimation of rock mass modulus. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 43 (2), 203–215 (2006).
- [42] Unal, E.: Design Guidelines and Roof Control Standards for Coal Mine Roofs. Ph.D. Thesis, Pennsylvania State University (Reference Bieniawski, Z.T., 1984, *Rock Mechanics in Mining and Tunnelling*, p. 113, Rotterdam: A. A. Balkema (1983).
- [43] Fenner, R.: Untersuchungen zur Erkenntnis des Gebirgsdruckes. *Gluckauf*, 74, 681–695 and 705–715 (1938).
- [44] Carranza-Torres, C., Fairhurst, C.: The elasto-plastic response of underground excavations in rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 36, 777–809 (1999).
- [45] Carranza-Torres, C., Fairhurst, C.: Application of the convergence–confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek–Brown failure criterion. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 15 (2), 187–213 (2000).
- [46] Basarir, H., Ozsan, A., Karakus, M.: Analysis of support requirements for a shallow diversion tunnel at Guledar dam site, Turkey. *Eng. Geol.* 81, 131–145 (2005).
- [47] Basarir, H.: Engineering geological studies and tunnel support design at Sulakyurt dam site, Turkey. *Eng. Geol.* 86, 225–237 (2006).

- [48] Hoek, E., Marinos, P.: Predicting tunnel squeezing. Tunnels and Tunnelling International. Part 1 -November 2000, Part 2 December 2000 (2000).
- [49] Çubuk, M.K., Öztürk, E.A., Hatipoğlu, S., Sinoplu, M.Z.: Türkiye'deki Karayolu Tünellerinde Trafik Güvenliği. İMO Teknik Dergi 3, 4471-4486 (2008).

Toplu Ulaşımında Bekleme Süresini Etkileyen Faktörlerin İncelenmesi: Güvenilirlik, Yolcu Bilgilendirme Sistemi ve Fiziksel Koşullar

Gizem DOĞAN¹
Mustafa ÖZUYSAL²

ÖZ

Toplu ulaşımında bekleme süresi, yolcuların algıladığı hizmet seviyesinin en önemli boyutlarından biridir. Özellikle trafik koşullarının etkisi altında işletilen kent içi otobüs taşımacılığında aşırı bekleme süresi, yolcuların tür ve güzergâh seçimini değiştirebilecek bir fayda fonksiyonu bileşenine dönüşebilmektedir. Bu çalışmada, kent içi otobüs taşımacılığında karşılaşılan bekleme süresi, hat ve durağa ait fiziksel koşulların yanı sıra, güvenilirlik ve yolcu bilgilendirme sistemlerinin etkisi de dikkate alınarak modellenmiştir. Oluşturulan doğrusal modeller sonucunda bilgilendirme sistemi varlığının bekleme süresini ortalama 2 dakika, güvenilirliğin ise ortalama 1,3 dakika kısaltıcı etkisi olduğu görülmüştür. Ayrıca yolcu bilgilendirme sistemlerinin, kent merkezinden gelen hatlar tarafından kullanılan ve geometrisine uygun kullanılan duraklarda uygulanmasının daha verimli olacağı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Toplu ulaşım, güvenilirlik, yolcu bilgilendirme sistemi.

ABSTRACT

Investigation of the Factors Effecting Waiting Time in Public Transportation: Reliability, Passenger Information System and Physical Conditions

Waiting time in public transportation is one of the most important dimensions of the level of service perceived by the passengers. Excessive waiting times may turn into a utility function component that change the mode and route choices of passengers, especially for the urban bus transportation operated under the effect of traffic conditions. In this study, the waiting times in urban bus systems are predicted by using the effects of reliability and passenger information systems, together with the physical conditions of bus routes and stops. As the result of the constituted linear multiple regression models, it is found that the existence of passenger information system and reliability have reducing effect on waiting

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 20.07.2015 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2017 gününe kadar tartışmaya açıktır.
- DOI: 10.18400/tekderg.307513

1 Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir - gizzemdogan@gmail.com

2 Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - mustafa.ozuysal@deu.edu.tr

time by 2 and 1.3 minutes, respectively. Besides, it is concluded that the passenger information systems are more efficient if they are implemented for the stops conveniently used according to their geometry and the ones used by the lines coming from the city center.

Keywords: Public transportation, reliability, passenger information system.

1. GİRİŞ

Toplu ulaşımında bekleme, yolculuk deneyiminin önemli bir bileşenidir. Tipik bir yolculuk için, yolculuk süresinin %10-30'u beklemeyle harcanmaktadır [1]. Özellikle fayda fonksiyonu tabanlı modelleme çalışmalarında toplam yolculuk süresi genellikle araç içi ve araç dışı süre (yürüme süresi/erişim süresi ve bekleme süresi) olarak ayrılmaktadır. Araç dışında geçen sürenin önemli bir bölümü olan bekleme süresi, araç içinde geçen zamandan daha etkili bir unsur olarak değerlendirilmekte ve genellikle ulaşım tür seçimini etkileyen en önemli faktörlerden biri olarak gösterilmektedir. Öyle ki durağa erişim süresinin azaltılması, kentiçi otobüs sistemi tasarımında başlı başına bir amaç fonksiyonu olarak değerlendirilebilmektedir [2].

Her ne kadar bekleme süresinden yapılan tasarrufların ekonomik olarak büyük bir öneminin olmadığı bulgularına ulaşılmışsa da psikolojik nitelikteki diğer bileşenlerinin varlığı, toplu ulaşım kullanıcı memnuniyeti bakımından göz ardı edilmemesi gereken bir unsurdur [3]. Kullanıcıların bekleme süresine ilişkin algıları ve tutumları, hizmet endüstrisi için büyük önem taşımakta, hizmet kalitesinin değerlendirilmesi ve kullanıcı memnuniyetinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmektedir [4].

Katz vd. tarafından belirtildiği gibi, temel olarak bekleme sürecini yönetmeyi sağlamak için mevcut iki yol vardır [5]. Birincisi, işletme yönetim teknikleri ile beklemenin gerçek uzunluğunu düşürmektir (örneğin, otobüs sıklığını arttırmak). İkinci bir yöntem olarak, psikolojik bazı etkiler yardımıyla algılanan bekleme süresinin düşürülebileceği ve bu durumun bekleme süresinin azaltılması kadar etkili olabileceği ileri sürülmektedir.

Daha önce yapılan çalışmalarda bekleme deneyiminin sonuçları üç aşama ile tanımlanmıştır. İlk aşama algılanan bekleme süresidir: "beklemeyle meşgul olan kişinin zaman uzunluğu algısı" olarak tanımlanmıştır [4], [6]. İkinci aşama beklemeye karşı olan duygusal tepkilerdir. Stres, endişe, kızgınlık, hayal kırıklığı ve bıkkınlık, hizmet bekleme kapsamında sıkça bahsedilen duygusal kavramlardır. Üçüncü aşama ise sağlanan hizmet kalitesinin kullanıcılar tarafından değerlendirilmesi, dolayısıyla kullanıcıların genel memnuniyetidir. Bu hizmet değerlendirmesi, genellikle hizmet beklemenin açıklayıcı değişkeni olarak belirlenmiştir. Bu üç aşama, birbiriyle ilişkili iki kavram tarafından şekillendirilmektedir: gerçek bekleme süresi ve algılanan bekleme süresi. Gerçek bekleme süresi, bekleme harcanan objektif bireysel zaman olup saat veya kronometre ile ölçülürken; algılanan bekleme süresi, bekleme kişiler için bireysel algılamalarına göre olan öznel süre olup, anket yardımıyla elde edilebilen ve hava koşulu, emniyet vb. birçok koşula duyarlı olabilen bir ölçüttür [4]. Bugüne kadar bu iki bileşene ilişkin az sayıda deneysel çalışma yapılmıştır. Örneğin, Hui ve Tse [7], süre bilgisi sağlamanın sadece uzun bekleme sürelerinde (15 dakikadan fazla) algılanan bekleme süresini etkilediğini bulmuştur. Katz vd. [5], bekleme süresi bilgisini sağlamanın algılanan bekleme süresini azalttığını fakat

stres aşamalarını ve kullanıcıların memnuniyetini etkilemediğini bulmuşlardır. Bir diğer çalışmada, bekleme süresi bilgisini sağlamanın algılanan bekleme süresi uzunluğuna bir etkisinin olmadığı kanısına varılmış; bekleme süresi bilgisi nedeniyle hizmete karşı daha olumlu yaklaşım, bekleme üzerinde artan kontrol duygusuna ve bekleme seviyesinin yüksek olarak tahmin edilmesine bağlanmıştır [8].

Toplu ulaşımda bekleme süresine ilişkin alışıl gelmiş yaklaşım, tahmin edilen bekleme süresinin ulaşım taşıtları arasındaki sürenin (sefer aralığı) yarısı kadar olduğudur [9]. Bu yaklaşım aşağıdaki varsayımlara dayanmaktadır:

- Yolcuların durağa gelişi güzel varmaları
- Yolcuların gelen ilk araçlara binmeleri
- Servisin güvenilir olması

Hizmet güvenilirliğinin bir sorun olduğu zamanlarda ortalama bekleme süresinin tahmin edilenden daha uzun olduğu bulunmuştur. Ayrıca deneysel sonuçlar göstermiştir ki bu varsayım, sefer aralığının küçük olduğu durumlarda geçerlidir [10]. Aralık daha uzun yani ulaşım hizmeti daha seyrek olduğu zaman, bazı yolcuların duraklarda bekleme sürelerini azaltmak için zaman çizelgelerine göre kendi varışlarını planlamaları beklenebilmektedir. Dolayısıyla sefer aralığı arttıkça yolcu varışları daha az rastlantısal olmaktadır. Fonzone vd. [11] durağa varış zamanlarının rastlantısal olmayışının, otobüs kümelenmelerine de sebep olabileceğini göstermiştir. Bu kümelenmelerin uyarlanabilir kontrol sistemleri yardımıyla engellenmesine yönelik çalışmalarda da sefer aralığı güvenilirliği vurgulanmaktadır [12].

Toplu taşımadaki gerçek ve algılanan bekleme süreleri arasındaki ilişkiyi inceleyen az sayıdaki çalışmadan biri olan Moreu [13], yolcuların ortalama bekleme süresini %14 oranında olduğundan büyük tahmin ettiklerini bulmuştur. Çalışmada, kısa süre bekleyen yolcuların bekleme süresi tahminlerinin, uzun süre bekleyenlere kıyasla daha yüksek olduğu bulunmuştur.

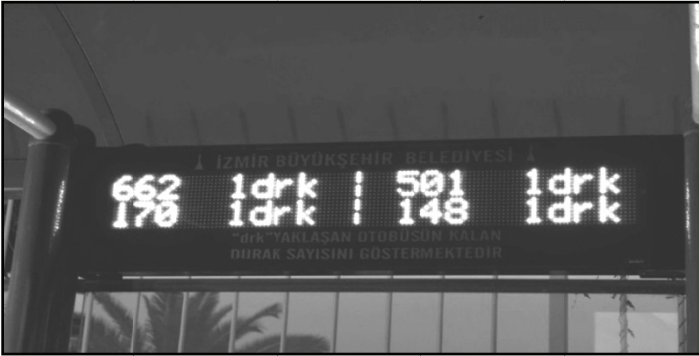
Özetle, toplu ulaşım hizmet seviyesinin önemli bir bileşeni olan bekleme süresinin; taşıtların planlanan zamanda ulaşma durumunu ifade eden güvenilirlikten, yolcuların bekleme süresi algısını değiştirebilecek bir faktör olan yolcu bilgilendirme sistemlerinden ve kullanılan hat ve durağın fiziksel koşullarından etkilenebileceği anlaşılmaktadır. Bekleme süresinin bu faktörlerden ne düzeyde etkilendiğinin incelenmesi, toplu ulaşım hizmet seviyesinin yükseltilmesi açısından önemli bulgular sunacaktır. Çalışmanın iki temel amacından biri, yapımı ve işletimi belirli bir maliyet unsuru olan GPS tabanlı yolcu bilgilendirme sistemlerinin, bekleme süresi üzerinde etkisi olup olmadığını, etkisi varsa hangi ortak özelliklere sahip ulaşım sistemi elemanlarından etkili olduğunu incelemektir. Diğer bir amacı ise güvenilirliğin bekleme süresi üzerindeki etkisini ortaya koymaktır. Bu amaçla, güvenilirliğin daha değişken ve kritik olduğu kentiçi otobüs taşımacılığı üzerinde durulmuş, İzmir kent merkezi ve merkezin kuzeyini içeren bir analiz bölgesinde toplam 13 otobüs durağına ilişkin analiz ve gözlemler gerçekleştirilmiştir. Takip eden bölümlerde öncelikle, yolcu bilgilendirme sistemleri ve güvenilirlik hakkındaki çalışmalardan örnekler verilmiştir. Daha sonra, seçilen analiz bölgesi ve duraklara ilişkin durak gözlemleri ve güvenilirlik ölçütü hesaplamalarına ilişkin çalışmalar aktarılmıştır. Son bölümde ise gözlem ve hesaplamalardan elde edilen veriler kullanılarak, bekleme süresinin bağımlı değişken olarak ele alındığı çoklu doğrusal regresyon modelleri sunulmuş ve sonuçlar irdelenmiştir.

2. YOLCU BİLGİLENDİRME SİSTEMLERİ

Dünya genelinde büyük şehirlerde, ulaşımda toplu taşımanın payı genellikle durağan veya azalma eğilimindeyken, trafik hacimleri sürekli olarak her yıl artmaktadır. Yolcuları kendi arabalarının sürüş rahatlığından vazgeçirmek zor bir iştir ve bunu yapmak adına, öncelikle yolcu davranışı üzerine odaklanarak, yolculuk öncesi yolculara zamanında ve doğru bilgi verilmeye çalışılmaktadır. Bu bilgiler yolcuların ulaşım türleri, güzergâhlar ve kalkış süreleri hakkında bilinçli karar vermelerine olanak sağlayacaktır [14].

Yolcu bilgilendirme sistemleri, kullanıcıların karayolu, ulaşım ağı ve yolculukları için önemli olan bilgileri almalarını sağlamak amacıyla birçok teknolojiyi kullanmaktadır. Bu bilgiler yolcuların kendileri için en uygun ulaşım türünü (otomobil, tren, otobüs), güzergâhı ve varış zamanını seçmelerine yardımcı olmaktadır. Ulaşım çizelgesi ve durum bilgisi ulaşım yönetim sistemlerinden elde edilebilmektedir. Karayolu tabanlı çoğu bilgi, gözetim cihazları aracılığıyla toplanmakta (araç dedektörleri, kameralar, otomatik araç konumu belirleme sistemleri) ve yolcu bilgi sistemlerine iletilmek için ulaşım yönetim merkezlerinde bulunan bilgisayarlar tarafından işlenmektedir [15].

Otomatik araç konumu belirleme sistemleri ile bağlantılı olan yolcu bilgilendirme sistemleri; varış zamanları, kalkış zamanları ve gecikmeler gibi gerçek zamanlı bilgiyi sağlamaya başlamıştır [16]. Bu tür sistemlerin performansı, otobüs gecikme modelleri verisini destekleyecek şekilde kullanıldığı zaman geliştirilebilmektedir [17]. Yolcular bu bilgilere telefonlar, monitörler, kablolu televizyon, çeşitli mesaj işaretleri, bilgi noktaları ve kişisel bilgisayarları içeren çeşitli medya araçları aracılığıyla erişebilmektedir [14, 16]. Bu çalışmada daha çok, durakta beklemekte olan yolculara sabit monitörler yardımıyla, yaklaşımakta olan hattın kaç durak uzaklıkta olduğunu bildiren gerçek zamanlı yolcu bilgilendirme sistemleri (GZYBS) üzerinde durulacaktır (Şekil 1).



Şekil 1. Gerçek zamanlı yolcu bilgilendirme sistemi (GZYBS) durak monitörü örneği

GZYBS toplu taşıma için günden güne daha yaygın hale gelmektedir. Gerçek zaman bilgisi ve durak görselleri gibi bilgilendirme teknolojisi tabanlı uygulamalara önemli miktarda bütçe harcanmaktadır. Çoğu proje bu tür bilgilerin kullanıcılar tarafından beğenildiğini göstermektedir [18, 19], fakat bu sistemlerin mevcut ve potansiyel kullanıcıların davranışlarına etkileri hakkındaki çalışmalar oldukça azdır [20].

Duraklarda bulunan GZYBS görsellerinin etkilerinin daha çok psikolojik yapıda olduğu kabul edilmektedir [20]. Duraklarda ve istasyonlarda bulunan bir sonraki tren veya otobüsün varış zamanını gösteren sistem görselleri endişeyi büyük ölçüde azaltmaktadır. Sadece bu tür sistemlerin varlığı bütün toplu taşıma sistemleri için güven oluşturmakta ve sistem imajını iyileştirebilmektedir. Duraklarda algılanan güvenilirliğin kullanılan yeni görseller sayesinde olumlu olarak etkilendiği kabul edilmekte [21] ve hizmet daha güvenilir olarak algılanmaktadır. Böylece algılanan hizmet seviyesi artmaktadır [22].

Gerçek zamanlı yolcu bilgilendirme sistemleri (GZYBS) hakkında literatürde mevcut olan bilgiler ve yapılan çoğu çalışmadan elde edilen sonuçlar, bu tür sistemlerin yolcular üzerinde önemli bir etkisi olduğu tezini desteklemektedir [23, 24, 25, 26]. Yolcuların yaklaşımlarını ve algılarını araştıran çalışmalar göstermektedir ki “bir sonraki otobüsün varış zamanı” ve “gecikmenin ne kadar uzun olduğu” soruları hakkında olan bilgiler yolcular tarafından büyük ölçüde önemsenmektedir [18, 20, 27]. Bunlara ek olarak, yapılan bir çalışmada GZYBS'nin yol seçimine etkisinin nasıl olacağı araştırılmış ve bu tür sistemlerin ne yolculuk süresi ne de yolculuk süresi değişikliği için geliştirilmediği ve genellikle yolcuların elde ettikleri bilgiler neticesinde seyahat şekillerini değiştirmeye gönüllü olmadıkları sonucu elde edilmiştir [28].

Wardman vd. [3], yapmış oldukları çalışmada transfer (aktarma) noktalarında sağlanan bilgilerin özellikle sık yolculuk yapmayan yolcular için önemli olduğunu gözlemlemişlerdir. Yapılmış olan çeşitli çalışmalardan da, duraklarda bulunan GZYBS görsellerinin bir diğer etkisinin algılanan bekleme süresini azaltmak olduğu sonucu bulunmuştur [20, 29]. Yolcuların, bekleme sürelerini, bilgi olmaması durumunda, %9-13 ile %24-30 oranında daha fazla algıladıkları görülmüştür. Diğer bir çalışmada ise duraklarda bulunan GZYBS'nin genellikle yolcuların bekleme süresi beklentilerini olumlu bir şekilde etkilediği sonucuna varılmıştır [30]. Schweiger ise bu tür sistemlerin algılanan bekleme süresini %26 oranında düşürdüğünü göstermiştir [29]. Literatürdeki tartışmalar, bu tür sistemlerin algılanan ve ölçülen faydalarının, araştırmanın yapıldığı yere göre değiştiğini göstermektedir. Bu çalışmada, GZYBS'nin gözlem yapılan duraktaki varlığı bir kukla değişken ile model yapısına açıklayıcı değişken olarak ilave edilmiş, bekleme süresi üzerindeki gözlemlenen etkisi incelenmiştir.

3. GÜVENİLİRLİK

Güvenilirlik, toplu ulaşım sisteminin işletme karakteristikleriyle ilişkili olan servis kalitesi ölçme yöntemidir [31]. Yolcuların bekleme süreleri, servis sıklığından çok, sefer tarifesinin güvenilirliğinden etkilenmektedir.

Abkowitz vd. [32], güvenilirliği toplu ulaşım işletmecilerinin ve yolcuların karar verme süreçlerini etkileyen servis özelliklerindeki süreklilik olarak tanımlamıştır. Güvenilirlikle ilgili yapılan çalışmalarda temel olarak toplam seyahat süresinin ve temel bileşenlerinin tahmin edilmesi konusu incelenmektedir. Özellikle seyahat süresindeki değişiklik yolcuları iki farklı şekilde etkilemektedir:

- Güvenilir olmayan servislerin toplam seyahat süresi ve bekleme süresinin tahmin edilememesi,
- Güvenilir olmayan servislerin, yolcuların faydasızlığı minimize edilmesini amaçlayan en uygun seyahat seçeneği kararını vermesini engellemesi.

Güvenilirlik, toplu ulaşım sisteminin, bir çizelgelemeye ya da daha önceden belirlenmiş sefer aralıklarına ve sabit bir seyahat süresine bağlı kalma kabiliyeti olarak da tanımlanabilir. Başka bir deyişle sistemin dakiklik ve düzenlilik performansı olarak açıklanabilir [33].

Toplu ulaşım sistemlerinde güvenilirlik, yolcular ve işletmeciler açısından çok önemli bir yere sahiptir. Güvenilirliğin göz ardı edilmesi yolcular için bekleme sürelerinin artmasına, düzensiz araç sıklıkları nedeniyle konforsuzluğa neden olmaktadır. İşletmeciler açısından ise ölü mesafe ve işletme maliyet artmasına ve filodan yararlanma oranının azalmasına yol açmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmalar güvenilirliğin yolcuların tür ve güzergâh seçimlerini etkilediğini de göstermektedir [34, 35].

Otobüs sistemleri, metro ve hafif raylı sistemlerle karşılaştırıldığında trafik tıkanıklarından, hava durumundan, yolcu yükü değişimlerinden ve işletme personelinin davranışlarından daha fazla etkilenmektedir. Genel olarak güvenilirliği etkileyen faktörler aşağıdaki gibi gruplandırılabilir.

a) Trafik Karakteristikleri: Trafikteki araçların kompozisyonu, şerit sayısı, trafik talebinin gün içindeki değişimi ve mevcut trafiğin doygunluk oranı, diğer araç trafiği ile karışık işletme sistemi, sinyalizasyondan kaynaklı gecikmeler, kazalar, diğer araçların park manevraları güvenilirliği etkilemektedir [31, 36].

b) Hat (Rota) Karakteristikleri: Hattın uzunluğu, sefer aralıkları, sefer süreleri, otobüs duraklarının konumu (otobüsler için ayrılmış ceplerin bulunup bulunmaması), hattın bazı bölümlerinde ya da tamamında otobüse şerit tahsisi uygulamaları ya da kavşaklarda otobüs öncelikli sistemlerin bulunması, kaldırım kenarı parklanmaları ve kaplama koşulları güvenilirliği etkilemektedir [31].

c) Yolcu karakteristikleri: Duraklardaki yolcu yoğunlukları, yolcu hacimlerindeki değişim, yolcuların rota seçimleri ve yolcu gelişlerinin dağılımları da güvenilirliği etkilemektedir. Turnquist ve Bowman [34], yolcu talebiyle kesim seyahat süresinin değişiminin içsel bağımlı olduğunu ve servis sıklığının kuyruklanmaya sebep olabileceğini söylemiştir.

Toplu ulaşım servislerinin güvenilirliği durağa bağlı olarak ve hatta bağlı olarak iki ayrı grupta incelenebilir. Alt tabanlı ölçümler (örneğin durak bazında incelemeler) üst tabanlı ölçümlere (hat ve yol şebekesi bazında incelemeler) dönüştürülebilmektedir [37]. Hat bazlı güvenilirlik, bir otobüs işletmesinin güvenilirlik performansını hat seviyesinde dikkate almaktadır ve belirlenen özel bir hat için ya da tüm sistem için ölçümler de yapılabilmektedir. Durak bazlı güvenilirlikte ise bir otobüs işletmesinin güvenilirlik performansı seçilen duraklar için değerlendirilmektedir. Güvenilirlik ölçümleri literatürde çeşitli hat karakteristikleri kullanılarak yapılmaktadır (Örneğin sefer süreleri [38], kalkış saatlerine bağlılık [39], duraktaki yolcuların bekleme süreleri [34], uygun olmayan kapasite nedeniyle sonraki otobüsü bekleyen yolcu oranı [39] v.b.). Bu ölçütleri yolculuk süresine, sefer aralığına, son durağa varış zamanına, yolcu bekleme süresine ve O-D çiftleri arasındaki seyahat süresine bağlı ölçütler olarak sınıflandırmak mümkündür. Strathman vd., uygulama amacına göre seçilecek güvenilirlik ölçütünün, aşağıda belirtilen çeşitli işletme ve yönetim hedeflerini sağlaması gerektiğini belirtmektedir [40]:

- Ölçütler yeterince açık ve değerlendirmesi kolay olmalıdır.

- Ölçütler hatların kendi içinde ve hatlar arasında doğrudan bir karşılaştırma yapılmasına izin vermelidir (Örneğin bir hatta hizmet veren araçların sefer sürelerinin gün içindeki değişimi ya da düşük ve yüksek sefer sıklığı ile hizmet veren hatlardaki sefer süresi değişimlerinin karşılaştırılması vb.).
- Güvenilirlik ölçütleri kendi içlerinde karşılaştırılabilir olmalıdır (Örneğin sefer aralığındaki düzenlilik ile sefer süresindeki değişimin karşılaştırılabilirliği v.b.).
- Ölçütler karşılaştırma kısıtına göre, mümkün olan yeterli bilgiyi sağlayabilmelidir. (Örneğin sefer aralıklarındaki düzenliliğin çeşitli sınıflara ayrılıp seferlerin düzenli ya da düzensiz olarak tanımlanması)

Bu prensipler değerlendirildiğinde, anlaşılması ve yorumlanması en kolay ölçütlerin, yolculuk süresine dayalı ölçütler olduğu kanısına varılmış ve çalışmada, yolculuk süresine dayalı durak bazında güvenilirlik ölçütleri ele alınmıştır.

4. ANALİZ ÇALIŞMALARI

4.1. Veri ve Analiz Bölgesi

Çalışmaya ilişkin analiz bölgesi, İzmir kent merkezini kapsayacak biçimde, kent yerleşim alanının kuzey bölümünü içermekte, bölge içerisinde Çiğli, Karşıyaka, Bayraklı ve Konak ilçelerine dâhil olan 74 mahalle yer almaktadır. Analiz bölgesinde organize sanayi bölgesi, çeşitli yoğunluklarda konut alanları, merkezi çalışma alanları ve ticaret tesisleri gibi farklı arazi kullanım dokuları bulunmaktadır (Şekil 2).



Şekil 2. Analiz bölgesi sınırları

Analiz bölgesi içinde yer alan Anadolu Caddesi, Altınyol, Cemal Gürsel Caddesi gibi önemli arterler bölgenin kent ile bağlantısını sağlamaktadır. Bölgedeki toplu ulaşım, yoğunlukla kentiçi otobüs hatlarına dayalı olmakla birlikte, İzmir Banliyö raylı sistemi ve vapur türlerinden de destek almaktadır. Analiz bölgesi sınırları içerisinde toplam 60 adet otobüs hattı bulunmakta, bunlardan 45'i analiz bölgesi sınırları içerisinde başlayıp yine analiz bölgesi sınırları içerisinde sonlanmaktadır. Bu hatların bir kısmı kent merkezine bağlantı sağlarken, bir kısmı analiz bölgesi içerisindeki yerleşimlerin farklı ulaşım türlerine (vapur ve banliyö) bağlantısını sağlamaktadır.

Güvenilirlik analizinde, otobüslerin duraklara varış süresi varyasyonlarını elde etmekte kullanılan akıllı kart veri seti, veriyi temin eden ESHOT Genel Müdürlüğü tarafından "durak yoğunluk verisi" olarak adlandırılmaktadır. ID ve plaka ile tanımlanan her bir otobüsün ait olduğu güzergâhtaki her bir durağa ulaştığı zaman, hareket yönü (gidiş veya dönüş), ulaştığı durağın bu yöne göre sıra numarası, durağa varış ve ayrılış zamanı, dakika cinsinden durakta geçirdiği süre ve varsa o durakta binen yolcu sayısı verilerini içermektedir. Durak yoğunluk veri seti, hafta içi her bir gün yaklaşık 650.000 satırlık durak detayı içermektedir. Her bir güne ait veri yaklaşık 85 MB'lık dijital boyuta sahiptir. Şekil 3'te veri tablosunun örnek birkaç satırı verilmiştir.

HAT_KODU	BUS_ID	PLAKA	STOP_ID	DURAK_ADI	YON	SIRA	VARIS_ZAMANI	AYRILIS_ZAMANI	ZAMAN	YOLCU_SAYISI
00888	28243	FU423	10001	Bahribaba	Gidis	1	01.11.2012 03:47:00	01.11.2012 03:47:00	0	
00200	26499	DA7287	10634	Cumhuriyet Lisesi	Donus	18	01.11.2012 03:50:08	01.11.2012 03:50:16	0.13	
00200	26499	DA7287	10636	Söğüt	Donus	17	01.11.2012 03:50:44	01.11.2012 03:50:50	0.1	
00200	26499	DA7287	10638	Kızılölk	Donus	16	01.11.2012 03:50:55	01.11.2012 03:51:03	0.13	
00200	26499	DA7287	10640	Paşa Köprüsü	Donus	15	01.11.2012 03:51:25	01.11.2012 03:51:38	0.22	
00200	26499	DA7287	10642	Karabağlar	Donus	14	01.11.2012 03:51:51	01.11.2012 03:52:01	0.17	
00200	26499	DA7287	10652	Sinem	Donus	13	01.11.2012 03:52:37	01.11.2012 03:52:47	0.17	
00200	26499	DA7287	10654	Semt Garajı	Donus	12	01.11.2012 03:52:59	01.11.2012 03:53:07	0.13	
00200	26499	DA7287	10660	Serbest Bölge 2	Donus	10	01.11.2012 03:55:44	01.11.2012 03:55:53	0.15	
00200	26499	DA7287	10662	Leylak	Donus	9	01.11.2012 03:55:58	01.11.2012 03:56:06	0.13	
00200	26499	DA7287	10664	Ulaştırma	Donus	8	01.11.2012 03:56:28	01.11.2012 03:56:36	0.13	
00200	26499	DA7287	10666	Askeri Lojmanlar	Donus	7	01.11.2012 03:57:08	01.11.2012 03:57:18	0.17	
00200	26499	DA7287	10668	Çağdaş Eğitim	Donus	6	01.11.2012 03:57:30	01.11.2012 03:57:38	0.13	
00200	26499	DA7287	10670	Gazidemir İlçe Emniyet	Donus	5	01.11.2012 03:58:00	01.11.2012 03:58:30	0.5	
00200	26499	DA7287	10674	Emlak Bankası Evleri	Donus	3	01.11.2012 03:59:22	01.11.2012 03:59:29	0.12	
00200	26499	DA7287	10676	Seçkinler Sitesi	Donus	2	01.11.2012 03:59:38	01.11.2012 03:59:46	0.13	
00200	26499	DA7287	13016	Havallımanı Dış Hatlar Geliş	Donus	1	01.11.2012 04:03:22	01.11.2012 04:05:02	1.67	
00200	26499	DA7287	13016	Havallımanı Dış Hatlar Geliş	Donus	1	01.11.2012 04:07:38	01.11.2012 04:08:21	0.72	
00888	30355	BE162	10001	Bahribaba	Donus	1	01.11.2012 04:43:52	01.11.2012 04:43:52	0	
00204	28330	DA7461	30001	Bornova Metro	Gidis	1	01.11.2012 04:34:28	01.11.2012 04:41:18	6.83	14
00204	28330	DA7461	30272	Ege Üniversitesi Hastanesi	Gidis	2	01.11.2012 04:42:05	01.11.2012 04:42:12	0.12	
00204	28330	DA7461	30511	Otogar	Gidis	3	01.11.2012 04:46:31	01.11.2012 04:49:51	3.33	6
31112	26270	93431	40307	Gediz Atölye	Donus	1	01.11.2012 05:13:16	01.11.2012 05:06:45	33.48	
00202	29465	DA7458	10323	Montrö	Gidis	2	01.11.2012 05:03:39	01.11.2012 05:03:53	0.23	
00202	29465	DA7458	10554	Vasof Çınar	Gidis	3	01.11.2012 05:04:12	01.11.2012 05:04:37	0.42	1
00202	29465	DA7458	10106	Dokuz Eylül Rektörlük	Gidis	4	01.11.2012 05:06:11	01.11.2012 05:06:23	0.2	
00202	29465	DA7458	10104	Sosyal Sigortalar Kurumu	Gidis	5	01.11.2012 05:07:18	01.11.2012 05:07:28	0.17	
00202	29465	DA7458	10102	İskele	Gidis	6	01.11.2012 05:08:39	01.11.2012 05:08:48	0.15	
00202	29465	DA7458	10185	Asansör	Gidis	7	01.11.2012 05:10:30	01.11.2012 05:10:57	0.45	1

Şekil 3. Durak yoğunluk verisi örneği

4.2. Güvenilirlik Analizi

Üçüncü bölümde değinilen güvenilirlik ölçütlerinden, anlaşılması ve yorumlanması en kolay ölçüt türünün, yolculuk süresine dayalı güvenilirlik olduğu kanısına varılmıştır. Bununla birlikte, bekleme süresinin durak bazında gözlemlere paralel olarak incelenmesi uygun olacağından, güvenilirliğin de durak bazında analiz edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, analiz bölgesi içinde yer alan gözlem yapılan 13 duraktan geçen analiz bölgesi

hatlarının ilgili durağa ulaşma sürelerinin varyasyonlarına dayalı durak bazında güvenilirlik ölçütleri hesaplanmıştır. Güvenilirlik ölçütü, üç aylık bir zaman periyodu boyunca (hafta sonu ve resmi tatiller hariç toplam 61 gün) duraktan geçen tüm hatlar için hesaplanmıştır. Güvenilirliği hesaplamanın literatürde değinilen en basit yolu, bir hattın ele alınan bir durağa varış sürelerinin ortalamasının standart sapmasına bölümü şeklindedir [32]:

$$RT_i = \mu_{ti} / \sigma_{ti} \quad (1)$$

Burada;

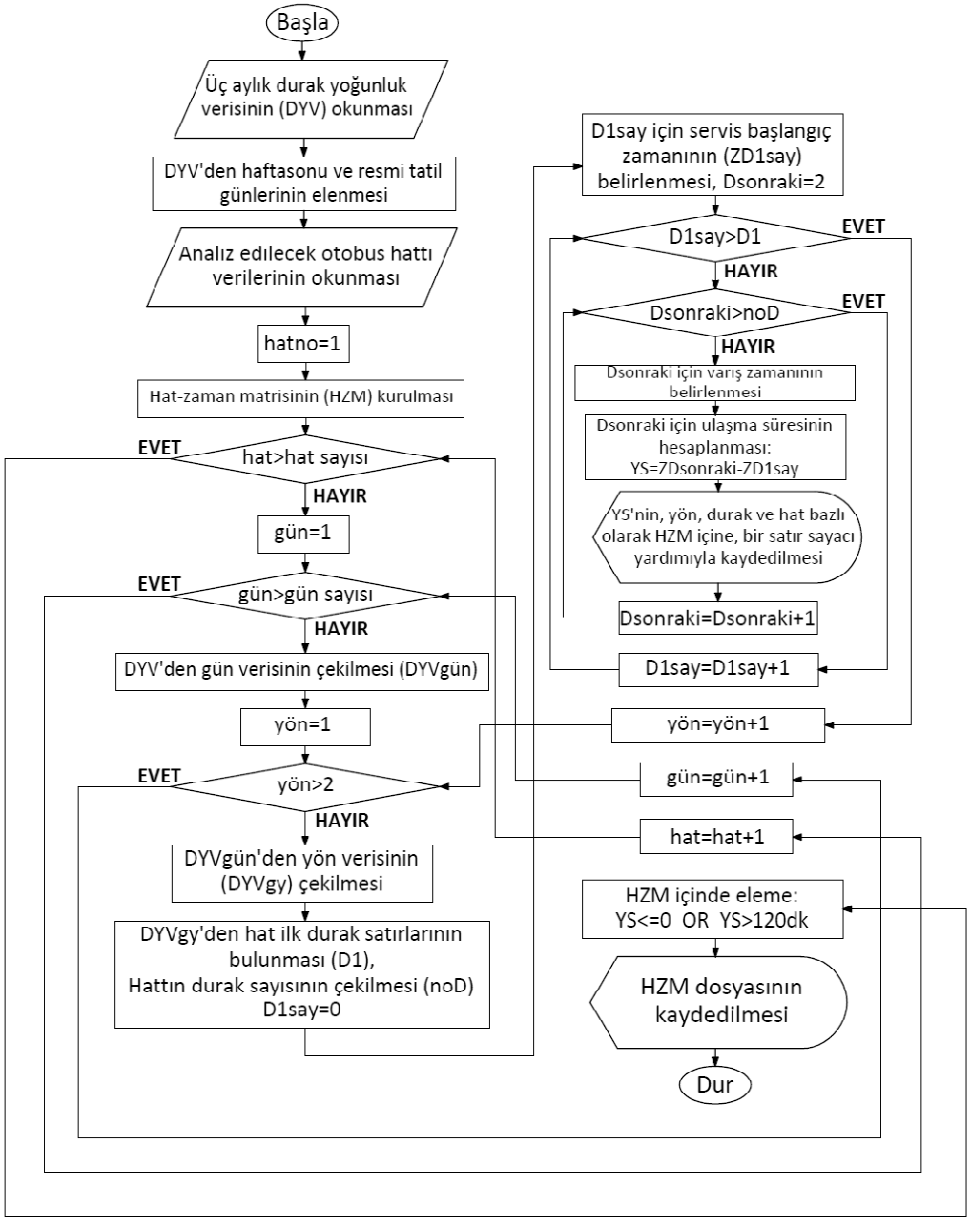
RT_i : Yolculuk süresi esaslı güvenilirlik (Reliability based on Travel Time)

μ_{ti} : i. hatta incelenen otobüslerin yolculuk sürelerinin ortalaması

σ_{ti} : i. hatta incelenen otobüslerin yolculuk sürelerinin standart sapmasıdır.

Basitçe varyasyon katsayısının tersi şeklinde olan ifade, varyasyon ortalamaya göre büyüdükçe daha düşük güvenilirlik hesaplanmasını ifade etmektedir. Durak bazında güvenilirliğin durak yoğunluk verileri kullanılarak hesaplanması için geliştirilen iki aşamalı algoritmaya ait ilk aşamanın akış şeması Şekil 4'te görülmektedir. Şekilde de görüldüğü gibi, durağa varış süresi negatif veya 120 dk'nın üzerinde hesaplanan yolculuk süresi gözlemleri elenerek GPS sistemindeki hataların veya trafik kazası vb. kaynaklı uç durumların, güvenilirliği etkilemesi önlenmeye çalışılmıştır. Bu aşama sonucunda elde edilen istatistiklerin bir hat için örneği Tablo 1'de verilmiştir. Tabloda görüldüğü gibi, 61 gün içerisinde her bir hat için binlerce geçişin ortalaması ve standart sapması elde edilebilmiştir. Duraklardaki GPS sinyallerinin kayıp ve hataları bazı uçdeğer varış sürelerinin elde edilmesine sebep olmaktadır. Ortalama istatistiklerinin minimum ve maksimum değerlerden oldukça uzak olması da uç gözlemlerde sağlıklı veri oluşmadığını göstermektedir. Ancak hemen her hatta 1000'in üzerinde geçiş gözlemlenebildiğinden, uç değerler durağa varışlardaki genel güvenilirliği etkilememektedir.

Her bir hattın tüm duraklarına ait güvenilirlik değerlerinin ortalaması alındığında, analiz bölgesi içinde kalan 60 hat için hat bazlı güvenilirlik değerleri Tablo 2'deki gibi elde edilmektedir. Güvenilirlikteki zirve saat etkisinin de irdelenebilmesi için zirve saatte başlayan (sabah 7:00-8:00, akşam 17:00-18:00) servislere ait varış süreleri, algoritma başlangıç zamanı filtresiyle tekrar çalıştırılarak elde edilmiştir. Tablo incelendiğinde, kentin merkezi iş alanı diyebileceğimiz Gümrük semtinden çıkan hatların genellikle orta ve düşük düzeyde güvenilirliğe sahip olduğu söylenebilir. Bu hatlarda gidiş yönündeki güvenilirlik değerleri, çoğunlukla dönüş yönünden daha düşüktür. Dolayısıyla hattın ilk duraklarda kent merkezinden geçerken kaybettiği zaman ve yüksek varış süresi belirsizliğinin, hattın tamamına yansdığı söylenebilir. Karşıyaka ve Bostanlı İskele gibi kentin ikincil düzeyde merkezlerinde başlayan hatların gidiş ve dönüş yönlerindeki güvenilirlikleri, Gümrük'te başlayan hatlara kıyasla, birbirine daha yakındır. Bu hatların çoğunlukla kent merkezine uğramadan, kentin çeperlerine yakın konutsal yerleşimlere ulaşımı sağlıyor olması bu sonucu doğrulamaktadır.



Şekil 4. Yolculuk süresi güvenilirliği için geliştirilen algoritma, birinci aşama

Tablo 1. Hat boyunca hesaplanan varış süreleri bazında durak güvenilirlik değerlerinden bir örnek (77 no.lu otobüs hattı)

Hat:	77 Gümrük - Nafiz Gürman													
Yön:	GİDİŞ							DÖNÜŞ						
Sıra No	Durak ID:	Duraktan Geçiş Sayısı:	Min. Varış Zamanı(dk):	Maks. Varış Zamanı(dk):	Ort. Varış Zamanı(dk):	Varış Zamanı Std. Sapması:	Güvenilirlik:	Durak ID:	Duraktan Geçiş Sayısı:	Min. Varış Zamanı(dk):	Maks. Varış Zamanı(dk):	Ort. Varış Zamanı(dk):	Varış Zamanı Std. Sapması:	Güvenilirlik:
1	10081	2304	20,00	118,78	48,58	8,77	5,54	10101	2539	1,00	111,15	2,61	3,73	0,70
2	10322	2556	19,47	116,50	47,19	9,96	4,74	10325	2541	2,10	113,12	5,70	5,59	1,02
3	10328	2626	18,83	119,77	45,79	9,75	4,70	10331	2541	3,10	115,25	9,45	7,01	1,35
4	10332	2634	18,35	118,25	44,66	9,60	4,65	10423	2540	4,50	118,42	13,13	7,79	1,68
5	10334	2638	17,53	119,22	43,38	9,54	4,55	10425	2535	5,10	119,35	14,12	7,88	1,79
6	10338	2636	16,68	118,18	41,89	9,30	4,50	10427	2531	5,47	119,72	14,70	8,26	1,78
7	10424	2645	15,73	116,27	39,68	9,05	4,38	10429	2528	5,57	119,83	14,80	8,25	1,79
8	20054	2657	15,25	107,50	29,17	8,06	3,62	20053	2522	13,12	117,65	25,64	8,27	3,10
9	20056	2662	14,50	106,27	28,10	7,90	3,56	20055	2519	14,02	118,95	27,09	8,40	3,23
10	20058	2694	9,92	105,42	26,94	7,83	3,44	20057	2529	14,48	117,82	28,89	8,52	3,39
11	20060	2706	9,07	119,37	24,41	7,72	3,16	20059	2520	16,67	120,00	31,48	8,80	3,58
12	20062	2707	6,77	110,93	21,97	7,17	3,06	20061	2519	17,45	110,95	32,38	8,70	3,72
13	20064	2691	11,25	110,32	21,23	6,96	3,05	20425	2522	18,02	111,57	33,12	8,75	3,78
14	20066	2699	10,78	109,50	20,13	6,74	2,98	20427	2521	18,70	112,70	34,65	8,97	3,86
15	20426	2704	8,40	106,73	16,87	6,59	2,56	20429	2515	19,32	113,62	35,73	9,10	3,93
16	20428	2705	8,05	105,88	16,19	6,46	2,50	20431	2513	19,95	114,13	36,72	9,23	3,98
17	20430	2705	7,35	119,28	15,18	6,72	2,26	20433	2507	20,93	114,82	37,65	9,35	4,03
...

Mavişehir, Çiğli vb. kent merkezine daha uzak aktarma merkezlerinden çıkan hatlarda bu durum daha açık bir şekilde görülmekte, bunun yanı sıra bu hatlarda zirve saat güvenilirliği, tüm gün değerlerine göre yüksek bir farklılık göstermemektedir. İlginçtir ki Gümrük çıkışlı hatlarda da zirve saat – tüm gün farklılığı düşük seviyededir. Dolayısıyla büyük bir kısmı kent merkezinden uzakta kalan hatlarda gün boyu orta düzeyde; çoğu kent merkezinde bulunan hatlarda gün boyu yüksek düzeyde trafik yoğunluğuna maruz kaldığı için, bu hatların güvenilirliğinin zirve saat için ayrıca analiz edilmesinin gerekli olmadığı söylenebilir. Genellikle, Bostanlı ve Karşıyaka iskeleden çıkan hatların zirve saatte gidiş ve dönüş yönlerindeki güvenilirlik farkları açılmakta, dönüş yönündeki güvenilirlik yoğunlukla daha yüksek bulunmaktadır. Bu bölgeler kentin ikincil merkezleri sayılabileceğinden, Gümrük gibi tüm gün değil, günün belirli saatlerinde trafik yoğunluğuna maruz kalmakta, dolayısıyla zirve saat ayrımı en çok bu ikincil merkezlere hizmet eden hatlarda kayda değer bir fark oluşturmaktadır. Çalışmada, söz edilen farklı tipteki hatların tamamının birlikte değerlendirilebilmesi ve bazı duraklarda zirve dışı saatlere kayan gözlemlerin de bekleme süresi tahmin modellerine yansıtılabilmesi için tüm güne ait durak varış sürelerine dayalı güvenilirlik değerleri kullanılmıştır. Böylece, trafik yoğunluğunun sebep olduğu varış zamanı varyasyonlarının tamamı güvenilirlik ölçütüne yansıtılmıştır.

Tablo 2. 60 analiz bölgesi hattına ait güvenilirlik değerleri

Sıra No	Otobüs Hattı	Hat				
		Uzunluğu (km)	Tüm Gün - Gidiş Yönü	Tüm Gün - Dönüş Yönü	Zirve Saat - Zirve Saat - Gidiş Yönü	Zirve Saat - Dönüş Yönü
1	77: GÜMRÜK-NAFİZ GÜRMAN	20.00	2.522	3.350	3.953	2.998
2	78: GÜMRÜK-YAMANLAR	18.00	2.603	2.925	4.480	2.729
3	120: KONAK-ATA SANAYİ	32.50	4.604	4.408	7.348	4.498
4	121: M.ŞEHİR AKT.MRK.-KONAK	23.05	4.717	3.406	5.324	4.193
5	122: M.ŞEHİR AKT.MRK.-GÜMRÜK	19.00	2.631	2.387	4.970	2.795
6	123: ÇİĞLİ AKT.MRK.-ŞİRİNEVLER	6.00	1.717	2.994	3.181	3.413
7	125: GÜMRÜK-ESİN SİTESİ	17.50	2.800	2.586	2.809	2.019
8	126: KARŞIYAKA İSKELE-CUMHURİYET MAH.	8.50	2.655	3.225	3.850	4.938
9	131: GÜMRÜK-CUMHURİYET MAH.	17.50	2.530	2.461	2.828	4.070
10	135: KARŞIYAKA İSKELE-DOĞANÇAY	11.00	2.836	2.467	4.657	2.328
11	136: KARŞIYAKA İSKELE-ÖRNEKKÖY	13.50	3.187	3.348	6.970	4.461
12	137: KARŞIYAKA İSKELE-YAMANLAR	8.00	2.989	2.436	5.377	2.251
13	140: GÜMRÜK-ÖRNEKKÖY	19.00	2.396	2.856	2.611	2.598
14	147: GÜMRÜK-POSTACI	16.50	2.466	2.888	3.710	2.525
15	148: GÜMRÜK-ONUR	19.00	2.501	3.116	3.407	2.784
16	197: KARŞIYAKA İSKELE-NAFİZ GÜRMAN	11.50	2.952	3.385	4.642	3.675
17	198: GÜMRÜK-DOĞANÇAY	20.50	3.517	2.914	5.128	2.433
18	222: M.ŞEHİR AKT.MRK.-KARŞIYAKA	10.00	2.630	3.214	3.440	5.329
19	227: BOSTANLI İSKELE-A.O.S.B	16.60	4.022	3.883	5.528	4.242
20	247: GÜMRÜK-EVKA-6	22.00	3.274	2.661	2.900	3.208
21	258: KARŞIYAKA İSKELE-ONUR	9.50	2.406	2.741	4.488	3.234
22	326: KARŞIYAKA İSKELE- ESİN SİTESİ	11.50	2.612	3.340	3.915	7.907
23	329: GÜMRÜK-GÜZELTEPE	23.50	2.459	3.484	4.168	2.929
24	342: GÜMRÜK-EGEKENT	21.00	2.644	3.488	4.463	2.908
25	344: GÜMRÜK-EVKA-2	17.50	3.031	3.372	4.414	2.990
26	346: GÜMRÜK-EVKA-5	23.50	3.135	3.436	4.333	2.977
27	361: KONAK-BAHRİYE ÜÇÜK	19.40	2.762	3.538	3.885	3.368
28	423: BOSTANLI İSKELE-ŞİRİNEVLER	11.00	3.159	3.896	7.863	4.103
29	429: BOSTANLI İSKELE-GÜZELTEPE	16.00	2.930	2.377	4.405	3.446
30	430: BOSTANLI İSKELE-YAKA KENT	15.00	2.709	3.185	6.291	8.644
31	435: BOSTANLI İSKELE-KÖRFEZ EVLERİ	7.75	2.453	2.833	3.988	2.753
32	442: BOSTANLI İSKELE-ATA TÜRK MAH.	15.00	2.375	3.632	5.662	7.596
33	443: BOSTANLI İSKELE-EGEKENT	15.50	2.366	2.334	2.699	4.262
34	445: BOSTANLI İSKELE-EVKA-2	15.00	2.952	2.867	3.942	4.012
35	446: BOSTANLI İSKELE-EVKA-5	16.50	2.723	2.461	3.755	5.129
36	447: BOSTANLI İSKELE-EVKA-6	14.25	3.572	2.936	4.025	5.602
37	461: BOSTANLI İSKELE-BAHRİYE ÜÇÜK	4.50	2.901	2.516	3.938	1.994
38	477: GÜMRÜK-NAFİZ GÜRMAN	15.00	2.281	2.758	4.026	2.563
39	487: KARŞIYAKA İSKELE-DEMİRKÖPRÜ	5.50	2.417	2.748	3.572	2.293
40	810: EGEKENT AKT.MRK.-ATATÜRK MAH.	6.90	1.650	1.898	1.353	2.214
41	817: ÇİĞLİ AKT.MRK.-A.O.S.B	6.80	2.022	2.834	2.219	2.578
42	822: M.ŞEHİR AKT.MRK.-BOSTANLI İSKELE	7.00	2.321	2.538	3.249	5.753
43	825: M.ŞEHİR AKT.MRK.-EVKA 6	18.00	3.470	4.674	5.277	5.202
44	847: KARŞIYAKA İSKELE-BA YRAKLI EVLERİ	8.50	3.458	3.647	3.450	7.347
45	853: ÇİĞLİ AKT.MRK.-BOSTANLI İSKELE	9.25	3.263	2.500	3.612	3.090
46	128: GÜMRÜK-EGEKENT-2	30.50	3.831	3.930	3.178	6.842
47	130: BORNOVA METRO-BOSTANLI İSKELE	16.00	3.198	2.146	4.872	2.813
48	149: ÇİĞLİ AKT.MRK.-KAKLIÇ	21.50	2.918	4.810	3.285	6.336
49	200: M.ŞEHİR AKT.MRK.-HAVALİMANI	37.00	3.514	3.963	6.799	4.868
50	295: GÜMRÜK-HARMANDALI	29.50	3.045	3.606	5.968	3.344
51	300: F. ALTAY AKT.MRK.-KARŞIYAKA	20.65	3.735	3.959	5.500	4.561
52	330: BOR.METRO-BOSTANLI İSKELE	16.50	3.900	3.887	5.209	3.749
53	428: BOSTANLI İSKELE-EGEKENT-2	23.00	3.304	3.082	3.994	3.689
54	514: TINAZTEPE-BOSTANLI İSKELE	23.50	3.233	3.257	3.377	4.201
55	612: BOSTANLI İSKELE-OTOGAR	19.50	3.349	5.015	4.060	6.415
56	613: BOSTANLI İSKELE-OTOGAR	18.00	3.410	4.514	8.283	4.521
57	751: ÇİĞLİ AKT.MRK.-SASALI	20.00	2.826	3.562	5.189	5.754
58	777: KARŞIYAKA İSKELE-D.YAŞAM PARKI	15.00	2.435	6.012	4.208	5.922
59	820: BOSTANLI İSKELE-HARMANDALI	15.00	2.758	3.188	3.102	8.027
60	827: BOSTANLI İSKELE-ULU.KOOP	16.00	2.990	3.093	3.898	6.626
ORTALAMA:		16.41	2.93	3.25	4.35	4.17
STANDART SAPMA:		6.72	0.59	0.76	1.34	1.69

Tablo 3. Bekleme süresi gözlemlenen 13 durak için ağırlıklı durak güvenilirliği

No	Durak kodu	Durak adı	Duraktan geçen hat sayısı	Gözlemlenen	
				toplam otobüs geçişi (61 iş günü boyunca)	Ağırlıklı durak güvenilirliği
1	20134	Bayraklı Üst Geçit	13	26.030	4,184
2	20057	Turan	26	40.859	3,061
3	20154	Karşıyaka İskele	19	27.149	4,732
4	20069	Serinkuyu Merkez Yönü	13	26.268	3,422
5	20070	Serinkuyu Çiğli Yönü	12	24.693	3,314
6	20059	Nakdöken Merkez Yönü	15	30.829	3,099
7	20062	Nakdöken Serinkuyu Yönü	15	35.233	3,276
8	20148	Kasman	11	8.486	4,728
9	20071	Kayalar Mezarlığı Karşısı	8	18.739	3,456
10	10329	Alsancak Camii Karşısı	15	23.099	1,410
11	10336	Alsancak Camii Önü	10	31.245	4,593
12	30280	PTT Önü	25	12.829	4,198
13	30279	PTT Karşısı	26	12.516	2,158

Durak bazında güvenilirliğin hesaplanmasındaki ikinci aşama, ilk algoritmada elde edilen hatlara özel güvenilirliğin, o duraktan geçen tüm analiz bölgesi hatları dikkate alınarak geliştirilmesidir. Bu amaçla oluşturulan ikinci algoritmanın aşamaları aşağıdaki gibidir:

1. Analiz bölgesindeki durak listesinin girilmesi ve her bir durak için hesap yapacak bir döngü oluşturulması
2. Sıradaki durak için toplam güvenilirlik, toplam geçiş sayısı ve duraktan geçen hat sayısı değişkenlerinin başlangıç değeri olarak "0" tanımlanması
3. Her bir analiz bölgesi hattı gidiş ve dönüşü için ($60 \times 2 = 120$) döngü oluşturulması
4. Sıradaki hat/yön için ilgili durağın hat listesinde aranması
5. Bulunduğu takdirde duraktan geçen hat sayısına "1" ilave edilmesi, toplam geçiş sayısına bulunan geçiş sayısının ilave edilmesi, toplam güvenilirliğe bulunan güvenilirliğin eklenmesi
6. Hat/yön döngüsünün çevrilmesi
7. Hat/yön döngüsü bittikten sonra, ilgili durak için toplam güvenilirliğin toplam geçiş sayısına bölümüyle ağırlıklı durak genel güvenilirliğinin elde edilmesi
8. İlgili durak için güvenilirlik, hat ve geçiş sayılarının kaydedilmesi
9. Durak döngüsünün çevrilmesi

Algoritma ile analiz bölgesi içinde başlayıp biten 60 hattın kullandığı toplam 964 durağın ağırlıklı güvenilirlik ölçütü elde edilmiştir. İkinci aşama sonucunda elde edilen durak güvenilirlik değerlerinden, bekleme süresi gözlemlenen 13 durağa ait veriler Tablo 3'te görülmektedir. Tabloda verilen güvenilirlik değerleri, kullanan hat sayısı, geçiş sayısı veya durağın servis yönü (kent merkezi veya tersi) gibi temel parametrelerle ilişkilendirilmeye çalışılmış, ancak kayda değer bir ilişki elde etmek mümkün olmamıştır. Güvenilirliğin,

bunlardan ziyade, daha dinamik faktörlerin etkisi altında olduğu söylenebilir. İncelenen duraklara ait ağırlıklı güvenilirlik değerleri yaklaşık 1,5-4,5 aralığında gerçekleşmektedir. Özellikle, yoğun kent merkezi trafiğine maruz kaldıktan sonra erişilen 10 ve 13 no.lu duraklarda ağırlıklı güvenilirliğin 2 ve altına düştüğü, dolayısıyla varış süresi sapmalarının ortalama değerine yaklaştığı görülmektedir.

4.3. Durak Gözlemleri ve Hat-Durak Parametreleri

Analiz bölgesi içinde, 6'sı GZYBS'ne sahip olmak üzere toplam 13 adet durakta gözlem çalışmaları yapılmıştır. Yolcu iniş-biniş hareketliliğinin yoğun olduğu duraklarda bekleme davranışının da kritik olacağı bilindiğinden [41] duraklar seçilirken yolcu iniş-biniş sayılarının yeterince yoğun olduğu, analiz bölgesi hatlarının başlangıç duraklarına yakın olmayan (Başlangıca yakın duraklarda olası güvenilirlik kayıpları gözlemlenemeyebilir.) ve gözlem olanağı bulunan duraklar tercih edilmiştir. Yolcu hareketliliğinin yönü dikkate alınarak, Karşıyaka ve çevresindeki konut yerleşimi yoğunluklu bölgelerde yer alan 1-9 no.lu duraklarda sabah zirve saatte, kent merkezi ve diğer iş merkezleri çevresindeki 10-13 no.lu duraklarda ise akşam zirve saatte gözlem çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

Gözlem, durağa ulaşmakta olan otobüs hattının okunabildiği ve bekleyen yolcuların rahatlıkla tanımlanabildiği bir konum ve yükseklikte, bir saat boyunca yerleşik kalan video kamera çekimleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Gözlemlerde, durağa ulaşan her bir yolcunun durağa varış zamanı, cinsiyet, yaklaşık yaş ve tanımlayıcı bir takım fiziksel özellikleri ile birlikte kaydedilmekte; yolcunun duraktan ayrılış zamanı ise, gerektiğinde video çekimi ileri-geri sarılarak bindiği otobüs hattı ile birlikte tespit edilmektedir. Yolcunun beklemesinin, herhangi bir minibüs hattı veya taksi binişi ile sonuçlanması, ya da bindiği hat numarasının gözlemlenememesi durumları, gözlem güvenilirlik ölçütü ile eşleştiremeyeceğinden, değerlendirme dışı bırakılmıştır. Gözlem yapılan tüm duraklara ait veriler birleştirildiğinde toplam 1281 bekleme süresi gözlemi elde edilmiştir. Ancak güvenilirlik ölçütlerinin de bekleme süresi üzerindeki etkisi incelenmek istendiğinden, binişlerin gerçekleştiği hatların analiz bölgesi kapsamında incelenen hatlar olması zorunluluğu doğmaktadır. Çünkü analiz bölgesi içinde başlayıp biten hatlar haricindeki hatların güvenilirlik ölçütü, işlem yoğunluğu sebebiyle hesaplanmamıştır. Bu yüzden güvenilirlik ölçütü çekilebilen hatlara yapılan gözlem binişleri sayısı 657'ye düşmektedir.

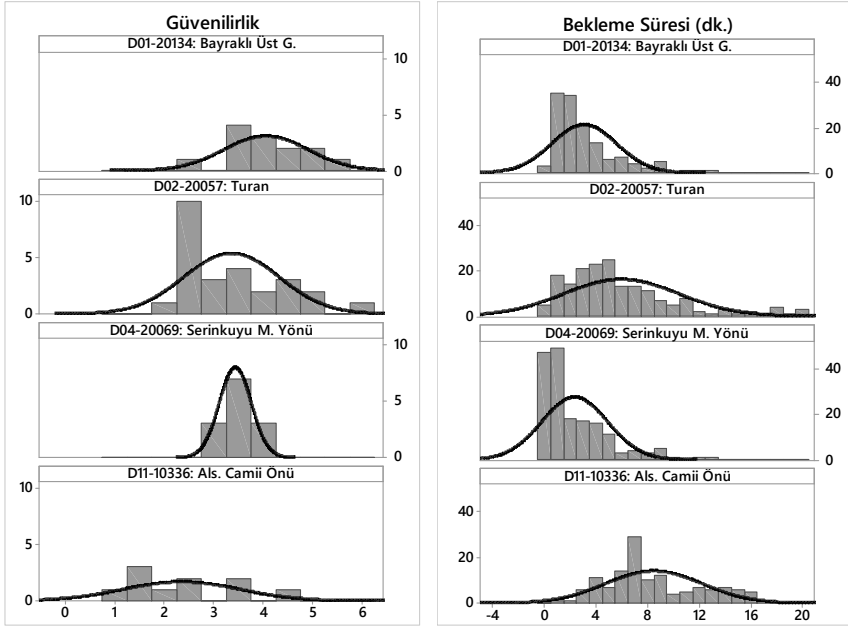
Tüm gözlemlenen bekleme sürelerine ait ortalama ve diğer bazı tanımlayıcı istatistikler Tablo 4'te görülmektedir. Gözlemlenen bekleme süresi ortalamalarının, yolcu binişlerinin yoğun olduğu duraklarda bir miktar daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Çarpıklık değeri, tüm gözlem yapılan duraklar için pozitif bulunmuştur. Bu durum bekleme süresi dağılımlarının sağ kuyruğunun daha uzun olduğunu, dolayısıyla ortalamanın üzerindeki bekleme süresi varyasyonunun daha geniş olduğunu göstermektedir. Basıklık değerleri oldukça değişken olup yoğun binişlerin görüldüğü Bayraklı, Turan, Serinkuyu Merkez Yönü gibi, banliyölerden kent merkezine yolcu taşıyan duraklarda yüksek ve pozitif iken, kent merkezinde yer alan Alsancak duraklarında düşük ve negatiftir. Dolayısıyla merkezdeki bekleme sürelerinin, banliyölerdekilere kıyasla, daha geniş bir bantta değiştiği anlaşılmaktadır. Şekil 5'te, en yüksek yolcu yoğunluğu gözlemlenen dört durağa (1, 2, 4 ve 11 no.lu duraklar) ait bekleme süresi gözlemleri ile duraktan geçen analiz bölgesi hatlarının hat bazında güvenilirlik değerlerinin histogramları verilmiştir. Güvenilirlik dağılımının 3,5

civarında kümelendiği Turan ve Serinkuyu merkez yönü duraklarında bekleme sürelerinin 0-4 dk. gibi düşük bir aralıkta zirve yaptığı görülmektedir. Hatlara göre güvenilirliğin çok çeşitlilik göstermediği Serinkuyu durağında bu yığılma çok daha yüksektir. Hat bazında güvenilirliğin 2,5 gibi daha düşük bir değer civarında en sık görüldüğü Turan durağında ise bekleme süreleri 20 dk.'ya kadar yükselen ve yaklaşık 5 dk.'da zirve yapan bir dağılıma sahiptir. Güvenilirliğin yaklaşık tek düze dağıldığı Alsancak Camii önündeki durakta, bekleme süreleri de 7 dk. civarındaki zirve haricinde yaklaşık tek düze dağılmakta, hemen her uzunlukta bekleme gözlemlenebilmektedir. Özetle, güvenilirlik yüksek ve tek değer etrafında yığılı olduğunda bekleme süresinin oldukça kısa, düşük değerler etrafında yığıldığında bekleme sürelerinin yüksek ve geniş varyasyonlu, tek düze olduğunda ise bekleme sürelerinin de tek düzeye yakın dağıldığı; dolayısıyla dağılımlar bakımından da bekleme süresi üzerinde güvenilirliğin kayda değer bir etkisi olduğu düşünülmektedir.

Tablo 4. Gözlemlenen bekleme sürelerine ait tanımlayıcı istatistikler

No	Durak ID	Durak Adı	N	% N	Std.				
					Ortalama	Sapma	Aralık	Çarpıklık	Basıklık
1	20134	Bayraklı Üst Geçit	133	10,4%	3,101	2,512	12,650	1,618	2,589
2	20057	Turan	181	14,1%	5,974	4,482	20,340	1,331	1,608
3	20154	Karşıyaka İskele	107	8,4%	4,209	3,452	17,840	0,909	1,170
4	20069	Serinkuyu Merkez Yönü	176	13,7%	2,369	2,561	12,700	1,628	2,641
5	20070	Serinkuyu Çiğli Yönü	109	8,5%	7,042	4,687	19,420	0,591	-0,586
6	20059	Naldöken Merkez Yönü	78	6,1%	3,216	2,915	13,860	1,236	1,561
7	20062	Naldöken Serinkuyu Yönü	37	2,9%	4,555	4,381	17,950	1,331	1,313
8	20148	Kasman	40	3,1%	6,295	4,085	16,920	0,798	0,363
9	20071	Kayalar Mezarlığı Karşısı	23	1,8%	5,869	6,398	28,000	2,492	6,883
10	10329	Alsancak Camii Karşısı	57	4,4%	6,237	3,765	15,250	0,590	0,114
11	10336	Alsancak Camii Öntü	132	10,3%	8,495	3,724	15,920	0,512	-0,656
12	30280	PTT Öntü	90	7,0%	3,013	1,940	9,380	1,158	1,475
13	30279	PTT Karşısı	118	9,2%	4,192	3,332	15,850	1,883	3,447
GENEL :			1281	100,0%	4,822	4,069	28,220	1,315	1,889

Bekleme süresi üzerinde etkili olabilecek yaklaşık yolcu yaşı, cinsiyeti, binilen hat gibi gözlem değişkenlerinin yanı sıra, binilen hat ve durağın fiziksel, fonksiyonel ve topolojik özellikleri de kayıt altına alınmıştır. Gözlemlenen duraklarla ilgili, temelde kukla değişken olarak incelemeye yansıtılan tanımlamalar Tablo 5'te özetlenmiştir. Durakların çoğu kapalı olup bir kısmı otobüsler için yolcu indirme-bindirme cebi içermektedir. Bu cepler refüj ile trafik şeridinden ayrılmış ise "1", ayrılmamış ise "0,5" değeriyle sayısallaştırılmıştır.



Şekil 5. En yoğun dört durağa ait güvenilirlik ve bekleme süresi dağılımları

Tablo 5. Gözlem yapılan durakların genel fiziksel yapısı

No Durak İsimleri	Durak ID	Yöntü merkezden gelen mi?	GZYBS var mı?	Kapalı mı?	Kapalı bekleme yeri sayısı	Cepli mi?
1 Bayraklı Üst Geçit	20134	0	1	1	2	1
2 Turan	20057	1	0	1	2	1
3 Karşıyaka İskele	20154	0	0	1	2	0
4 Serinkuyu Merkez Yönü	20069	1	1	1	2	0,5
5 Serinkuyu Çiğli Yönü	20070	0	0	1	1	0,5
6 Naldöken Merkez Yönü	20059	1	0	1	1	0,5
7 Naldöken Serinkuyu Yönü	20062	0	0	1	2	1
8 Kasman	20148	0	1	1	1	0
9 Kayalar Mezarlığı Karşısı	20071	1	0	1	1	0
10 Alsancak Cami	10329	1	0	0	0	0
11 Alsancak Cami	10336	0	1	1	2	0
12 PTT önü	30280	0	1	1	1	0
13 PTT Karşısı	30279	1	1	0	0	0

Tablo 6. Bekleme süresi analizinde kullanılan değişkenler

Değişken			Değişken				
No	Türü	Değişken	Kodu	No	Türü	Değişken	Kodu
1	Cinsiyet		CNS	19	Merkezden Geliş Yönü	MRKZ	
2	Yaş		YAS	20	Yolcu Bil. Sistemi Durumu	YBS	
3	Kişisel	Yaş Grubu	YAS_GR	21	Durak ve Sabah-aşam Zirvesi	SABAH	
4	Özellikler	18-30 Yaş Grubu Kuklası	YAS_GK2	22	Gözlem	Kapalı Durak	Kap_Dur
5		30-50 Yaş Grubu Kuklası	YAS_GK3	23	Özellikleri	Kapalı Bölme Sayısı	Kap_BolS
6		50 üzeri Yaş Grubu Kuklası	YAS_GK4	24		Cepli Durak	Cep_Dur
7		Durağın Hattaki Sırası	Hat_Sıra	25		Durak Bazında Güvenilirlik	D_gvn
8		Hattın Durak Sayısı	Hat_DS	26		Bayraklı Üst Geçit	D_kuk1
9		Durağın Sıra Oranı	DurSO	27		Turan	D_kuk2
10		Hattın Duraktan Ort.Geçişi	Hdur_OG	28		Karşıyaka İskele	D_kuk3
11		Duraktan Geçen Hat Sayısı	Dur_Hat	29		Serinkuyu Merkez Yönü	D_kuk4
12	Hatla	Duraktan Ort. Otobüs Geçişi	Dur_Oto	30	Durak	Serinkuyu Çiğli Yönü	D_kuk5
13	İlgili	Durağın Başlangıca Uzaklığı	DH_MES	31	Konumsal	Naldöken Merkez Yönü	D_kuk6
14	Özellikler	Hatta Mesafe Oranı	DH_ORAN	32	Kukla	Naldöken Serinkuyu Yönü	D_kuk7
15		Durağa Kadarki Durak Sıklığı	DH_SIK	33	Değişkenleri	Kasman	D_kuk8
16		Hattın Sefer Sıklığı	Hat_SS	34		Kayalar Mezarlığı Karşısı	D_kuk9
17		Hat Bazında Durak Güvenilirliği	HBD_gvn	35		Alsancak Camii Karşısı	D_kuk10
18	Bağimli Değişken	Bekleme Süresi (dk.)	Bek_Sur	36		Alsancak Camii Öntü	D_kuk11
				37		PTT Öntü	D_kuk12

Tablo 6'da bekleme süresinin modellenmesi için dikkate alınan, hesaplanmış, gözlemlenmiş veya türetilmiş değişkenlerin tamamı görülmektedir. Bazı değişkenler ile ilgili detaylar aşağıda sıralanmıştır:

- Durağın kapalı olup olmaması, kapalı ise kapalı bölme sayısı ve cep durumu yolcuların bekleme koşullarını etkilediğinden; koşulların uygun olmaması halinde yolcular daha az bekleyebilmek için bilgilendirme sisteminin sağladığı bilgiye daha çok önem verebileceklerdir.
- Yaş grupları 6-18 yaş için "1", 18-30 yaş için "2", 30-50 yaş için "3" ve 50 yaş üzeri için "4" şeklinde düzenlenmiş, gruplar hem bu kategoriler, hem de 3 adet grup kuklası şeklinde korelasyonda dikkate alınmıştır.
- Durağın hattaki sırası ve bu sıranın hattaki tüm durak sayısına oranı, binilen durağın hattaki konumunu yansıtmak üzere ele alınmıştır. Gözlenen durağın binilen hattın sonlarında yer alması; otobüsün o durağa gelene dek daha uzun bir süre trafik koşulları ve yolcu iniş-binişine maruz kalması ve o hattı bekleyen yolcuların daha uzun süre beklemesi sonuçlarını doğurabilmektedir.
- Binilen hattın gün boyunca ortalama kaç kez binilen duraktan geçtiği, servis sıklığını yansıtan bir parametredir.
- Hat bazında durak güvenilirliği, binilen hattın ilk duraktan kalkışından gözlemlenen durağa varışına kadar geçen sürelerinin değişimini ifade etmektedir. Durak bazında güvenilirlik ise binilen durağın ağırlıklı genel güvenilirliğini ifade etmektedir.
- Analiz bölgesindeki hatların kaç tanesinin ilgili durağı kullandığı, türetilen diğer bir parametredir. Bu parametrenin yüksek değerler alması, durağın sağladığı

güzergâh alternatifini arttırırken, diğer taraftan bulunduğu arter boyunca yoğun bir otobüs trafiği yaşandığını da göstermektedir. Dolayısıyla bekleme süresini olumlu veya olumsuz yönde etkileyebilecektir.

- Duraktan geçen günlük ortalama otobüs sayısı da benzer bir şekilde sefer sıklıklarıyla birlikte yansıtılan bir parametredir.
- Durağın hattaki konumuna ilişkin, ilk durağa uzaklık, bu uzaklığın hat uzunluğuna oranı ve durağa kadar kaç kilometre sıklıkta durak bulunduğu da hat topolojisine ilişkin bekleme süresinde etkili olabilecek değişkenlerdir. Durak sıklığı arttıkça otobüsün yolcu indirip bindirmeden kaynaklanan gecikme süreleri beklemelere yansiyabilecektir.
- Binilen hattın sefer sıklığı, hattın gözlem periyodundaki (sabah veya akşam zirvesi) dakika cinsinden aralık olarak dikkate alınmıştır.

5. BEKLEME SÜRESİNİN MODELLENMESİ

Bekleme süresinin tahminine ilişkin model geliştirme çalışmasından önce, bekleme süresinin hangi değişkenlerle yüksek korelasyona sahip olduğu analiz edilmiştir. Pearson çift kuyruklu korelasyon sonuçları Tablo 7'de verilmiştir. Tabloda kalın ve italik karakterle işaretli değişkenler "0,05" düzeyinde korelasyonu etkin olan, kalın karakter ve gri tonla işaretli değişkenler ise "0,01" düzeyinde (daha yüksek düzeyde) korelasyonu etkin olan değişkenleri göstermektedir.

Yolcu bilgilendirme sistemi durumu, görüldüğü gibi en yüksek korelasyonu vermektedir. Gözlenen durakta bilgilendirme olması "1", olmaması "0" kukla değişkeni ile gösterildiğinden, negatif bir korelasyon bulunması, GZYBS'nin olması durumunda bekleme sürelerinin azaldığını göstermektedir ki bu araştırmadaki en kritik hipotezin sağlandığını ortaya koymaktadır. Diğer tüm değişkenlerle kıyaslandığında mutlak değerce en büyük korelasyon katsayısını (-0,313) yolcu bilgilendirme sisteminin sağlıyor olması da dikkat çekicidir.

Kukla değişken şeklinde yaş grupları etkin çıkmaz iken grup no.sunun kendisini içeren değişken düşük düzeyde de olsa negatif etkin korelasyonlu bulunmuştur. Dolayısıyla yaş grubu yükseldikçe, bekleme süresi bir miktar azalmaktadır. Bu durum, yaş ortalaması büyüdükçe bilgilendirme sisteminden daha bilinçli yararlanıldığını ve dolayısıyla daha kısa süre beklendiğini düşündürmektedir. Diğer bir düşük düzeyde etkin değişken de duraktan geçen analiz bölgesi hattı sayısıdır. Pozitif etkin bu değişken, hat sayısı arttıkça durak ve öncesindeki arteri kullanan otobüs geçişleri sebebiyle trafiğin ve duraklardaki hareketliliğin artmasından dolayı bekleme süresinin bir miktar uzadığını göstermektedir.

Durak fiziki koşullarından olan kapalı bölme sayısı arttıkça, bekleme süresinin azalan yönde korelasyon göstermesi, bekleme koşulları iyi iken bekleme süresinin azaltılması konusunda yolcularının eğiliminin (dolayısıyla bilgilendirmeyi etkin kullanmanın) azaldığını işaret etmektedir.

Tablo 7. Bekleme süresi ile açıklayıcı değişkenler arasındaki korelasyonlar

No	Değişken Adı	Kodu	Korelasyon Katsıysı	Etkinlik
1	Cinsiyet	CNS	-0,002	0,96789
2	Yaş	YAS	-0,069	0,07846
3	Yaş Grubu	YAS_GR	-0,090	0,02171
4	Yaş Grubu Kuklası 2	YAS_GK2	0,041	0,29310
5	Yaş Grubu Kuklası 3	YAS_GK3	-0,034	0,38144
6	Yaş Grubu Kuklası 4	YAS_GK4	-0,048	0,22190
7	Durağın Hattaki Sırası	Hat_Sıra	-0,178	0,00000
8	Hattın Durak Sayısı	Hat_DS	-0,210	0,00000
9	Durağın Sıra Oranı	DurSO	-0,024	0,53701
10	Hattın Duraktan Ort. Geçışı	Hdur_OG	-0,178	0,00000
11	Duraktan Geçen AB Hat Sayısı	Dur_Hat	0,094	0,01553
12	Duraktan Ort. Otobüs Geçışı	Dur_Oto	0,111	0,00438
13	Durağın Başlangıca Uzaklığı	DH_MES	0,134	0,00000
14	Hatta Mesafe Oranı	DH_ORAN	0,213	0,00000
15	Durağa Kadarki Durak Sıklığı	DH_SIK	0,110	0,00488
16	Hattın Sefer Sıklığı	Hat_SS	0,246	0,00000
17	Hat Bazında Durak Güvenilirliği	HBD_gvn	-0,195	0,00000
19	Merkezden Geliş Yönü	MRKZ	-0,076	0,05189
20	Yolcu Bil. Sis Durumu	YBS	-0,313	0,00000
21	Sabah-Akşam Zirvesi	SABAH	-0,004	0,92197
22	Kapalı Durak	Kap_Dur	-0,066	0,09125
23	Kapalı Bölme Sayısı	Kap_BolS	-0,154	0,00007
24	Cepli Durak	Cep_Dur	0,073	0,06203
25	Durak Bazında Güvenilirlik	D_gvn	0,201	0,00000

Durağın hattaki sıra numarasına ilişkin değişkenler negatif etkin çıkmıştır ki durağın sıralamada sonlarda yer alması bekleme süresini azaltıcı bir etken olarak anlamlı değildir. Sıra numarasından ziyade mesafe parametrelerinin daha mantıklı sonuç verebileceği düşünülmektedir.

Hattın duraktan günlük ortalama geçiş sıklığı da negatif yönde etkin bir parametre olarak bulunmuştur. Dolayısıyla hattın ilgili durağından gün boyu daha sık geçerse bekleme süresi kısalmaktadır. Hat bazında durak güvenilirliği ve durak için ağırlıklı güvenilirlik değerleri de bekleme süresi üzerinde negatif etkin çıkmıştır. Dolayısıyla güvenilirliği yüksek duraklarda bekleme süreleri kısalmaktadır ki araştırmanın beklenen hipotezlerinden biridir.

Durağın hattın başlangıcına mesafesi ve bu mesafenin tüm hat uzunluğuna oranı değişkenleri, sıra numarasına ilişkin fiziki parametrelerin aksine, pozitif etkin çıkmıştır ki durağın hat sonuna yakın mesafede bulunmasının bekleme süresini arttırdığını göstermektedir.

Diğer bir hat fiziki parametresi olan binilen durağa kadarki durak sıklığı da pozitif etkin görünmektedir. Binilen durağa kadarki durakların "km" cinsinden ortalama mesafesini gösteren değişken büyüdükçe bekleme süresi de uzamakta; uzun mesafeli duraklar, otobüslerin trafikle birlikte kat ettiği mesafenin daha fazla olması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla bekleme süresinin, iniş-binişlerde kaybedilen süreden ziyade, trafikte seyir halindeyken kaybedilen süreden etkilendiği söylenebilir.

Hattın sefer sıklığı değişkeni, "dk" cinsinden otobüs kalkış aralığı olarak dikkate alındığından bu değer artması sonucunda bekleme süresinin de artması, öngörülen etkin bir korelasyondur.

Elde edilen korelasyonların büyük bir kısmı beklenen hipotezleri karşılamaktadır. Ancak bekleme süresi bir çoklu regresyon ile modellenmek istendiğinde, değişkenlerin bir aradaki davranışının ayrık davranışından farklı olabileceği bilinmektedir. Bekleme süresinin çoklu doğrusal regresyon yöntemi ile tahmin edilebilmesi için birçok bağımsız değişken kombinasyonu denenmiştir. Denemelerin hiçbirinde sabit terimin etkin çıkması dikkat çekicidir. Dolayısıyla dikkate alınan değişkenlerin alacağı değerlerden bağımsız bir bekleme sabit değerinin olmadığı söylenebilir. Bununla birlikte, modelde kullanılan kukla değişkenlerin kayda değer düzeyde etkin çıkması, kukla değişkenlerin sabit terimin yerini aldığı kanısını doğurmaktadır. Denemeler sonucunda en az sayıda (en etkin) terim içeren regresyon modeli Tablo 8'deki gibi elde edilmiştir. Regresyon katsayısı (R-kare) 0,616 mertebesinde olup varyans analizi F-testi anlamlılık düzeyi bakımından modelin başarımının doyurucu olduğu söylenebilir.

Tablo 8. Bekleme süresi çoklu regresyon modeli istatistikleri

Regresyon İstatistikleri		ANOVA					
Çoklu R	0,785						
R Kare	0,616						
Ayarlı R Kare	0,612						
Standart Hata	3,795						
Gözlem	657						
		<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>P(F)</i>	
		Regresyon	5	15.086,9	3.017,4	209,475	0,000
		Fark	652	9.391,7	14,4		
		Toplam	657	24.478,7			

	Standart			
	Katsayılar	Hata	t Stat	P-değeri
Cep_Dur	1,118	0,449	2,489	0,013
DurSO	9,668	1,387	6,973	0,000
D_gvn	-1,305	0,262	-4,975	0,000
Hat_SS	0,114	0,017	6,866	0,000
YBS	-2,101	0,312	-6,730	0,000

Durağın fiziki parametrelerinden durağın cepli olması durumu, bekleme süresini pozitif etkileyen bir açıklayıcı değişken olarak bulunmuştur. Cepli duraklar, yoğun duraklarda otobüslerin birbirini takip etmesi ve yolcuların biniş için sırayı beklemesi zorunluluğunu doğurduğundan bu tür bir etki öngörülebilir. Bu bulgu, çalışmadaki diğer bulgularla da örtüşmektedir. Otobüs cebinin bulunmadığı durumlarda, otobüslerden oluşan bir katar oluşması halinde, otobüsler cebin boşalmasını beklemeden ön sıralara geçebilmektedir.

"t" istatistikleri karşılaştırıldığında diğerlerine göre en yüksek etkili değişken durak sıra oranıdır. Pozitif etkin çıkan değişkenlerden biri olan durak sıra oranı, hat geometrisine ilişkin bir model parametresidir. Durağın hat durakları içinde sonlarda yer alması, dolayısıyla büyük bir sıra oranı alması, bekleme süresini uzatan; hattın trafik ve hat yoğunluğundan daha çok etkilendiğini gösteren bir parametre olarak ortaya çıkmıştır.

Durak güvenilirliği, modelde beklendiği üzere negatif etkin değişkenlerdendir. Güvenilirliği yüksek duraklar daha kısa bekleme süresi sağlamaktadır. Hattın sefer sıklığı da beklenen şekilde pozitif etkili bir bekleme süresi etkeni olarak bulunmuştur. Dakika cinsinden aralıklar uzadıkça daha uzun bekleme sürelerine yol açmaktadır.

Çalışmanın ana amaçlarından biri olan GZYBS'nin varlığına ilişkin değişken de, katsayısı ve "t" istatistiği dikkate alındığında, modelde önemli paya sahip bir etken olarak ön plana çıkmaktadır. GZYBS durumunun sadece "1" ve "0" şeklindeki bir kukla değişken ile ifade edildiği göz önüne alınırsa "-2,101" gibi büyük bir katsayı ile modele girmesi; sistemin varlığının bekleme süresini 2 dk.'dan fazla kısalttığını göstermektedir. 657 adet gözlemlenmiş bekleme süresinin genel ortalamasının 4,443 dk., standart sapmasının da 4,186 dk. olduğu dikkate alınırsa, YBS den kaynaklanan 2 dk.'lık etkinin oldukça kayda değer olduğu açıktır.

Modelde kullanılan değişkenlerin birbirlerine olan korelasyonları Tablo 9'da görülmektedir. Tablo incelendiğinde değişkenlerin aralarındaki küçük düzeydeki korelasyonların multi-kolineerliğe yol açmadığı anlaşılmıştır. Bu da modelin geçerliliği yönünden önemli bir sonuçtur.

Tablo 9. Modelde kullanılan değişkenlerin aralarındaki korelasyonları

		YBS	CEP_DUR	DUR_SO	D_GVN	HAT_SS
YBS	Pearson Korelasyonu:	1,000	0,232	0,059	0,121	-0,077
	Etkinlik:		0,000	0,129	0,002	0,049
CEP_DUR	Pearson Korelasyonu:	-0,232	1,000	0,064	0,041	-0,290
	Etkinlik:	0,000		0,100	0,300	0,000
DUR_SO	Pearson Korelasyonu:	0,059	0,064	1,000	-0,078	-0,044
	Etkinlik:	0,129	0,100		0,046	0,263
D_GVN	Pearson Korelasyonu:	0,121	0,041	0,078	1,000	0,012
	Etkinlik:	0,002	0,300	0,046		0,765
HAT_SS	Pearson Korelasyonu:	-0,077	-0,290	-0,044	0,012	1,000
	Etkinlik:	0,049	0,000	0,263	0,765	

Bekleme süresi regresyon modelinin hangi duraklarda etkin sonuçlar verdiğini irdelemek amacıyla, aynı regresyon modelinin her bir durağa ait kukla değişkeni içeren bir analiz daha gerçekleştirilmiştir. Modelde 13 farklı gözlem durağı için oluşturulan kukla değişken

kolonları, ait olduğu durak için "1" değerini alırken, diğer duraklar için "0" değerini almaktadır. Böylece gözlem durağına özel bir sabit terimin modele katkısı sınanabilmekte; modelde konumsal olarak farklılık yaratan bileşenler "sabit etkiler" (fixed effects) yöntemiyle ortaya konabilmektedir [42].

Konumsal kukla değişkenli regresyon analizinde, modelin "multicollinearity" kriterine takılmasını engellemek için, türetilen kukla kolonlarından bir tanesinin regresyon dışında tutulması, dolayısıyla referans gözlem olarak ayrılması gerekmektedir. Aksi halde, kukla değişkenler, model içindeki diğer parametreler ile korelasyon oluşturabilmektedir. Bu amaçla, nispeten az sayıda gözlem içeren 13 no.lu "PTT Karşısı" isimli durak değerlendirme dışında tutulmuş, 13 farklı durak gözlemi için 12 kukla değişken kolonu kullanılmıştır.

Tablo 10'da konumsal kukla değişkenli regresyon analizi sonuçları görülmektedir. Kukla değişken içermeyen model ile karşılaştırıldığında, artan bağımsız değişken sayısı sebebiyle model başarımının bir miktar yükseldiği görülmektedir. Durak sıra oranı (DurSO) ve durak güvenilirliği değişkenlerinin modeldeki etkisi, kukla değişkenler ilave edildiğinde yükselmekte, durağın ceppli olması durumu (Cep_Dur) hattın sefer sıklığı (Hat_SS) ve yolcu bilgilendirme sistemi durumu (YBS) değişkenlerinin etkisi ise bir miktar düşmektedir. Dolayısıyla, kukla değişkenler ile konumsal olarak tanımlanamayan bileşenler ayrıştırıldığında, güvenilirlik ve durağın hat boyunca konumu, bekleme süresi üzerinde daha belirgin etkenler haline gelmektedir. Yolcu bilgilendirme sistemlerinin modeldeki etkinliğinin, katsayı değişimi dikkate alındığında yaklaşık %30 mertebesinde düşmesi, bilgilendirme sistemlerinin hangi durakta bulunduğuun önem arz ettiğini göstermektedir.

Tablo 10. Konumsal kukla değişken içeren bekleme süresi regresyon analizi sonuçları

Regresyon İstatistikleri		ANOVA					
Çoklu R	0,795		df	SS	MS	F	P (F)
R Kare	0,632	Regresyon	11	15.466,83	1406,08	100,79	0,000
Ayarlı R Kare	0,626	Fark	646	9.011,83	13,95		
Standart Hata	3,735	Toplam	657	24.478,65			
Gözlem	657						

	Standart			
	Katsayılar	Hata	t Stat.	P-değeri
Cep_Dur	1,099	0,540	2,035	0,042
DurSO	10,943	1,508	7,256	0,000
D_gvn	-1,439	0,274	-5,250	0,000
Hat_SS	0,088	0,018	4,833	0,000
YBS	-1,441	0,461	-3,125	0,002
D_kuk4	-1,217	0,453	-2,684	0,007
D_kuk5	1,064	0,530	2,009	0,045
D_kuk6	-1,891	0,634	-2,983	0,003
D_kuk7	0,029	0,795	0,036	0,971
D_kuk9	1,147	1,060	1,082	0,280
D_kuk12	0,072	0,917	0,079	0,937

Kukla değişkenlerden 1, 2, 3, 8, 10 ve 11 no.lu duraklara ait olanlar, durak ve gözlem özellikleri ile korelasyon verdiğinden elenmiş, kukla değişkenlerin etkinliği 4, 5, 6, 7, 9 ve 12 no.lu duraklar için analize yansımıştır. Korelasyon sebebiyle elenen durak kuklaları için, seçilen durak ve gözlem özelliklerinin kukla gerektirmeyecek nitelikte konumsal nitelikleri tanımlayabildiği söylenebilir. 4, 5 ve 6 no.lu duraklara ait kukla değişkenler etkin "t" istatistikleri ile modelde yer bulurken; 7, 9 ve 12 no.lu duraklara ait kukla değişkenler modelde etkisiz kalmıştır. Kısacası 13 gözlem noktasının 3'ünde, model tarafından tanımlanamayan konumsal bileşenler bulunduğu söylenebilmektedir. Kukla değişken istatistiklerinin durak ve gözlem özellikleri ile karşılaştırılabilmesi için Tablo 11 düzenlenmiştir.

Tabloda görülebileceği gibi, kukla değişkenin etkin çıktığı durakların en belirgin ortak özelliği durağın yarı cepli (veya durak cebinin etkin kullanılmadığı) özellikte olmasıdır. Durak geometrisindeki belirsizliğin, bekleme süresi tahminin de tanımsız kalan boyutu arttırdığı söylenebilir. Dolayısıyla yolcu bilgilendirme sistemlerinin daha verimli olabilmesi için durak geometrisinin belirgin olduğu duraklarda kullanılmasının daha yararlı olacağı sonucuna varılmaktadır. Tablo yardımıyla yapılabilecek diğer bir çıkarım, kukla etkin duraklar merkezden gelen hatlara hizmet ettiğinde kukla katsayısının "eksi" işaretli ve daha etkin, merkeze giden hatlara hizmet ettiğinde ise "artı" işaretli ve nispeten daha az etkin olmasıdır. Dolayısıyla modeldeki konumsal belirsizlikler, merkezden gelen hatları bekleme süresinin kısa, merkeze giden hatları bekleme süresinin uzun tahmin edilmesine neden olmaktadır. Bu sebeple yolcu bilgilendirme sistemlerinin, bekleme süresini tahminde ve yolcu davranışında daha etkin hale gelebilmesi için kent merkezinden gelen hatlara hizmet eden duraklarda öncelikli olarak uygulanması daha yararlı olacaktır.

Tablo 11. Konumsal kukla değişken başarımları ve durak/gözlem özellikleri

No	Durak İsimleri	Kukla Değişkenli Model Başarımları				Durak ve Gözlem Özellikleri					
		Katsayı	Standart hata	t istatistiği	P-değeri	Yönü merkezden gelen mi?	Gözlem sabah zirve mi?	Bilgilendirme sistemi var mı?	Kapalı mı?	Kapalı bekleme yeri sayısı	Cepli mi?
1	Bayraklı Üst Geçit	-	-	-	-	0	1	1	1	2	1
2	Turan	-	-	-	-	1	1	0	1	2	1
3	Osman Bey Parkı	-	-	-	-	0	1	0	1	2	0
4	Serinkuyu Merkez Yönü	-1,217	0,453	-2,684	0,007	1	1	1	1	2	0,5
5	Serinkuyu Çiğli Yönü	1,064	0,530	2,009	0,045	0	1	0	1	1	0,5
6	Naldöken Merkez Yönü	-1,891	0,634	-2,983	0,003	1	1	0	1	1	0,5
7	Naldöken Serinkuyu Yönü	0,029	0,795	0,036	0,971	0	1	0	1	2	1
8	Kasman	-	-	-	-	0	1	1	1	1	0
9	Kayalar Mezarlığı Karşısı	1,147	1,060	1,082	0,280	1	1	0	1	1	0
10	Alsancak Camii	-	-	-	-	1	0	0	0	0	0
11	Alsancak Camii	-	-	-	-	0	0	1	1	2	0
12	PTT Önü	0,072	0,917	0,079	0,937	0	0	1	1	1	0
13	PTT Karşısı	-	-	-	-	1	0	1	0	0	0

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çoğu büyük kentimizde toplu ulaşım yolculuklarının yarısından fazlasını üstlenen kent içi otobüs sistemlerinde, yolcular tarafından algılanan hizmet seviyesinin önemli bir boyutunu durakta bekleme süresi oluşturmaktadır. Günden güne artan özel taşıt sahipliği dikkate alındığında, toplu taşımanın cazip bir seçenek olmasını sağlamak için, bekleme süresinin nedenlerinin incelenmesi ve bu süreyi azaltma yollarının aranması büyük önem taşımaktadır.

Bu çalışmada, bekleme süresinin, hat ve durak özelliklerinin yanı sıra, güvenilirlik ve gerçek zamanlı yolcu bilgilendirme sistemlerinden ne düzeyde etkilendiği irdelenmiştir. Altısı bilgilendirme sistemli yedisi bilgilendirmesiz olmak üzere toplam 13 durakta bekleme süresi gözlemleri yapılmıştır. Oluşturulan ampirik doğrusal model sonucunda, bağımlı değişken bekleme süresinin dakika cinsinden olduğu dikkate alınırca, bilgilendirme sistemi varlığının bekleme süresini ortalama 2 dakika, durak ortalama güvenilirliğinin ise ortalama 1,3 dakika kısaltıcı etkisi olduğu sonucuna varılmaktadır.

Durakların konumsal farklılıklarının, modelde etkili olup olmadığı sınıması amacıyla aynı doğrusal modele, duraklara ait kukla değişkenler ilave edilmiştir. Konumsal kukla değişkenlerin etkin çıktığı duraklarda en belirgin ortak özellik, durağın yarı cepli (veya durak cebinin etkin kullanılmadığı) olmasıdır. Durak geometrisindeki belirsizliğin, bekleme süresinin tahminin de tanımsız kalan boyutu arttırdığı görülmüştür. Dolayısıyla yolcu bilgilendirme sistemlerinin daha etkin olabilmesi için geometrinin belirgin olduğu duraklarda uygulanması gerektiği sonucuna varılmıştır. Modeldeki konumsal belirsizliklerin, merkezden gelen hatları bekleme süresinin kısa, merkeze giden hatları bekleme süresinin uzun tahmin edilmesine neden olduğu görülmüştür. Bu sebeple yolcu bilgilendirme sistemlerinin daha başarılı tahminler verip, yolcu davranışında etkin hale gelebilmesi için kent merkezinden gelen hatlara hizmet eden duraklarda uygulanmasına öncelik verilmesi gereği ortaya konmuştur.

Bekleme süresi tahmini, çalışmaya yansıtılan modeller haricinde, her bir durakta binilen hat bazında ayrı ayrı ele alındığında veya binilen hatta ait bir kukla değişken, açıklayıcı bir değişken olarak regresyona dâhil edildiğinde anlamlı bir sonuç elde edilememiştir. Dolayısıyla çalışmada hattı temsil eden, durağın hattaki sırası, hattın duraktan ortalama geçişi, hattın sefer sıklığı vb. değişkenlerin bekleme süresini öngörmede yeterli olduğu, modellerde açıklanamayan kesimin ise bazı diğer dışsal etkenlerden kaynaklandığı düşünülmektedir. Çalışma için yapılan gözlemler, yağışsız ve hava koşullarının elverişli olduğu zaman dilimlerinde gerçekleştirilmiştir. Hava koşullarının elverişsiz olduğu dönemlerde, yolcuların bekleme süresi algısının daha uzun olacağı ve bu süreyi kısaltmak için daha büyük çaba sarf edebileceği açıktır. Bu yüzden takip eden çalışmalarda, aynı durakların farklı mevsimsel koşullarda gözlemlenerek sonuçların karşılaştırılması önerilmektedir. Ayrıca, sistem yöneticileri ile gerekli işbirliğinin sağlanması halinde, anket çalışmalarından da yararlanılarak, belirlenen duraklarda GZYBS'nin çalıştığı ve çalışmadığı durumlar (Sistemin yerel yönetim tarafından geçici olarak kapatılması gerekmektedir.) için algılanan ve gerçekleşen bekleme süreleri karşılaştırılarak yeni ve değerli bulgular elde edilebileceği düşünülmektedir.

Semboller

GZYBS : Gerçek zamanlı yolcu bilgilendirme sistemi

RT_i : Yolculuk süresi esaslı güvenilirlik (Reliability based on Travel Time)

μ_{ti} : i. hatta incelenen otobüslerin yolculuk sürelerinin ortalaması

σ_{ti} : i. hatta incelenen otobüslerin yolculuk sürelerinin standart sapmasıdır.

Teşekkür

Bu çalışma, TÜBİTAK tarafından desteklenen 112M117 no.lu ve "Akıllı Kart Verilerine Dayalı Güvenilirlik Ölçütlerinin Toplu Ulaşım Atama Modellerine Entegrasyonu" başlıklı araştırma projesinde elde edilen bulguları içermektedir. Bu bağlamda, sağladığı proje desteği için TÜBİTAK'a ve veri temininde verdiği destek için İzmir Büyükşehir Belediyesi ESHOT Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Victoria Transport Policy Institute, Transit Station Improvements: Improving Public Transit Waiting Conditions. Victoria, Canada, www.vtpi.org, 2015.
- [2] Murat, Y.Ş., Kutluhan, S., Uludağ, N., Use of Fuzzy Optimization and Linear Goal Programming Approaches in Urban Bus Lines Organization. *Soft Computing in Industrial Applications*, 223, 277-287, 2014.
- [3] Wardman, M., Hine, J., Stradling, S. G., Interchange and Travel Choice. Research Report, Edinburgh: Scottish Executive Central Research Unit, Edinburgh, Scotland, 2001.
- [4] Durrande-Moreau, A., Waiting for Service: Ten Years of Empirical Research. *International Journal of Service Industry Management*, 10 (2), 171 - 194, 1999.
- [5] Katz, K., Larson, B., Larson, R., Prescription for the Waiting-in-Line Blues: Entertain, Enlighten and Engage. *Sloan Management Review*, 32 (2), 44-53, 1991.
- [6] Taylor, S., Fullerton, G., Waiting for Service: Perceptions Management of the Wait Experience. In *Handbook of Services Marketing and Management*, ed. Teresa A. Swartz and Dawn Iacobucci, Thousand Oakes, CA: Sage Publications, 171-189, 2000.
- [7] Hui, M. K., Tse, D. K., What to Tell Consumers in Waits of Different Lengths: An Integrative Model of Service Evaluation. *Journal of Marketing*, 60, 81-90, 1996.
- [8] Hui, M. K., Zhou, L., How Does Waiting Duration Information Influence Customers' Reactions to Waiting for Services? *Journal of Applied Social Psychology*, 26 (19), 1702-1717, 1996.
- [9] Hall, R. W., Passenger Waiting Time and Information Acquisition Using Automatic Vehicle Location for Verification. *Transportation Planning and Technology*, 24 (3), 249-269, 2001.

- [10] Jolliffe, J. K., Hutchinson, T. P., A Behavioral Explanation of the Association Between Bus and Passenger Arrivals at a Bus Stop. *Transportation Science*, 9 (4), 248–282, 1975.
- [11] Fonzone, A., Schmöcker, J.D., Liu, R., A Model of Bus Bunching under Reliability-Based Passenger Arrival Patterns. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 59 (October), 164-182, 2015.
- [12] He, S.X., An Anti-Bunching Strategy to Improve Bus Schedule and Headway Reliability by Making Use of the Available Accurate Information. *Computers & Industrial Engineering*, 85 (July), 17-32, 2015.
- [13] Moreau, A., Public Transport Waiting Times as Experienced by Customers: Marketing Research Involving the Grenoble System. *Public Transport International*, 41 (3), 52-68, 1992.
- [14] Casey, R. P., Lawrence, N. L., Moniz, L., Royal, J. W., Sheehan, M., Sheehan, T., Advanced Public Transportation Systems: The State of the Art, Research and Special Programs Administration Volpe National Transportation Systems Center Office of System and Economic Assessment Operations Assessment Division, Cambridge, MA, 2000.
- [15] U. S. Department of Transportation (USDOT), Developing Traveller Information Systems Using the National its Architecture. *Intelligent Transportation Systems Joint Program Office*, Washington DC, 1998.
- [16] Marks, J., How Transit Agencies are Leveraging the Web for Traveller Information. *Newsletter of the ITS Cooperative Deployment Network*, 2001.
- [17] Abdelfattah, A., Ata, M. K., Models for Predicting Bus Delays. *Transportation Research Record*, 1623, 8-15, 1998.
- [18] Lehtonen, M., Kulmala, R., The Benefits of a Pilot Implementation of Public Transport Signal Priorities and Real-Time Passenger Information. Paper presented at the *Inform Norden International Conference*, Tampere, Finland, 2001.
- [19] Coogan, M. A., Recent Developments in Integrated Passenger Information Systems in North America. Paper presented at the *3rd UITP Conference on Travel Information*, Gothenburg, Sweden, 2003.
- [20] Dziekan, K., Customer Perceptions and Behavioural Responses to it Based Public Transport Information, Stockholm, Sweden: *Infrastruktur*, 2004.
- [21] Kronborg, P., Anders, L., Eva, S., *Fungera Transportinformatik i Praktiken? 14 Fallstudier i Syfte att Undvika Misstag i Framtiden*, Stockholm: TFK, 2002.
- [22] Infopolis2, Review of Current Passenger Information Systems, *Advanced Passenger Information for European Citizens of 2000*, 1998.
- [23] Stradling, S. G., Transport User Needs and Marketing Public Transport. *Municipal Engineer*, 151 (1), 23-28, 2002.

- [24] Federal Highway Administration, 2010 Status of the Nation's Highways, Bridges, and Transit: Conditions & Performance. U.S. Department of Transportation, Washington DC, 2010.
- [25] Abdel-Aty, M. A., Using Ordered Probit Modeling to Study the Effect of ATIS on Transit Ridership. *Transportation Research Part C*, 9, 265–277, 2001.
- [26] Tang, L., Thakuriah, P., Ridership Effects of Real-Time Bus Information System: A Case Study in The City of Chicago. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 22, 146-161, 2012.
- [27] Peng, Z., Oliver, J., Assessing Means of Transit Information Delivery for Advanced Public Transportation Systems. *Journal of the Transportation Research Board*, 1428, 99, 1999.
- [28] Hickman, M., Wilson, N., Passenger Travel Time and Path Choice Implications of Real-Time Transit Information. *Transportation Research Part C* 3 (4), 211-226, 1995.
- [29] Schweiger, C., Real Time Bus Arrival Information Systems. *Transportation Research Board Transit Cooperative Research Programme Synthesis* 48, 2003.
- [30] Forsyth, E., Silcock, D., Real Time Information for Passengers on the London Underground. *PTRC SAM Seminar J*, 157-171, 1985.
- [31] Liu, R., Sinha, S., Modelling Urban Bus Service and Passenger Reliability. *The Third International Symposium on Transportation Network Reliability (INSTR)*, Hague, Netherlands, 2007.
- [32] Abkowitz, M., Slavin, H., Waksman, R., English, L., Wilson, N., Transit Service Reliability Report. *USDOT Transportation Systems Center*, Cambridge, MA, 1978.
- [33] Chen, X., Yu, L., Zhang, Y., Guo, J., Analyzing Urban Bus Service Reliability at the Stop, Route, and Network Levels. *Transportation Research Part A*, 43, 722-734, 2009.
- [34] Turnquist, M. A., Bowman, L. A., The Effects of Network Structure on Reliability of Transit Service. *Transportation Research*, 14B, 79-86, 1980.
- [35] Murat, Y. S., Uludag, N., Bulanık Mantık ve Lojistik Regresyon Yöntemleri ile Ulaşım Ağlarında Rota Seçim Davranışının Modellenmesi. *Teknik Dergi*, 19 (2), 4363-4379, 2008.
- [36] Transit Cooperative Research Program (TCRP), Transit Capacity and Quality of Service Manual. Second Ed., TCRP Report 100, *Transportation Research Board, National Research Council*, Washington, DC, 2003.
- [37] Kittelson & Associates Inc., Urbitrans Inc., LKC Consulting Services Inc., MORPACE International Inc., Queensland University of Technology, Nakanishi, Y., TCRP Report 88: A Guidebook for Developing a Transit Performance Measurement System. *TRB*, Washington, D.C., 2003.
- [38] Polus, A., Modelling and Measurements of Bus Service Reliability. *Transportation Research*, 12, 253-256, 1978.

- [39] Bates, J., Polak, J., Jones, P., Cook, A., The Valuation of Reliability for Personal Travel. *Transportation Research Part E*, 37, 191-229, 2001.
- [40] Strathman, J., Dueker, K., Kimpel, T., Gerhart, R., Turner, K., Taylor, P., Callas, S., Griffin, D., Automated Bus Dispatching, Operations Control and Service Reliability: The Initial Trimet Experience. *TransNow Report*, 1999.
- [41] Özuysal, M., Çalışkanelli S.P., Tanyel, S., Otobüs Duraklarındaki Yolcu Iniş-Biniş Zamanları Üzerine Bir Tartışma. *Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22 (6), 460-467, 2016.
- [42] Özuysal, M., Tanyel, S., Induced Travel Demand in Developing Countries: Study on State Highways in Turkey. *ASCE - Journal of Urban Planning and Development*, 134 (2), 78-87, 2008.

Baraj Yıkılması Sonrası İki Boyutlu Taşkın Yayılımının Yerleşim Bölgeleri İçin Modellenmesi

Şebnem ELÇİ¹
Gökmen TAYFUR²
İsmail HALTAŞ³
Bülent KOCAMAN⁴

ÖZ

Her ne kadar baraj yıkılması nadiren gerçekleşse de, aniden yıkılan bir barajın taşkın dalgasının mansapta bulunan yerleşim bölgelerinde etkisi felaketle sonuçlanabilmektedir. Bu sebeple muhtemel bir baraj yıkılmasının sonuçlarını öngörmek risk yönetimi açısından gereklidir. Bu çalışmada baraj yıkılması sonucunda oluşan taşkın dalgasının tahmini ve mansapta ilerlemesinin analizine yönelik bir yaklaşım sunulmuştur. Sunulan yaklaşım, barajların aniden yıkılma varsayımı ile baraj haznesindeki su hacminin bir-boyutlu model ile dar bir vadi boyunca ötelenmesini ve ötelenmiş hidrograf sınır şartı kabul edilerek mansabında yerleşim bölgeleri yer alan iki ayrı çalışma alanında taşkın dalgasının iki boyutlu yayılımının modellenmesini içermektedir. Önerilen yaklaşım mansabında Eskişehir bulunan Porsuk Barajı ile mansabında İstanbul olan Alibey Barajına uygulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Baraj yıkılması sonrası akım, taşkın dalgasının ötelenmesi, HEC-RAS, FLO-2D, Porsuk Barajı, Alibey Barajı.

ABSTRACT

Numerical Modeling of Two Dimensional Flood Wave Propagation in Residential Areas After the Dambreak

Although dam break failures are very rare events, dams can fail with little warning and the damage at the downstream of the dam due to the flood wave can be catastrophic. Therefore from risk point of view, understanding the consequences of a possible dam failure is critically important. This study discusses a methodology utilized for predicting the flood wave occurring after the dam break and analyzes the propagation of the flood wave

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 28.08.2015 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2017 gününe kadar tartışmaya açıktır.
- DOI: 10.18400/tekderg.307456

1 İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - sebnemelci@iyte.edu.tr

2 İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir - gokmentayfur@iyte.edu.tr

3 Zirve Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gaziantep - ismailhaltas@zirve.edu.tr

4 Turgut Özal Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - bkocaman@turgutozal.edu.tr

downstream of the dam. Proposed methodology is applied to two dams; Porsuk dam located in Eskişehir and Alibey dam located in Istanbul, Turkey.

Keywords: Dam break flows, flood wave propagation, HEC-RAS, FLO-2D, Porsuk Dam, Alibey Dam.

1. GİRİŞ

Nadiren gerçekleşen bir baraj yıkılması durumunda, özellikle baraj membasında büyük hacimli bir hazne barındırıyorsa mansapta oluşan taşkın dalgası erozyon ve/veya yapısal yıkıma sebebiyet verecek kadar şiddetli olabilmektedir. Baraj yıkılması sonucu oluşan felaket genellikle ani olmakta ve ölümlerle sonuçlanmaktadır. Venedik, İtalya’da bulunan 267 m yüksekliğindeki Vajont beton kemer barajının 1963’te yıkılması iki binden fazla insanın ölümüne yol açarak tarihteki en büyük baraj yıkılması felaketlerinden birini oluşturmuştur [1]. İspanya’da bulunan Tous kaya dolgu barajı ise 1982’de uzun süreli bir yağış sonrası yıkılarak köy ve kasabaların da bulunduğu 300 km²’lik bir alanın sular altında kalmasına sebep olmuştur. Taşkın dalgasının yüksekliğinin 7 m’ye ulaştığı felaket sonucu, 100,000 kişi mansap bölgesinden tahliye edilmiş olmasına rağmen sekiz kişi hayatını kaybetmiş ve toplamda 200,000 kişi bu felaketten etkilenmiştir [2].

Çin dışında dünyanın değişik yerlerinden 900 yıkılan barajın bilgisinin derlendiği bir çalışmada yıkılan barajların % 65.5’inin kaya dolgu, % 7.5’unun beton, % 6.7’sinin ise taş barajlar olduğu belirtilmiş, toprak dolgu barajların yıkılma sebepleri arasında % 42.5 oranda teknik kusur, % 36.5 taşma nedeniyle yıkımın gerçekleştiği, teknik kusurların ise % 58.3’ünün gövdede borulanma, % 18.3’ünün heyelan ve % 9.1’inin de dolusavaktaki yetersizlikler kaynaklı olduğu belirtilmiştir [3].

Dünyada yapılan riskli barajları belirleme çalışmalarına benzer şekilde ülkemizde de DSİ, 2002 yılında yaptığı bir çalışma ile yüksekliği 15m’den büyük ve yükseklikleri 5-15m arasında olup rezervuar hacmi 3 hm³’ten büyük olan barajları incelemiş ve yıkılmaları halinde yaratacakları kayıplar düşünüldüğünde %42’sinin en yüksek risk derecesinde, %43’ünün de önemli risk derecesine sahip olduğunu belirlemiştir [4]. Böylesi bir felaketle mücadele etmek için yapılacak planlama, yıkılma sonrası oluşacak muhtemel akım hızlarını ve taşkın dalgasının mansapta ne zaman nereye ulaşacağını tahminini içermeli ve mansapta yaşayan insanlarda felaketin muhtemel etkileri için farkındalık yaratabilmelidir.

Geçmişte genellikle bir boyutlu modellerin kullanıldığı baraj yıkılması sonrası taşkın dalgasının ötelenmesinin modellenmesine yönelik çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalarda, Amerikan Hidrolojik Mühendislik Merkezi (HEC) tarafından geliştirilen HECRAS ve Amerikan Ulusal Hava Servisi (NWS) tarafından geliştirilen FLDWAV modelleri birçok nehir ve dereye uygulanmıştır. Bu modeller doğal bir nehirde zamanla değişken akımı, su yüzeyinde küçük değişimler olduğu ve hidrostatik basınç dağılımı kabulüne dayanan bir boyutlu Saint Venant denklemleri yardımı ile çözebilmektedir. Saint Venant denklemlerinin uniform akım için kinematik dalga yaklaşımında ise momentum denkleminde tüm konumsal ve zamana bağlı değişkenler ihmal edilerek hidrografın yükselen ve alçalan eğrilerinde farklılık olmadığı kabulü yapılır [5]. Gerçekte ise zamanla değişen bir akımda, anahtar eğrisinin yükselen ve alçalan kısımlarında aynı debi için gözlenen seviyeler farklılık göstermektedir. Gerçek topoğrafyada taşkın dalgasının ilerlemesinin tahmini

zemindeki kuru/ıslak alan geçişleri, akımdaki süreksizlikler ve taban eğimindeki ani değişiklikler nedeniyle zorluklar taşımaktadır. Baraj yıkılması sonrası oluşan akım, modellenen alanda hidrolik sıçrama gibi süreksizlikler içerebileceği gibi, karışık (nehir-, sel-, kritik-) rejimlerde de mansapta ilerleyebilir. Taşkın dalgasının mansaptaki etkilerini incelemek için, basitleştirilmemiş haliyle dinamik denklemleri çözen iki boyutlu modeller, ya da bir boyutlu ve bu modellerin de karışık akım rejimlerine uyumlu modeller olması gereklidir.

1970'lerde kullanılmaya başlayan Coğrafi Bilgi Sistemleri (CBS) teknolojisi günümüzde sık ve yaygın olarak kullanılmaktadır. CBS verilerin düzenli bir şekilde toplanması, saklanması ve görüntülenmesinin yanısıra verilerin birbirleriyle ilişkilendirilebilmeleri açısından da analizlerde kolaylık sağlamaktadır. CBS günümüzde su kaynakları alanında da kullanılmakta, hidrolik modellerle integrasyonu sağlanarak nihai çözümler elde edilmektedir. Su kaynakları planlaması ve yönetiminde kullanım alanları arasında; toprak ve bitki örtüsü sınıflandırılması, arazi kullanımının belirlenmesi, havza sınırlarının belirlenmesi, baraj yeri seçimi ve hazne hacminin belirlenmesi, erozyon ve birikme tahminleri ve yeraltı suyu modellenmesi sayılabilir.

CBS teknolojisindeki ilerlemelerin su kaynakları modellemesine en büyük katkısı; modelde kullanılan parametrelerin havza alanındaki değişimlerinin modellenenebilmesine olanak sağladığı için model sonucu benzetimlerinin daha güvenli hale gelmesidir. CBS teknolojisindeki gelişmeler iki boyutlu sayısal modellerin taşkın dalgasının yayılımında sıklıkla kullanılmaya başlamasına neden olmuştur ki bu modeller arasında: Danimarka Hidrolik Enstitüsü (DHI) tarafından geliştirilen MIKE FLOOD, Mississippi Üniversitesi Ulusal Hidrobilim ve Mühendislik Merkezi tarafından geliştirilen CCHE2D-DAMBREAK, bir mühendislik firması tarafından geliştirilen iki boyutlu taşkın öteleme modeli olan FLO-2D ve Fransız Elektrik İdaresi (EDF) tarafından geliştirilen TELEMAR-2D en yaygın olan modellerdir.

CCHE2D-DAMBREAK modeli, Amerika'da askeriye'nin hidroloji ile alakalı çalışmalarında yaygın olarak kullanılmıştır. Model iki boyutlu sığ su denklemlerini (hidrostatik basınç kabulü ile) çözüm aşısında tanımlanabilen karmaşık topoğrafya üzerinde çözmektedir. FLO-2D ise akarsu ve yerüstü akışlarının simülasyonunu gerçekleştirebilen dinamik bir taşkın öteleme modelidir. Model, tam dinamik dalga momentum (*full dynamic wave*) ve hacim korunum (*volume conservation*) denklemlerini sonlu farklar (*finite difference*) yöntemi kullanarak kare ızgara elemanlar için çözmektedir. Böylece taşkın dalgasının hesaplama ağı sisteminde iki boyutlu yayılımını hesap etmektedir (<http://www.flo-2d.com/>). Standard model ücretsiz olarak dağıtıldığı gibi Amerikan Federal Acil Durum Yönetim Kurumu (FEMA) tarafından taşkın sigortalarını belirleyen çalışmalarda kullanılmaktadır.

Literatürde taşkın dalgasının ötelemesini mansap bölgesinde sayısal olarak modelleyen genelde bir boyutlu [6,7,8,9] ve az da olsa iki boyutlu [10,11,12,13] çalışmalar mevcuttur. Ticari yazılımların yanı sıra, araştırmacılar çalışmalarında kullanmak üzere kendi taşkın modellerini geliştirmişlerdir [14,15]. Bu modellerden LISFLOOD-FP; Bristol Üniversitesi ve AB Araştırma Merkezi işbirliği ile geliştirilmiş ve karmaşık topoğrafyalarda taşkın yayılımını iki boyutlu ve raster ortamda modelleyebilmektedir [14]. Yine son zamanlarda geliştirilen bir diğer model olan FLOW-R2D ise, iki boyutlu sığ su denklemlerini kullanmakta, karmaşık topoğrafya özelliklerini CBS verisi ile modele yansıtılabilmekte ve

akımdaki süreksizlikleri modelde tanımlayarak taşkın dalgasının iki boyutlu yayılımını modelleyebilmektedir [15]. Türkiye’de de araştırmacılar DAMBRK ve FLDWAV modellerini Türkiye’de bulunan barajlardan bazılarında uygulamışlar ve baraj yıkılmasının etkilerini bir boyutlu modellerle incelemişlerdir [16,17].

İtalya’da ise araştırmacılar eskiden yıkılması gerçekleşmiş barajların yıkılma sonrası muhtemel taşkın akımlarını modelleyerek taşkının mansapta yayılımını baraj özellikleri, arazi kullanımı ve topoğrafik haritalar yardımıyla tahmin etmişler ve tarihi verilerle kıyaslamışlardır [2,18,19]. Bir diğer çalışmada ise, laboratuvar ortamında basitleştirilmiş baraj yıkılması sonrası kanalda oluşan akım, Navier-Stokes denklemlerini çözen FLUENT Modeli ile sayısal olarak modellenmiştir [20]. Tüm bu çalışmalarda odak noktası farklı yıkım senaryoları altında dar bir vadide taşkın dalgasının ötelenmesinin modellenmesi olmuş ve mansap topoğrafya ve arazi kullanımının entegrasyonu sınırlı kalmıştır. Bu çalışmada ise yıkılma sonrası taşkın dalgasının mansaptaki yerleşim bölgelerinde yaratacağı etki üzerinde durulmuştur. Bu amaçla, barajların yıkılması sonucu oluşan hidrograflar ve dar vadiler boyunca ötelenmeleri HEC-RAS modeli ile, taşkın dalgasının mansapta iki boyutlu olarak yayılması ve İstanbul ve Eskişehir’deki yerleşim bölgelerine etkileri FLO-2D modeli uygulanarak araştırılmıştır.

2. ÇALIŞMA ALANLARI

İstanbul çok hızlı gelişmekte ve tüm hızlı gelişen şehirlerde olduğu gibi yerleşim alanlarının süratle arttığı bir şehir özelliği taşımaktadır (2014 itibarıyla nüfusu ~ 14 milyon). Alibey Barajı 1975-1983 arası içme suyu temini amacıyla inşa edildiğinde mansap bölgeleri kırsal alan iken hali hazırda barajın tüm mansap bölgesi meskenlerle kaplı hale gelmiştir. Alibey Barajı 30 m yüksekliğinde, ve 2 hm³ hacme sahip kaya dolgu baraj olarak yapılmış, normal su kotunda baraj haznesi 67 hm³ ve göl alanı 5 km²’dir [21]. Barajın en kötü senaryoya göre ani yıkılma durumunda yıkıcı etkisi çok büyük olacağından ve ölümlerle sonuçlanabileceğinden bu baraj çalışma alanı olarak seçilmiştir.

Çalışma alanı olarak belirlenen diğer bir baraj ise beton ağırlık baraj olarak olarak 1966-1972 yılları arasında 20 km mansabında bulunan Eskişehir şehrine (2014 itibarıyla nüfusu ~ 800,000) içme suyu temini, sulama ve taşkın kontrolü amaçları ile yapılan Porsuk Barajı’dır. Porsuk Barajı 50 m yüksekliğinde, ve 223 dm³ hacme sahip, normal su kotunda baraj haznesi 525 hm³ ve göl alanı 27.7 km²’dir [21]. Boyutları değerlendirildiğinde mansabında bulunan yerleşim yerlerine tehdit unsuru olarak olacağından çalışma alanı olarak seçilmiştir.

3. YÖNTEM

Bu çalışmada Alibey ve Porsuk Barajlarının yıkılması sonucu oluşacak taşkın dalgasının yayılımları sayısal model ile simüle edilmiştir. Sayısal model çalışması için; baraj göllerinin batimetri haritaları ve mansap bölgesi pürüzlülük haritası çıkartılmıştır. Batimetri haritaları sayesinde; baraj haznelerindeki su hacimleri ve dolayısı ile bir boyutlu model ile yıkılma hidrografları elde edilip, iki boyutlu sayısal modele girdi olarak vermek mümkün olmuştur. Taşkın dalgası mansap bölgesinde ilerlediği için bu bölgelerdeki pürüzlülük (evler, yollar, vs) haritaları da çıkartılmıştır. Sayısal model için girdi oluşturacak baraj gölü

batimetri haritaları ve mansap bölgesi pürüzlülük haritaları, aşağıda özetlendiği şekilde çıkartılmıştır. Barajlar ile ilgili hidrolojik raporlar ve hazne batimetrisinin çıkartılması için gerekli haritalar DSİ Plan ve Proje Etüd Dairesi'nden, yükseklik paftaları ise Harita Genel Komutanlığı'ndan temin edilmiştir.

3.1. Verilerin CBS ortamında oluşturulması

Günümüzde su kaynakları planlaması ve yönetiminde sıklıkla kullanılmakta olan CBS, bu çalışmada baraj haznelerinin batimetresinin çıkarılmasında, barajların mansap bölgelerinin sayısal yükseklik haritalarının ve arazi kullanım haritalarının oluşturulmasında kullanılmıştır.

3.2. Baraj yıkılmasının HEC-RAS ile hidrolik modellemesi

Baraj yıkılması HEC-RAS aracılığıyla üç adımda modellenmiştir: 1) Hazneye giren akımın hazne boyunca ötelenmesi, 2) baraj gediklenme özelliklerinin tahmini, 3) baraj mansabında akımın ötelenmesi. HEC-RAS modelinde taşkın haznede ötelenmesi, zamana bağlı değişen akımın kendisinin ötelenmesi ya da hazne seviyesinin ötelenmesi ile gerçekleşmektedir. Bu çalışmada sadece mabadaki hazne hacmi hesaba katıldığından, hazne seviyesinin ötelenmesi yöntemi baraj yıkılması sonucu oluşan taşkın akımının modellenmesi için yeterli bulunmuştur. Bu amaçla baraj hazne içerisinde yapısal olarak tanımlanmış, biriktirme alanı belirlenmiş ve mansaptaki nehir ile ilişkilendirilmiştir. Sonrasında ise nehir hazne içerisinde de iki kesiti bulunacak şekilde tanımlanmıştır. Bu kesitlerden biri baraj haznesine bağlanırken diğeri baraj için sınır şartı oluşturmuştur. Böylelikle simülasyonlar esnasında baraj haznesindeki değişken su seviyesi ile mansaptaki akarsu ilişkilendirilmiştir. Hazne için hacim – satıh eğrisi modele girdi olarak tanımlanmış, ve akarsu üzerindeki ilk iki kesidin minimum seviyeleri, haznenin minimum seviyesine eşitlenerek modeldeki oluşabilecek muhtemel kararsızlıklar (instability) engellenmeye çalışılmıştır.

İkinci aşama gediklenme parametrelerinin tahminini içermektedir. Daha önce de belirtildiği üzere baraj yıkılması genellikle taşma ve borulanmaya bağlı olarak gerçekleşmekte ve gediklenmenin iyi tanımlanması taşkın hidrografının doğru tahmini için önem teşkil etmektedir. Ancak muhtemel bir baraj yıkılması senaryosu modellenmeye çalışıldığından gediklenmenin yeri ve şekli konusunda belirsizlikler de mevcuttur.

Üçüncü aşama ise mansapta ötelenmenin modellenmesini içermektedir. HEC-RAS ile taşkın akımının mansapta akarsu boyunca ötelenmesini hassas bir şekilde modelleyebilmek için, kesit aralıklarının ve hesap zaman adımının doğru seçimi, pürüzlülüğün doğru tanımlanması ve mansap sınır şartlarının doğru belirlenmesi gerekmektedir. Daralma ve genişlemelerin, yatak eğimindeki değişimlerin, pürüzlülüğün ve debinin doğru girilebilmesi için taşkın ilerlediği mansap boyunca yeterli sayıda kesit tanımlanmalıdır. Maksimum kesit aralığı için denklem (1) referans kabul edilmiştir [22]:

$$\Delta x \leq \frac{0.15D}{s} \quad (1)$$

Denklem (1)'de D ana kanalın derinliği, S yatak eğimini belirtmekte ve Amerikan *Ordusu Mühendisler Birliği* (USACE) tarafından baraj yıkılması taşkın akımı modelleme çalışmaları için önerilen minimum kesit aralığı 15 m olarak verilmektedir. Hesap zaman adımı, çok uzun seçildiğinde modelde kararsızlık oluşturabileceğinden ve çok kısa seçildiğinde model simülasyonu çok uzun süreceğinden Courant koşuluna göre (Denklem 2) seçilmiştir.

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x_g}{V_w} \quad (2)$$

Burada Δt zaman adımını, Δx_g ızgara elemanı aralığı ve V_w taşkın dalga hızını göstermektedir. Pratik uygulamalarda taşkın dalga hızının, modelce hesaplanan maksimum ortalama hızın 1.5 katı alınabileceği belirtilmiştir [23].

Başlangıç koşullarının simülasyon öncesi tüm kesitlerde belirli olması gerektiğinden kullanıcının başlangıç debi veya seviyeleri tüm kesitlerde girmesi gerekmektedir. Akım düşük girildiğinde, zamanla değişen akım simülasyonu başladığında program barajın altında oluşan kararsızlık nedeniyle hazneden olduğundan daha fazla akım geliyormuş gibi hesap edebilmektedir. Aynı şekilde başlangıç hazne seviyesi önemli olup, bu seviye akarsu seviyesinden çok yüksek veya çok düşük girildiğinde akarsuya debi girişi/çıkışı yüksek olacağından simülasyon başlangıcında kararsızlıklara neden olmaktadır. Modelde kararsızlığa yol açan diğer bir etken de başlangıçta bilinmeyen mansap sınır şartıdır. Mansap sınır şartı için Manning denklemi ile tanımlanan normal derinlik ya da kararlı akım simülasyonundan elde edilen debi anahtar eğrisi kullanılmaktadır.

3.3. Taşkın dalgasının mansapta ova ve yerleşim bölgelerinde yayılmasının modellenmesi

Dar vadi boyunca tek boyutlu ötelenen taşkın akımının ova ve yerleşim yerlerinde iki boyutlu yayılımı FLO-2D ile modellenmiştir. FLO-2D akarsu ve yerüstü akışlarının simülasyonunu gerçekleştirebilen iki boyutlu dinamik bir taşkın öteleme yazılımıdır. Model sonlu farklar yöntemi kullanarak, tam dinamik dalga momentum ve hacim korunum denklemlerini kare ızgara elemanları için çözmektedir. Böylece iki boyutlu akım dalga yayılımı pürüzlülük özellikleri tanımlı her bir ızgara için hesaplanabilmektedir [24]. İki boyutlu modelin hesaplama sonuçlarından i) taşkın muhtemel yayılım alanı, ii) maksimum akım derinliği, iii) maksimum akım yüksekliği, iv) maksimum akım hızı ve v) maksimum akım derinliğine ulaşma zamanı her bir ızgara elemanı için hesaplama alanı dahilinde modellenmekte, elde edilen sonuçlar ArcGIS yazılımı kullanılarak haritalandırılabilir.

FLO-2D modelinde iki boyutlu model sınırları taşkın dalgasının sadece tanımlı topoğrafik özelliklere bağlı olarak serbest ilerleyebileceği şekilde belirlenir. Çok büyük bir hesap alanı belirlemek çok uzun hesaplama zamanı gerektirirken, hesap alanının çok küçük seçilmesi durumunda ise mansaptaki sınır şartı mabadaki taşkın akımına etki edeceğinden doğru sonuçlar vermeyecektir. Bu nedenle optimum bir hesap alanı seçmek gerekirken bu da genellikle simülasyon öncesi deneme ve yanılma yöntemi ile belirlenmektedir. FLO-2D değişken zaman adimli hesaplama yaptığından dolayı modelin kararlılığı üzerinde ızgara elemanın boyutunun herhangi bir etkisi yoktur. Ancak model simülasyon süresi ızgara

eleman boyutu küçüldükçe artar. Optimum ızgara boyutu için ise FLO-2D kullanıcı kılavuzu tarafından önerilen kriter kullanılmıştır [24]:

$$0.3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2 \leq Q_{\max}/A_{\text{grid}} \leq 3 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^2 \quad (3)$$

burada Q_{\max} ızgaradan geçen maksimum debiyi, A_{grid} ise ızgara alanını belirtmektedir. Bu çalışmada $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ 'lik bir ızgara alanı seçilmiştir. Her bir ızgara elemanı için CBS tabanlı, bitki örtüsü ve arazi kullanım karakteristiklerine bağlı Manning pürüzlülük değerleri tanımlanmıştır. Bir ızgara elemanının suyu biriktirme kapasitesinin göstergesi olan alan kısıtlama katsayısı (ARF) ise alanın yüzde kaçının binalar tarafından işgal edildiğine bağlı olarak 0 ile 1 arasında değişen değerlerle tanımlanmıştır. Örneğin üzeri tamamen yapılaşmış ve suyun basamadığı bir ızgara elemanı için $ARF = 1$ olmaktadır. Yerleşim alanları arka planda uydu fotoğrafları referans alınarak belirlenmiş ve ızgara elemanları için uygun ARF değerleri tanımlanmıştır. Modelin simülasyon süresi ise yapılan öncül simülasyonlar sonrası belirlenmiştir.

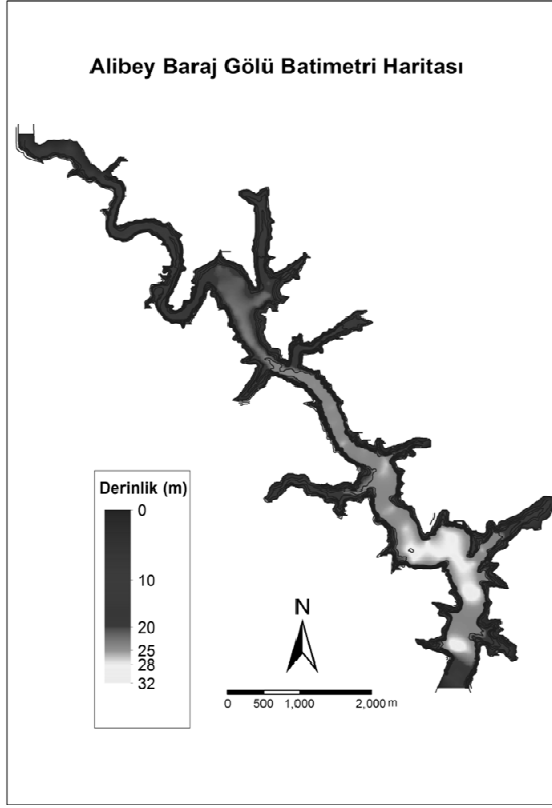
4. TAŞKIN DALGASININ MODELLENMESİ

4.1. Batimetri haritalarının oluşturulması

Alibey ve Porsuk Baraj Göllerine ait hidrografik haritalar (4 adet Alibey için ve 9 adet Porsuk için) basılı olarak DSİ Plan ve Proje Etüd Dairesi'nden temin edilmiştir. İlk aşamada bu haritalar koordinatlandırılmış, bu işlem için evvela **'arctoolbox'** arayüzündeki veri yönetim araçları sekmesi içerisindeki projeksiyon tanımlama aracı ile **'UTM-WGS 1984-Northern Hemisphere'** (Kuzey Yarımküre) ve **'zone 35N.prj'** seçilerek haritaların projeksiyonu seçilmiştir. Sonrasında ise **'georeferencing'** aracı içindeki kontrol noktası ekleme ikonu ile haritalardan koordinatları belli olan 4 köşe için konumlar girilerek haritaların koordinatlandırılması yapılmıştır. Daha sonra ise haritaları koordinatlı olarak kaydetmek için aynı araç altındaki **'rectify'** seçeneği ile gerekli düzeltmeler tamamlanmıştır [25].

Haritaları sayısallaştırma için ise depolama formatı oluşturularak eş yükselti eğrileri, derinlik ve baraj gölü katmanları yeni özellik sınıfları (featureclass) ile katmanlar oluşturularak yapılmıştır. Sayısallaştırmalar esnasında eş yükselti eğrileri için **'line'**, baraj gölü için **'polygon'**, derinlik için de **'point'** seçilmiştir. Bu katmanların da koordinatlandırılmasını takiben **'editor'** araç çubuğu yardımıyla eş yükselti eğrileri haritalardaki eğriler takip edilerek sayısallaştırma tamamlanmıştır.

Çizimi tamamlanan eş yükselti eğrilerinden DEM (yükseklik) haritası elde edilme işlemi yapabilmek için **'arctoolbox'** arayüzündeki üç boyutlu analiz aracı olan **'TIN management'** kullanılarak **'feature'** özelliği taşıyan eş yükselti eğrilerini **'raster'** olan DEM haritasına dönüştürmede aracılık yapan düzensiz üçgenler ağı (TIN) oluşturuldu. TIN oluşumu tamamlandıktan sonra; yine aynı arayüzdeki üç boyutlu analiz aracında bulunan çevirici kullanılarak TIN olan görüntü **'raster'** özelliği taşıyan görüntüye dönüştürüldü. Şekil 1 ve Şekil 2 yukarıda sırasıyla anlatılan işlemler sonucunda elde edilen Alibey Baraj Gölü ve Porsuk Baraj Gölü'ne ait batimetri haritalarını göstermektedir. Bu haritalara göre derinlik Alibey Baraj Gölü'nde 32 m'ye ve Porsuk Baraj Gölü'nde ise 54 m'ye ulaşmaktadır.

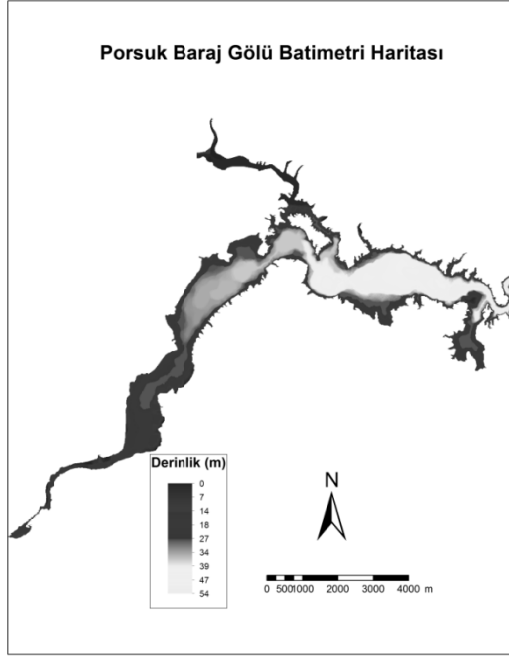


Şekil 1. Alibey Baraj Gölü'ne ait üretilmiş batimetri haritası

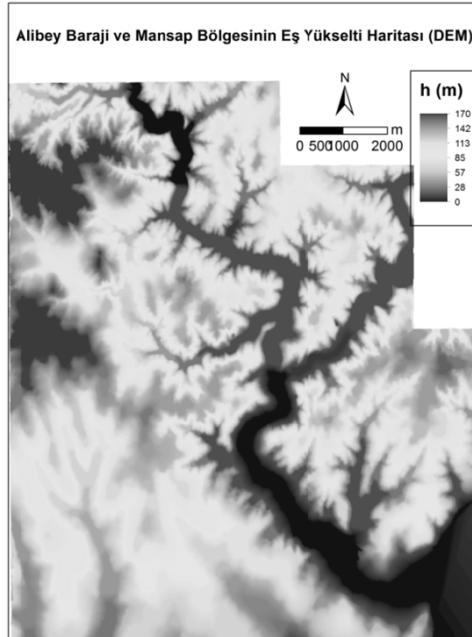
4.2. Pürüzlülük haritalarının oluşturulması

Harita Genel Komutanlığı'ndan temin edilen 1:25000 ölçekli yükseklik paftaları havza sınırının belirlenmesinde kullanıldı. Eşyüksekti eğrilerinden DEM (yükseklik) haritası elde edilmesi için yine 'arctoolbox' arayüzündeki üç boyutlu analiz aracı kullanılarak düzensiz üçgenler ağı (TIN) oluşturularak çevirici yardımıyla TIN olan görüntü raster özelliği taşıyan görüntüye dönüştürüldü. Şekil 3 ve 4 Alibey ve Porsuk Barajları mansap bölgeleri için oluşturulan eş yüksekti haritalarını göstermektedir [26].

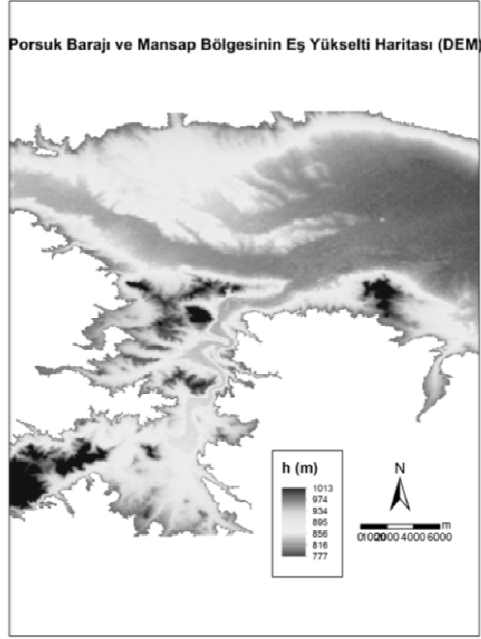
Oluşturulan havza sınırı katmanının Google Earth'e aktarılabilmesi için aynı arayüzdeki çevirici kullanılarak .kmz uzantılı dosyalar elde edildi. Bu şekilde havzaya ait uydu görüntüleri resim dosyaları olarak kaydedildi. Şekil 5 Alibey barajı ve mansabını içeren uydu görüntülerinin birleştirilmesini göstermektedir. Yukarıda da anlatıldığı gibi görüntülerin koordinatlanması takiben koordinatlı resim olarak kaydedilen uydu görüntüleri üzerinde 'arc catalog' arayüzü ile yol, bina, yeşil alan, baraj, baraj gölü ve nehir katmanları oluşturuldu ve 'editor' aracıyla sayısallaştırma işlemi yapıldı. Şekil 6 ve Şekil 7 bu aşamalar sonucu elde edilen ve iki boyutlu sayısal modele girdi teşkil eden Alibey ve Porsuk barajlarının ve mansap bölgelerinin pürüzlülük haritalarını göstermektedir [26].



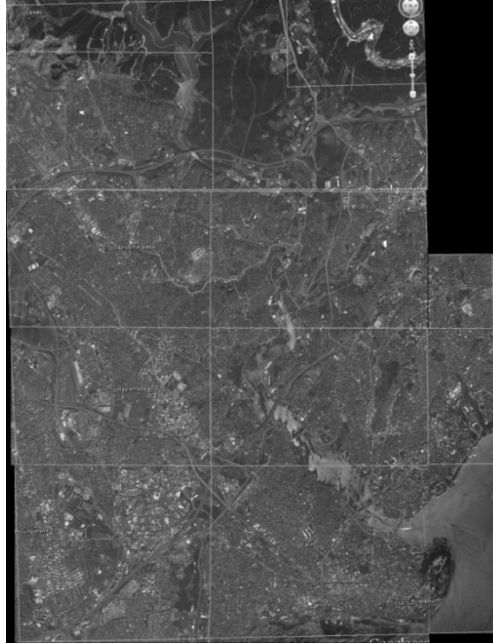
Şekil 2. Porsuk Baraj Gölü'ne ait üretilmiş batimetri haritası



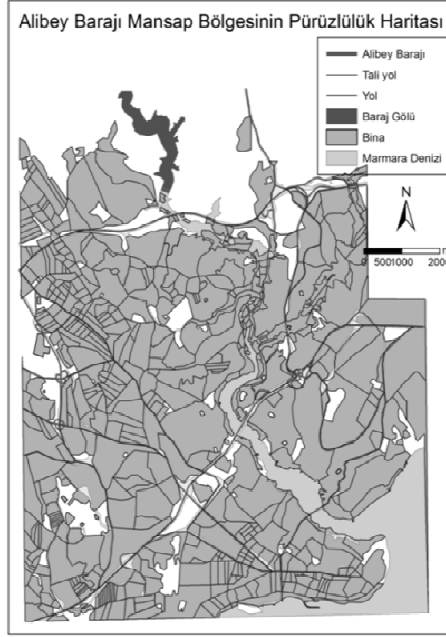
Şekil 3. Alibey Barajı ve mansap bölgesi için oluşturulan eş yükselti haritası



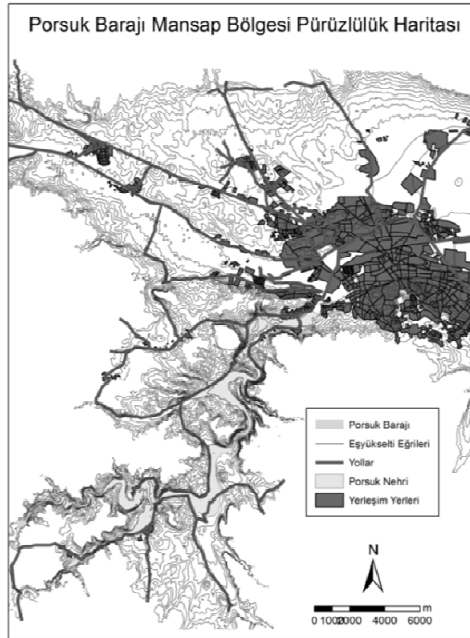
Şekil 4. Porsuk Barajı ve mansap bölgesi için oluşturulan eş yükselti haritası



Şekil 5. Alibey Barajı ve mansap bölgesini içeren uydu görüntülerinin birleştirilmesi



Şekil 6. Alibey Barajı ve mansap bölgesinin pürüzlülük haritası

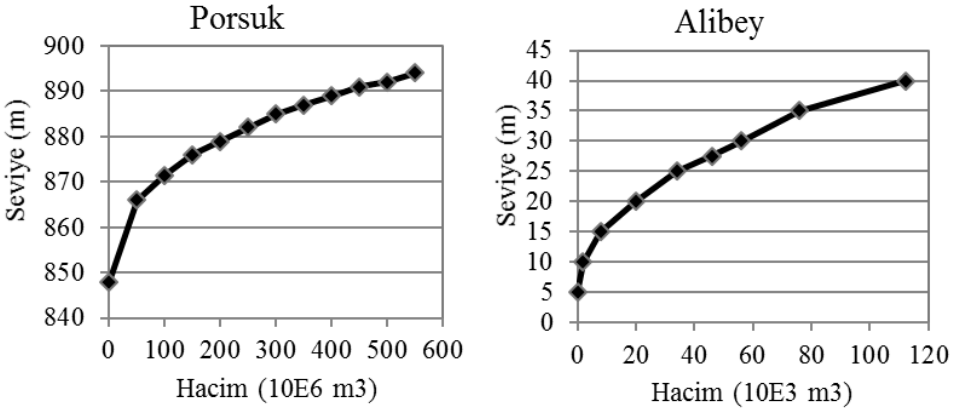


Şekil 7. Porsuk Barajı ve mansap bölgesinin pürüzlülük haritası

4.3. Baraj yıkılmasının ve oluşan taşkın hidrografının ötelenmesinin HECRAS'la modellenmesi

Barajların olası yıkılma sonrası oluşacak taşkın hidrografları HEC-RAS 4.1.0 programı kullanılarak üç aşamada modellenmiştir: i) Haznede giren akımın ötelenmesi, ii) baraj gediklenme parametrelerinin tahmini, iii) baraj mansabında taşkın akımının ötelenmesi. Sadece hazne hacmi hesaba katıldığından, hazne seviyesinin ötelenmesi yapılmıştır. Bu amaçla Alibey ve Porsuk baraj yıkılması simülasyonlarında kullanılan ve baraj göllerine ait batimetri haritalarından elde edilen yükselti-hacim eğrileri Şekil 8'de verilmiştir. Barajların gövdesine ait bilgiler ve baraj mansabında akarsu üzerinde alınan kesitlere ait bilgiler modele girdi verisi teşkil etmiştir. Baraj gölü su yüksekliği, hidrolik modelde memba sınır şartını oluşturmaktadır. Baraj gölünün yükselti-hacim eğrisi ise, baraj yıkılmasını modelleyen bent akış (*weir flow*) modülü için memba sınır şartını belirlemektedir. Borulanma türü yıkılmada orifis akım denklemi uygulanmakta ve borulanma katsayısı için de literatürde önerilen katsayı olan 0.5 [27] kullanılmıştır. Tablo 1'de seçilen barajlar için kullanılan diğer gediklenme parametreleri sunulmuştur.

Barajların mansap bölgeleri akarsular üzerinde belirli aralıklarla kesitler alınarak modellenmiştir. Bu kesitler, 'Hec-GeoRastool' arayüzündeki kesit oluşturma aracı ile oluşturulmuştur [27]. Kesitlere ait istasyon-yükselti bilgileri ise CBS ortamında eşyüksekti haritalarından interpolasyonla üretilmiş 1-metre aralıklı eşyüksekti eğrileri kullanılarak hesap edilmiştir. Kesitlerin yükseklik değerlerinin belirlenmesinde CBS ortamında üç boyutlu analiz aracıyla interpolasyon yaparak elde edilmiştir [27].



Şekil 8. Porsuk ve Alibey Baraj Gölleri için hacim- sath eğrileri

Alibey Barajı'nın mansabındaki Alibeyköy Deresi, 50 metre aralıklarla alınmış beş adet en kesit ile modellenmiştir (Şekil 9). Porsuk akarsuyu üzerinde ise nehir genişliğinin ortalama değeri olarak 45 metre uzunluğunda ve 100'er metre aralıklarla 67 adet kesit oluşturulmuştur (Şekil 10). Tüm kesitlerin yükseklik değerleri elde edildikten sonra kesitlerin başlangıç ve bitiş noktalarının koordinatları, nehir orta çizgisinin koordinatları ve

baraj gölü koordinatları not alınarak HEC-RAS'a girilecek veriler tamamlanmıştır. Hesaplanan taşkın hidrografları, ova ve yerleşim yerlerinde taşkın dalgasının yayılımının modellendiği iki boyutlu taşkın öteleme modelinde memba sınır şartı olarak girilmiştir. Porsuk barajı için tam yıkılma sonucu oluşturulan taşkın hidrografı Şekil 11'de ve bu hidrografın 6700 m ötelenmiş hali Şekil 12'de gösterilmiştir.

Tablo 1. Alibey ve Porsuk Barajları için gediklenme parametreleri

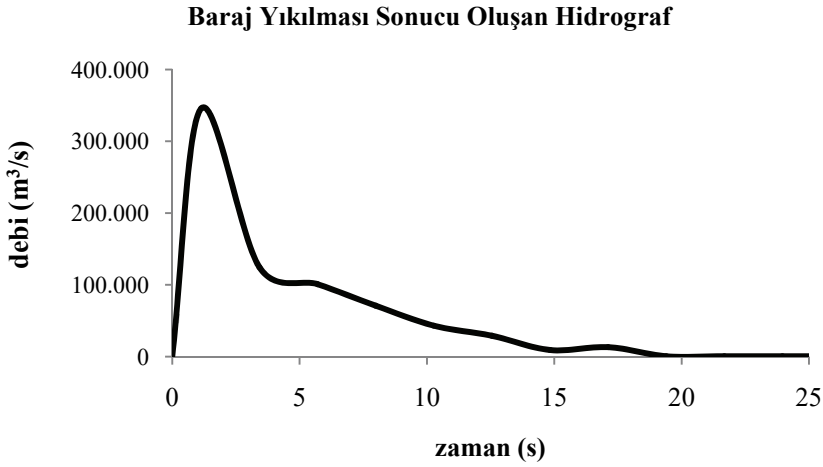
Parameters	Alibey Barajı	Porsuk Barajı
Baraj Gölü Seviyesi	30 m	870 m
Yıkılma Şekli	Borulanma	Aşarak
Borulanma Katsayısı	0.5	-
Baraj Tabanının Yıkılma Kotu	10 m	850 m
Baraj Tabanının Yıkılma Genişliği	75 m	60 m
Yıkılma Süresi	0.5 saat	0.7 saat
Borulanmanın Başlama Kotu	12 m	-



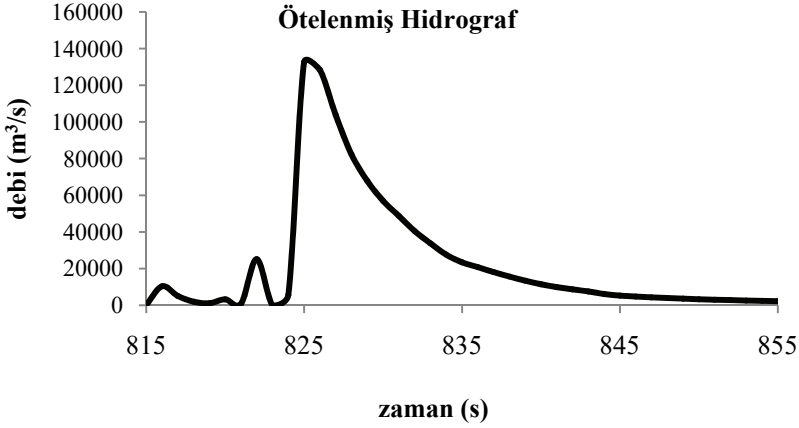
Şekil 9. Alibeyköy Deresi üzerinde oluşturulan kesitler



Şekil 10. Porsuk Çayı üzerinde oluşturulan kesitler



Şekil 11. Porsuk Barajı yıkılmasının ardından Porsuk Çayı üzerinde tanımlanmış ilk kesit üzerinde oluşan taşkın hidrografı

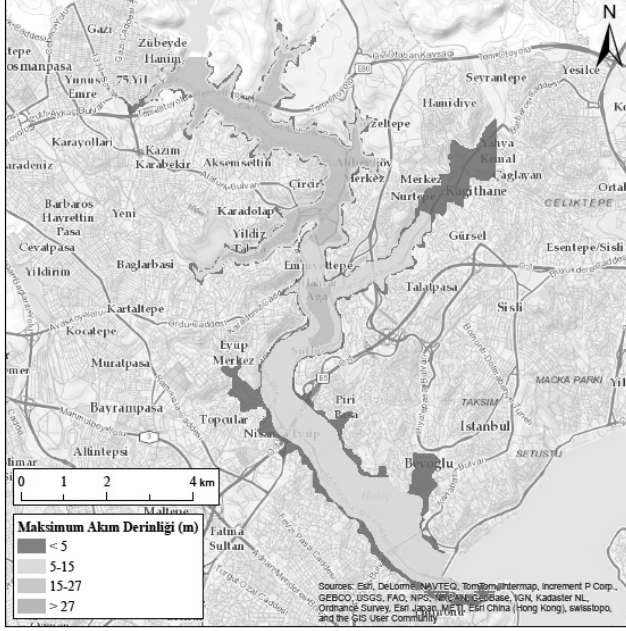


Şekil 12. Porsuk Çayı üzerinde tanımlanmış kesitler boyunca HEC-RAS ile ötelenmiş hidrograf

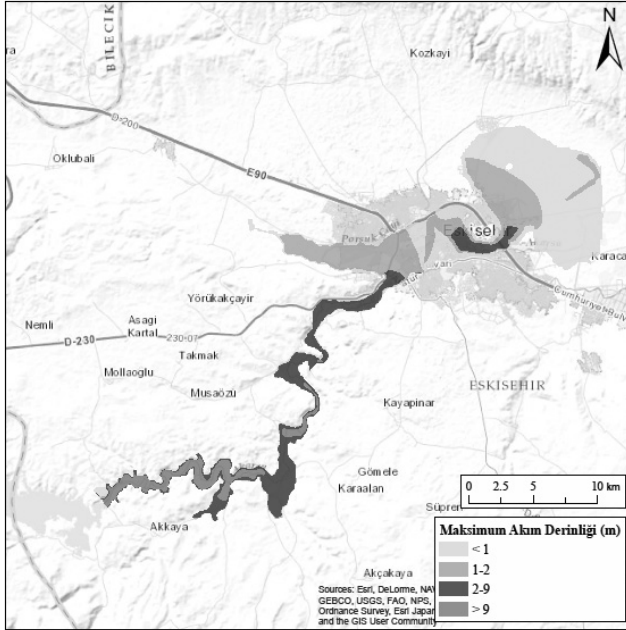
4.4. Taşkın dalgasının ova ve yerleşim yerlerinde yayılımının modellenmesi

Bir boyutlu modelden elde edilen taşkın hidrografları iki boyutlu taşkın öteleme modelinde memba sınır şartı olarak girilmiştir. Bitki örtüsü ve arazi kullanım özelliklerine bağlı olarak konumsal olarak değişken Manning pürürlülük katsayıları ızgara elemanları için yerleşim yerlerinde 0.02, kırsal alanlar için 0.04 olacak şekilde tanımlanmıştır. Bir ızgara elemanının yüzde kaçının binalar tarafından işgal edildiğine bağlı olarak 0 ile 1 arasında değişken değerler alan alan kısıtlama katsayısı (ARF) değerleri de arka planda uydu fotoğrafları referans alınarak belirlenmiştir. Öncül simülasyonlar sonrası taşkın dalgasının çalışma alanlarını ne kadar sürede terkettiği hesaplanmış, buna göre model Porsuk barajı için 11 saat, Alibey barajı için 3 saat için çalıştırılmıştır. Bu sürelerde pik debilerin model sınırlarına ulaştığı gözlenmiştir. Her bir ızgara elemanı için su derinliği, debi, ve akım hızı zamana bağlı olarak hesaplanmış, sonuçlar CBS shapefile formatına dönüştürülerek, FLO-2D'nin sonuç sunum arayüzü Mapper yardımıyla verilmiştir.

Modelden elde edilen ani yıkılma senaryosu sonuçları maksimum akım derinlikleri için Şekil 13 ve Şekil 14'te ve maksimum akım hızları için Alibey ve Porsuk barajları için sırasıyla Şekil 15 ve Şekil 16'da verilmiştir. Alibey barajının mansabında yerleşim alanlarında taşkın dalgasının maksimum akım derinliğinin 5 m'ye ve maksimum akım hızının 5 m/s'ye ulaştığı hesaplanmıştır. 0.3 m akım derinliğine sahip taşkın dalgasının yerleşim bölgesi sınırlarına ise 1 saatten daha az bir sürede ulaştığı görülmektedir (Şekil 17). Taşkın dalgasının su altında bıraktığı toplam alan yaklaşık 11.3 km² olup bunun 9.5 km² yerleşim alanıdır [28]. Porsuk barajının taşkın dalgası ise Eskişehir'in güneybatı sınırına (barajdan yaklaşık 20 km mesafede) 5.9 m maksimum akım derinliği ve 5.15 m/s maksimum akım hızı ile ulaşmaktadır. Taşkın dalgası vadinin yerleşim alanına açıldığı bölgede 0.3 metre akım derinliğine yaklaşık 2.3 saat içerisinde ulaşmaktadır (Şekil 18), sonrasında ise yerleşim alanına doğru yayılmaya başlamıştır. Şehir merkezine bakıldığında ise model sonuçlarına göre maksimum akım derinliği 3.55 m'ye ve maksimum akım hızı 3.4 m/s'ye ulaşmaktadır. Taşkın dalgasının su altında bıraktığı toplam alan yaklaşık 200 km² olup bunun 32.5 km²'si yerleşim alanıdır [29].



Şekil 13. Alibey Barajı yıkılması sonrası hesaplanan maksimum akım derinliği

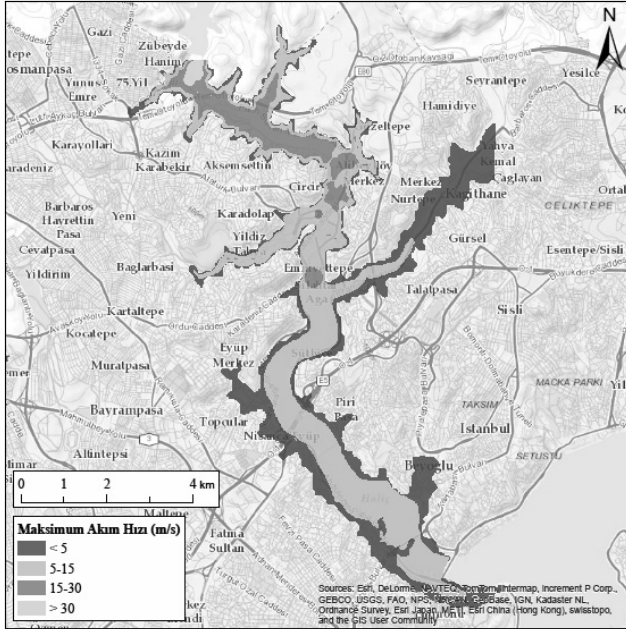


Şekil 14. Porsuk Barajı yıkılması sonrası hesaplanan maksimum akım derinliği

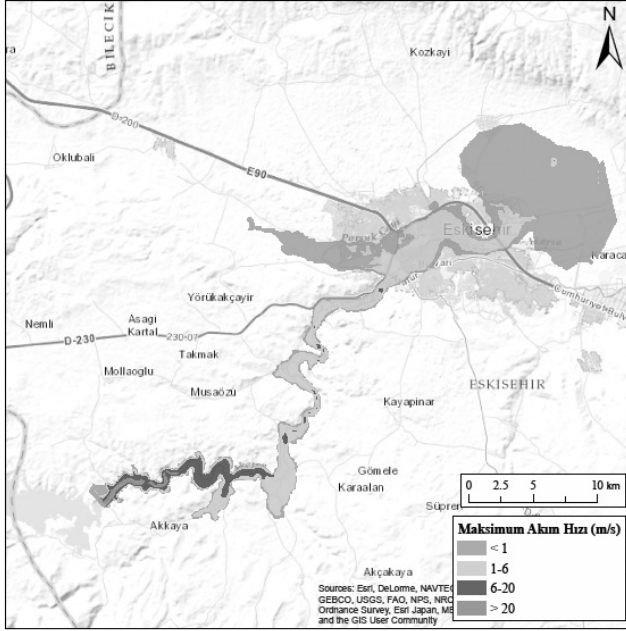
5. SONUÇLAR

Bu çalışmada Alibey ve Porsuk barajlarının ani yıkılma senaryoları kullanılarak mansapta oluşabilecek taşkın dalgasının maksimum akım derinlikleri, akım hızları ve maksimum akım derinliğine ulaşma süreleri çok aşamalı bir modelleme yaklaşımı ile hesaplanmıştır. Bu aşamalar barajın ani yıkılması sonucu taşkın hidrografının elde edilmesi, HEC-RAS ile taşkın hidrografının vadi boyunca ötelenmesi ve FLO-2D ile taşkın dalgasının ova ve yerleşim yerlerinde yayılımını içermektedir. Buna ilaveten, Alibey ve Porsuk Baraj Göllerinin batimetri haritalarının çıkarılışı ve barajların mansap bölgelerinin pürüzlülük haritalarının oluşturulması ve HEC-RAS modeli için gerekli coğrafi verilerin CBS teknolojileri kullanarak hazırlanması da bu makalede sunulmuştur.

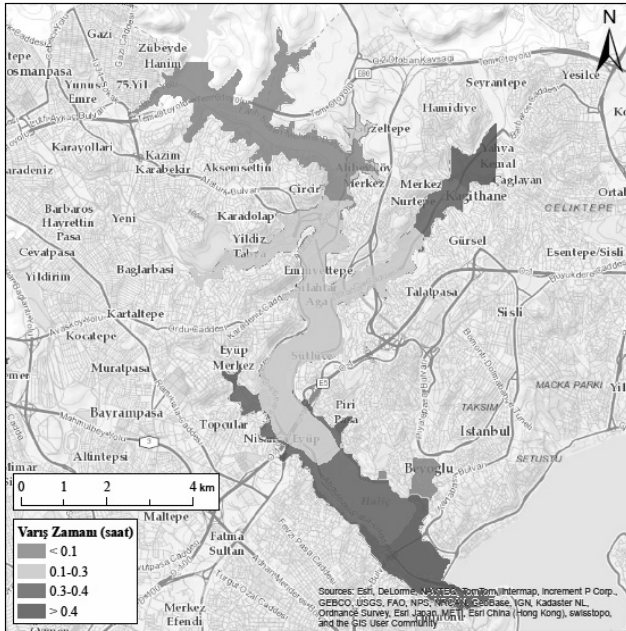
Ani yıkılma senaryosuna göre yapılan modelleme çalışması sonucu Alibey barajının mansabında yerleşim alanlarında taşkın dalgasının maksimum akım derinliğinin 5 m'ye ve maksimum akım hızının 5 m/s'ye ulaştığı hesaplanmıştır. 0.3 m akım derinliğine sahip taşkın dalgasının yerleşim bölgesi sınırlarına ise 1 saatten daha az bir sürede ulaştığı görülmüş, su altında kalan yerleşim alanı 9.5 km² olarak hesaplanmıştır. Porsuk barajının taşkın dalgası ise Eskişehir'in güneybatı sınırına 5.9 m maksimum akım derinliği ve 5.15 m/s maksimum akım hızı ile ulaşmaktadır. Eskişehir merkezine bakıldığında ise model sonuçlarına göre ise maksimum akım derinliği 3.55 m'ye ve maksimum akım hızı 3.4 m/s'ye ulaşmaktadır. Su altında kalan yerleşim alanı ise 32.5 km² olarak hesaplanmıştır.



Şekil 15. Alibey Barajı yıkılması sonrası hesaplanan maksimum akım hızları

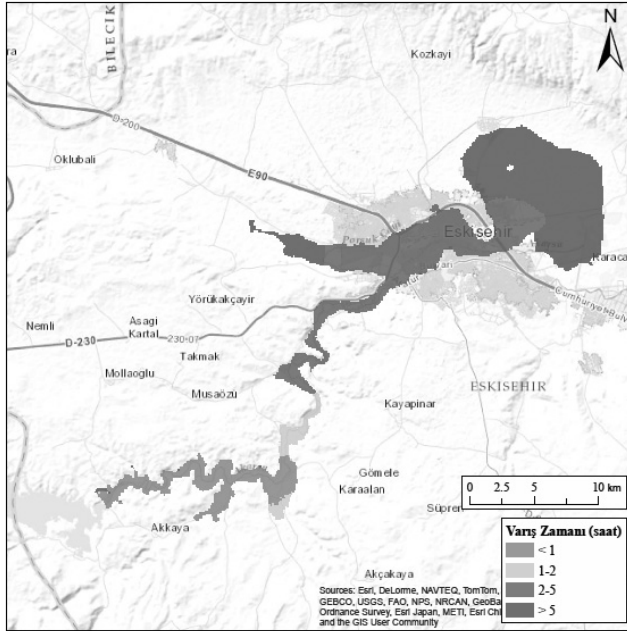


Şekil 16. Porsuk Barajı yıkılması sonrası hesaplanan maksimum akım hızları



Şekil 17. Alibey Barajı yıkılması sonrası hesaplanan maksimum akım derinliğine ulaşma süreleri

Bu sonuçlar ani yıkılma senaryolarına göre elde edilen öncül değerler olup, daha doğru ve hassas taşkın tehlike haritalarının oluşturulması için modeller özenli kalibrasyon işlemlerine tabi tutulmalıdır. Kalibrasyonu gerçekleştirilmiş çalışma sonuçları risk haritaları ve taşkın yönetim planlarının hazırlanmasında kullanılabileceği düşünülmektedir. Bu çalışmada hazne işletimi bilgisi, barajların yapısal durumu, olası gediklenme özellikleri ve muhtemel dolusavak işletim yetersizliği gibi birçok belirsizlik mevcut olduğu da ayrıca belirtilmelidir.



Şekil 18. Porsuk Barajı yıkılması sonrası hesaplanan maksimum akım derinliğine ulaşma süreleri

Semboller

- A_{grid} : Izgara alanı (m^2)
 D : Ana kanal derinliği (m)
 S : Yatak eğimi
 Q_{max} : Izgaradan geçen maksimum debiyi (m^3/s)
 V_w : Taşkın dalga hızı (m/s)
 Δt : Zaman aralığı (s)
 Δx : Kesit aralığı (m)
 Δx_g : Izgaralar arası mesafe (m)

Teşekkür

Bu makale 110M240 nolu TÜBİTAK destekli araştırma projesinden üretilmiştir. TÜBİTAK'a şükranlarımızı sunarız. Ayrıca, simülasyonun gerçekleştirilmesi için hidrolojik rapor ve batimetri bilgisini tarafımıza sağlayan DSİ Etüt ve Proje Dairesine (özellikle Dr. Bülent SELEK'e) teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Guney, M.S., Tayfur, G., Bombar, G. and Elci, S. 2014. 'Distorted Physical Model to Study Sudden Partial Dam Break Flows in an Urban Area.' J. Hydraulic Engineering, 140(11).
- [2] Alcrudo, F. and Mulet, J. 2007. 'Description of the Tous Dam break case study (Spain).' J. Hydraulic Research, 45, 45-58.
- [3] Zhang, L. M., Xu, Y., and Jia, J. S.: Analysis of earth dam failures-A database approach, Georisk, 3, 184-189, 2009.
- [4] Dinçergök, T., "The Role of Dam Safety in Dam-Break Induced Flood Management", Proceedings of International Congress on River Basin Management", pp: 682-697, March 2007, Antalya-Turkey.
- [5] Altınakar 2008. Report by Working Group on Dam Issues Related to Floodplain Management submitted to Association of State Flood Plain Managers.
- [6] Yanmaz, A.M., Seçkiner, G., and Özyayın, V. 2001. 'A Method for Optimum Layout Design of Concrete Gravity Dams', Water Engineering Research, International Journal of Korea Water Resources Association, Vol. 2, No:4, 199-207, October, 2001.
- [7] Macchione, F. 2008. 'Model for predicting floods due to earthen dam breaching. I. Formulation and Evaluation.' J. Hydraulic Engineering, 134(12), 1688-1696.
- [8] Petaccia, G. and Natale, L. 2008. 'Simulation of the SellaZerbino Catastrophic Dam Break.' In Altınakar, Kökpınar, Aydın, Çokgör and Kırkgöz (Eds) Riverflow2008, Volume 1, 601-607, Kubaba, ISBN 978-605-60136-1-4.
- [9] Froehlich, D.C. 2008. Embankment dam breach parameters and their uncertainties. J. Hydraulic Engineering, 134(12), 1708-1721.
- [10] Brufau, P., Vazquez-Cendon, M.E., Garcia-Navarro P. 2002. 'A numerical model for flooding and drying of irregular domains.' Int. J. Numerical Methods Fluids, 39, 247-75.
- [11] Singh, J., Altınakar, M.S. and Ding, Y. 2011 'Two-dimensional numerical modeling of dam-break flows over natural terrain using a central explicit scheme.' Advances in Water Resources, 34, 1366-1375.
- [12] Qi, H. and Altınakar, M. 2012. "GIS-Based Decision Support System for Dam Break Flood Management under Uncertainty with Two-Dimensional Numerical Simulations." J. Water Resour. Plann.Manage., 138(4), 334-341.
- [13] Mahdizadeh, H., Stansby, P.K. and Rogers, B.D. 2012. 'Flood Wave Modeling Based on a Two-Dimensional Modified Wave Propagation Algorithm Coupled to a Full-Pipe Network Solver.' Journal of Hydraulic Engineering, 138(3), 247-259.

- [14] Bates P., Trigg, M., Neal, J. and Dabrowa, A. 2013. LISFLOOD-FP User manual, University of Bristol. Retrieved from <http://www.bristol.ac.uk/media-library/sites/geography/migrated/documents/lisflood-manual-v5.9.6.pdf>
- [15] Tsakiris, G. and Bellos, V. 2014. 'A numerical model for two-dimensional flood routing in complex terrains.' *Water Resources Management*, 28, 1277–1291, doi:10.1007/s11269-014-0540-3.
- [16] Bozkus, Z. and Guner, A.I. 2001. 'Pre-event dam failure analyses for emergency management.' *Turkish J. Engineering and Environment*, 25, 627-641.
- [17] Bozkus, Z. and Bag, F. 2011. 'Çınarcık Barajının Sanal Yıkılma Analizleri.' *Teknik Dergi*, (in Turkish).
- [18] Pilotti, M., Maranzoni, A., Tomirotti, M., and Valerio, G. (2011). '1923 Gleno Dam break: Case study and numerical modeling.' *J. Hydraulic Engineering*, 137(4), 480-492.
- [19] Moramarco, T., Barbetta, S., Pandolfo, C., Tarpanelli, A., Berni, N. and Morbidelli, R. 2013. 'The spillway collapse of the Montedoglio dam on the Tiber River (central Italy): data collection and event analysis.' *J. Hydrologic Engineering*, (in press).
- [20] LaRocque, L. A., Imran, J., and Chaudhry, M. H. 2013. "Experimental and numerical investigation of two-dimensional dam-break flows." *J. Hydraul. Eng.*, 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000705, 569–579.
- [21] DSI, 2014. <http://www2.dsi.gov.tr/baraj/detay.cfm?BarajID=81>
- [22] Samuels, P.G. 1989. "Backwater lengths in rivers", *Proceedings -- Institution of Civil Engineers, Part 2, Research and Theory*, 87, 571-582.
- [23] USACE 2014. Using HEC-RAS for Dam-Break Studies. Report No: TD-39, USACE.
- [24] FLO-2D Users Manual. Documentation. Retrieved from <http://www.flo-2d.com/>
- [25] ESRI, 2011. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.
- [26] Elçi, Ş, Tayfur, G. Haltaş, İ. 'Baraj Yıkılması Sonrasında Taşkın Yayılımının Hesabı için Verilerin CBS Ortamında Hazırlanması: Porsuk ve Alibey Barajları Örnekleri ' *Uluslararası Katılımlı IV. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 159-170. 09-11 Ekim 2014, Elazığ.
- [27] HEC-RAS, 2010. User's Manual. USACE Hydrologic Engineering Center, Davis, USA.
- [28] Tayfur, G. , Haltaş, İ., Kocaman B., Elçi, Ş , 'Alibey Baraj Yıkılması Taşkın Dalgasının Simülasyonu' *Uluslararası Katılımlı IV. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 171-181. 09-11 Ekim 2014, Elazığ.
- [29] Haltaş, İ., Kocaman B., Tayfur, G., Elçi, Ş , 'Porsuk Barajı Yıkılması Taşkın Dalgasının İki Boyutlu Modellenmesi ve Haritalandırılması' *Uluslararası Katılımlı IV. Ulusal Baraj Güvenliği Sempozyumu Bildiriler Kitabı*, 183-188. 09-11 Ekim 2014, Elazığ.

Kiriş-Kolon Birleşim Bölgesinin Depreme Karşı Çelik Donatılarla Güçlendirilmesi

Hande GÖKDEMİR¹
Tuğrul TANKUT²

ÖZ

Çerçeve türü yapıların deprem davranışında kiriş-kolon birleşim bölgelerinin büyük zorlamalar taşıdığı, dolayısıyla bu yapıların deprem güvenliğinde önemli bir rol oynadığı bilinmektedir. Gerilmelerin sağlıklı biçimde taşınabilmesi için birleşim bölgesinde yoğun etriye kullanılması gerekmektedir. Bu bölgede yönetmelik gereği olan etriyenin yerleştirilmesi oldukça güç olduğundan, bu koşul çoğu zaman yerine getirilememektedir. Bunun sonucu olarak, var olan yapıların büyük çoğunluğunda kiriş-kolon birleşim bölgeleri deprem davranışı açısından son derece yetersiz bir durumdadır. Yeterli kesme donatısı taşımadığı bilinen bir kiriş-kolon birleşim bölgesinde, dışarıdan açılacak eğik deliklere çelik donatı çubukları yerleştirilerek oraya epoksilenmeleri ve her iki ucundan delik dışına kenetlenmeleri sonucunda, birleşim bölgesinde deprem etkisiyle oluşacak eğik asal çekme gerilmelerini güvenilir biçimde taşıyabilecek yeni ve etkili bir düzenleme gerçekleştirilebilir. Bu ilkenin çeşitli durumlarda kolayca uygulanabilir bir birleşim bölgesi güçlendirme tekniği olarak geliştirilmesi, bu araştırmanın ana amacını oluşturmaktadır. ODTÜ Yapı Mekaniği Laboratuvarı'nda deneysel çalışma olağan boyutlu bir çerçevenin bir dış birleşim bölgesini yansıtan T-biçimli ve yaklaşık 2/3 ölçekli deney elemanları üzerinde gerçekleştirilmiştir. İlk dördü referans deneyi olmak üzere; diğerleri birleşim bölgesinde epoksi kullanılarak çapraz şekilde, çelik donatılarla güçlendirilmiş toplam on bir adet deney elemanı test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kiriş-kolon birleşim bölgesi, çelik donatı, depreme karşı güçlendirme, epoksi.

ABSTRACT

Seismic Strengthening of Beam-Column Joints with Steel Bars

It is well-known that beam-column connections are subjected to high stresses during earthquakes. Therefore, design of these connections play an important role in designing an earthquake resistant structure. Stirrup spacing on beam-column connections should be

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 23.11.2015 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2017 gününe kadar tartışmaya açıktır.
- DOI: 10.18400/tekderg.307407

1 Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir - handeg@ogu.edu.tr

2 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - ttankut@metu.edu.tr

smaller in order allow for safety in carrying the stresses. Since the placement of ties required by the code in this region is rather difficult, this condition is fulfilled with difficulty. As a result of this difficulty, beam-column joints are in a very unfavorable state in terms of seismic behavior. In a beam-column connection which has no sufficient shear reinforcement, it is thought that additional reinforcement which is arranged by placing steel bars into inclined holes drilled from outside and anchored by epoxy can carry principal tensile stresses on beam-column connections. This experimental study was carried out at the METU Structural Mechanics Laboratory by using T-shaped test specimens reflecting an exterior joint region of a frame having normal dimensions to a scale of 2/3. In total, eleven elements were tested, four of which are reference specimens, while the others are strengthened at their joint regions with diagonal steel bars.

Keywords: Beam-column joints, steel bars, seismic strengthening, epoxy.

1. GİRİŞ

Yapılarda çerçeve elemanlarının deprem davranışı açısından bireysel olarak güçlendirilmesinde “Eleman Güçlendirme Teknikleri” kategorisinde yer alan çeşitli teknikler uygulanmaktadır. “Sistem Davranışı İyileştirme Teknikleri” uygulamalarındaki amaç ise çerçevelerden oluşan yetersiz yanal yük taşıyıcı sistemin yerine, rijit düzey elemanlardan oluşan yeni bir yanal yük taşıyıcı sistem oluşturmaktır. Bunun için ya deprem yüklerinin büyük bölümünü alarak mevcut yapıyı rahatlatan yeni elemanlar yerleştirilir ya da taban yalıtımı sistemleri ve sönmülcendirciler kullanılarak deprem etkilerinin yapıya aktarılması engellenmeye çalışılır.

Birinci kategoride yer alan eleman güçlendirme teknikleri arasında, kolonların, kirişlerin, perdelerin, döşemelerin ve temellerin güçlendirilmesine yönelik çeşitli teknikler bulunmasına karşın, giriş-kolon birleşimlerinin deprem için güçlendirilmesi amacıyla kullanılabilir çok elverişli, ekonomik, etkin ve pratik bir güçlendirme tekniğindeki gelişmeler yeterli değildir.

Oysa, çerçeve türü yapıların deprem yüklerine karşı davranışında, giriş-kolon birleşim bölgelerinin büyük zorlamalara maruz kaldığı bilinmektedir. Dolayısıyla bu bölgelerin güçlendirilmesinin önemi deprem güvenliği açısından ortaya çıkmaktadır.

Deprem kuvvetleri, birleşim bölgesinde büyük kesme kuvvetleri oluşturmakta, bunlardan kaynaklanan eğik asal çekme gerilmeleri de çatlamalara neden olmakta ve giderek birleşim bölgesindeki betonun dağılmasına yol açmaktadır. Bu gerilmelerin sağlıklı biçimde taşınabilmesi için birleşim bölgesinde yoğun etriye kullanılması gerekmektedir. Nitekim, yürürlükteki deprem yönetmeliği de; kolon ucundaki etriye sıklaştırma bölgesinde kullanılan yoğun etriyenin bir bölümünün, birleşim bölgesi içinde de sürdürülmesini önermektedir. Ancak, bu bölgede yönetmelik gereği olan etriyenin yerleştirilmesi oldukça güç olduğundan, yönetmelik gereği, genellikle çoğu zaman yerine getirilememekte ve birleşim bölgesine çoğu zaman hiç etriye konulmamaktadır. Bunun sonucu olarak, var olan yapıların büyük çoğunluğunda giriş-kolon birleşim bölgeleri deprem davranışı açısından son derece yetersiz bir durumdadır.

Özellikle yanal rijitlik yetersizliğinin çok yaygın olması nedeniyle, Türkiye’de, “Eleman Güçlendirme” yaklaşımı yalnız başına uygulandığında çoğunlukla başarılı, verimli ve

ekonomik olamamakta; bu yüzden “Sistem Davranışı İyileştirme” yaklaşımını temel alarak var olan kusurlu yapı elemanlarını deprem etkilerinden kurtararak yeterli duruma getirmeyi amaçlayan ve bu işlem gerçekleştirildikten sonra eğer hala kalmışsa kalan sınırlı sayıda yetersiz çerçeve elemanını güçlendirmekle yetinen bir güçlendirme stratejisi genellikle benimsenmektedir. Bu strateji izlendiğinde diğer yetersiz elemanlar gibi kiriş-kolon birleşimlerinin yetersizliği de önemini kaybetmekte ve kiriş-kolon birleşim bölgeleri yetersiz olan yapılar da çoğu zaman yeterli deprem güvenliğine kavuşturulabilmektedir.

Bununla birlikte Türkiye’de çok yaygın değilse bile, dünyanın birçok ülkesinde, yapıların depreme karşı güçlendirilmesinde “eleman güçlendirme” yaklaşımı yaygın olarak kullanılmaktadır. Dolayısıyla etkili, elverişli ve ekonomik bir birleşim bölgesi güçlendirme tekniği geliştirilmesine gereksinim bulunmaktadır.

Depremlerde yapılardaki birleşim bölgesinin taşıma kapasitesini arttırmak ve ani göçmeyi engellemek için kolay, ekonomik ve etkin yöntemler geliştirmek gerekmektedir. Güçlendirimin binalar boşaltılmadan ve bina sakinlerine rahatsızlık verilmeden hızlı bir şekilde yapılması da önemli olmaktadır. Birleşim bölgesi kırılmasından kaynaklanan göçmeleri önlemek için temel ilke, birleşim bölgelerinde önemli bir hasar olmaksızın, kirişte mafsallı oluşmasını sağlamaktır. Bu durum sağlandığı takdirde sünek bir davranış biçimi gerçekleşmiş olur.

Antonopoulos vd. [1], Ghobarah vd. [2], Prota vd. [3] kiriş-kolon birleşim bölgelerinde; CFRP (karbon fiber güçlendirmeli polimerler) ve GFRP (cam fiber güçlendirmeli polimerler) tabakaların kiriş-kolon birleşim bölgesine dıştan sarılmasıyla güçlendirme çalışmaları yapmışlardır. Bu tür birleşim bölgesi güçlendirme çabaları, gerçek anlamda birleşim güçlendirmesi olmadıkları gibi, uygulanabilir olmaktan da uzaktırlar. Gerçekte, kiriş ve kolon uçlarını sorgulamak anlamına gelen bu yaklaşımlar laboratuvardaki test elemanlarına kolayca uygulanabilirse de, döşeme plakları da içeren üç boyutlu çerçevelerin birleşim bölgelerine uygulanmaları pratik değildir. Taşlıgedik A.Ş. [4] CFRP ruloların bindirme boyu davranışı ile ilgili deneyler yapmıştır. Bu çalışma kapsamında; yeterli kesme donatısı taşımadığı bilinen bir kiriş-kolon birleşim bölgesinde, dışarıdan açılacak eğik deliklere çelik donatı çubukları yerleştirilerek oraya epoksilenmeleri ve her iki uçundan delik dışına kenetlenmeleri sonucunda, birleşim bölgesinde deprem etkisiyle oluşacak eğik asal çekme gerilmelerini güvenilir biçimde taşıyabilecek yeni ve etkili bir düzenleme gerçekleştirilebilir.

Gökdemir H. [5] çelik donatıların zayıf kiriş-kolon birleşim bölgesine çapraz olarak yerleştirilmesiyle gerçekleşen güçlendirme deneylerini ilk kez yapmıştır. Mevcut binaların kiriş-kolon birleşim bölgelerinde çok donatı bulunması halinde; çelik donatıların bir uçtan diğer uca geçmesi mümkün olamamaktadır. Bu durumda; karşılıklı iki taraftan çapraz ve çelik donatıların yerleştirilmesiyle bindirmeli ek içeren çalışmalar yapılmıştır. Malzemenin cinsi, miktarı, ankrajlanma şekli ve bindirme boyu araştırılan başlıca parametrelerdir. Hedeflenen amaç depremlerde en çok hasar gören betonarme yapıların kiriş-kolon birleşim bölgelerine kesme donatısı niteliğinde çelik donatı çubukları yerleştirilerek, birleşimin güçlendirilmesini sağlayan yeni ve pratik bir teknik geliştirmektir. Bu yöntemin uygulanmasıyla kiriş-kolon birleşim bölgelerinin kesme kuvvetlerine karşı dayanımı arttırılacak, kirişte mafsallı oluşması sağlanacak ve daha sünek bir davranış elde edilmiş olacaktır.

2. DENEYSEL ÇALIŞMA

2.1. Deney Elemanları

Kiriş-kolon birleşim bölgesine çapraz olarak yerleştirilen nervürlü donatılarla yapılan güçlendirme çalışmalarında dış kiriş-kolon birleşim bölgesi seçilmesinde, donatı oranlarının belirlenmesinde, deney elemanlarının boyutlarının belirlenmesinde ve deney düzeninin tasarımında, daha önce Kanada’da yapılmış olan bir çalışmadan Seçkin M. [6] kapsamlı biçimde yararlanılmıştır. Hipotetik prototip çerçeve göz önüne alınmış ve yapı bölgesi izole edilerek deney elemanları oluşturulmuştur.

Olağan boyutlu bir çerçevede bir dış birleşim bölgesini oluşturan ve kolonlar ile kirişin açıklıkları ortasında birer mafsal (moment sıfır noktası) bulunduğu varsayımı ile tanımlanan kolon ile kirişten oluşan ve kolon uç noktalarında mafsallanmış olan ve laboratuvar olanakları, yükleme ve ölçüm araçlarının kapasiteleri göz önünde bulundurularak deney elemanları için 2/3 ölçek kullanılması tasarlanmıştır.

Daha sonra, deney koşullarını basitleştirmek amacıyla, kirişin boyu kısaltılmıştır. Bu durumda; kesme daha kritik olacağından, yapılacak bir güçlendirmenin genel durumda daha başarılı olacağı düşünülmüştür.

Deney elemanları TS 500 ve Türk Deprem Yönetmeliği’ne göre hazırlanmıştır. B deney dizilerinde birleşim bölgesinde etriye kullanılmamıştır. Deney elemanlarının boyutları ve donatı düzeni Şekil 4’te gösterilmiştir.

Deney elemanlarının beton sınıfı C20’dir. Deney günü kırılan silindir numunelerin test sonuçları Tablo 1’de gösterilmiştir. Ve S420 donatıları kullanılarak deney elemanları tasarlanmış ve deney elemanlarının donatı özellikleri Tablo 2’de gösterilmiştir.

Çelik donatıların beton içine ankrajında epoksi kullanılmıştır. Epoksi, MBRACE Adesivo Saturant A & Saturant B’nin 1/3 oranında karıştırılmasıyla elde edilmiş ve uygulanmıştır.

Tablo 1. Deney günü kırılan numunelerin test sonuçları

Deney elemanı	f_{cm} (MPa)
PR	19.7
RL	20.8
RC	21.5
RU	21.4
S20B	21.3
S20W	22.2
S20	20.6
S16B	20.1
S20BL	21.4
S16BL	21.3
S14BL	20.9

Tablo 2. Deney elemanları donatı özellikleri

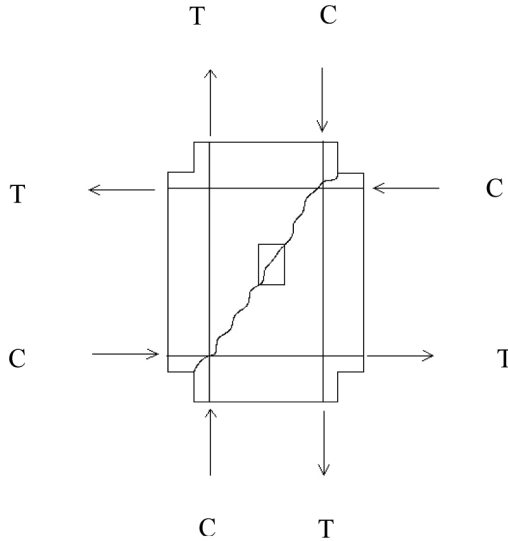
Donatı konumu	Sayı	Çapı ϕ (mm)	Özellik	Akma Dayanımı f_y (MPa)	Kopma Dayanımı f_u (MPa)
Kiriş boyuna	5	20	Nervürlü	536	623
Kolon boyuna	4	20	Nervürlü	536	623
Çapraz	4-8	16-20	Nervürlü	430-536	667-623
Etriye	32-36	8	Düz	360	490

Deprem yükünün çerçeveye soldan sağa etkimesi halinde; yatay yükler altında zorlanan kiriş-kolon birleşim bölgesine birleşen elemanlardan yani kolon ve kirişten aktarılan kuvvet çiftleri Şekil 1’de görülmektedir. Buradan, birleşim bölgesinin büyük zorlamalara maruz kaldığı anlaşılmaktadır.

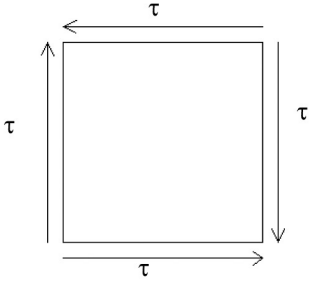
Kirişin üst tarafında oluşan kuvvetler birbirleriyle aynı yödedir. Alt kısmında oluşan kuvvetler de birbirleriyle aynı yönde fakat üstteki kuvvetlere göre ters yönde etki etmektedirler.

Kolonda da soldaki kuvvetler birbirleriyle aynı yönde, sağdaki kuvvetler de birbirleriyle aynı yönde fakat soldakine göre ters yönde etkimektedirler. Deprem yükleri; tersinir-yinelenir olduğundan, deprem yükünün çerçeveye sağdan sola etkimesi halinde, birleşimde oluşan tüm kuvvetlerin yönü, ters yönde değişmektedir.

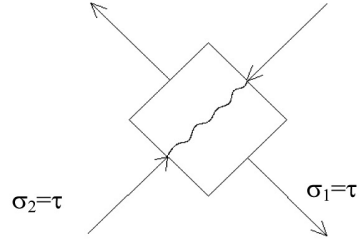
Kiriş-kolon birleşim bölgesinin ortasından bir eleman ele alındığında; bu elemanda oluşan kayma gerilmeleri Şekil 2’de, asal çekme gerilmeleri de Şekil 3’te gösterilmiştir.



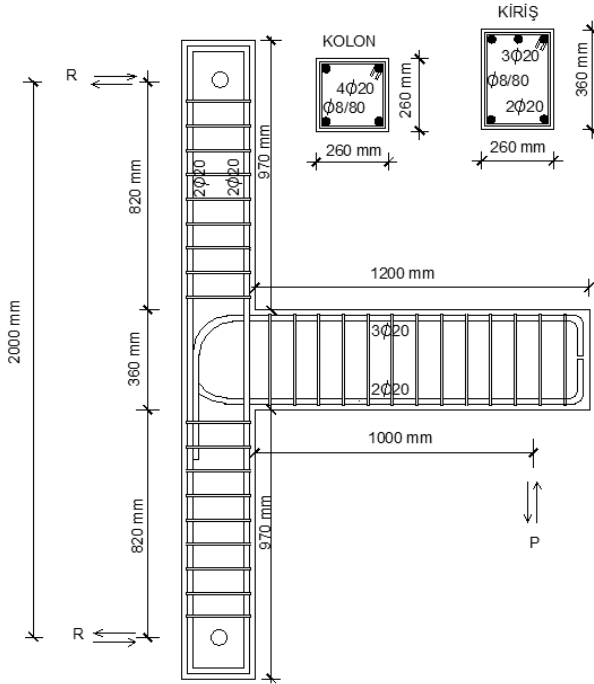
Şekil 1. Birleşim bölgesine birleşen elemanlardan aktarılan kuvvet çiftleri



Şekil 2. Kayma gerilmeleri



Şekil 3. Asal çekme gerilmeleri



Şekil 4. Deney elemanlarının boyutları ve donatı düzeni
(Birleşim bölgesi donatısı gösterilmemiştir)

Kiriş-kolon birleşim bölgesindeki çapraz donatılar kaynaklı ya da somunlu olarak ankrajlanmıştır. Somunlu ankrajlama Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. Çelik donatı uçlarının somunla tutturulması

S20BL, S16BL, S14BL deney elemanlarında ise donatılar birleşim bölgesine iki taraftan çapraz ve bindirmeli olarak yerleştirilmiştir. Bindirme boyu 400 mm (20 donatı çapı) ve bindirmeli donatılar arası mesafe 20 mm'dir.

Deney programı iki deney dizisinden meydana gelmiştir:

- (i) Referans dizileri,
- (ii) Çelik donatılarla güçlendirme.

Tüm deney dizileri ve donatı özellikleri Tablo 3'te gösterilmiştir. Tabloda da görüldüğü gibi aşağıdaki parametrelerin incelenmesi amaçlanmış ve deney serileri buna göre düzenlenmiştir.

- Kiriş-kolon birleşim bölgesinin davranış ve dayanımdaki etkisini incelemek için birleşime yerleştirilen etriye miktarının değişimi
- Çapraz çelik donatılarla birleşim bölgesini güçlendirme etkisi
 - Nervürlü donatıların uçlarının ankrajlanma şeklinin etkisi; somunlu, kaynaklı, serbest
 - Nervürlü donatı miktarının etkisi
 - Nervürlü donatıların yerleştirilme şeklinin etkisi; bindirmeli veya direkt

2.2. Deney Düzenegi

Mesnetleme ve yükleme düzenegi Şekil 7'de gösterilmiştir.

Kolon üstten ve alttan güçlü duvara mafsallanmıştır. Kolonun altına ve yük hücresinin üstüne yerleştirilen plakalara delikler açılmış, uçları kilitlenmiş halatlarla plakalar sıkıştırılarak, plakalar arasına yerleştirilmiş olan deney elemanına eksenel kuvvet uygulanmıştır.

Kolon eksenel yük taşıma kapasitesinin yaklaşık %20'si, kolonun üstünden eksenel yük olarak uygulanmış ve bu yük deneyin sonuna kadar sabit tutulmuştur.

Kiriş ucundan uygulanan tersinir-yinelenir yük çift tesirli hidrolik krikö, yük hücresi ve mafsallarla üstten kirişe alttan da güçlü döşemeye tutturularak sağlanmıştır.

Ölçüm aletlerinin yerleşim ve adlandırma düzeni Şekil 8’de gösterilmiştir. Yük-kiriş ucu deplasman grafiğinin yanında birleşim bölgesinde kesme deplasman ve moment eğrilik grafikleri çizilmiştir.

Tablo 3. Deney dizileri ve eleman özellikleri

Diziler	Deney Elemanları	Birleşim Bölgesi Donatıları	Birleşim Bölgesi Güçlendirme	Açıklama/Ankraj
A Referans	PR	-	-	Ön deney
	RL	-	-	Referans, alt düzey
	RC	Etriye, $\phi 8/80$ mm	-	Referans, yönetmelik
	RU	Etriye, $\phi 8/50$ mm	-	Referans, üst düzey
B Çelik Donatılı Güçlendirme	S20B	-	$2 \times 2\phi 20$ diyag.	Somunlu + epoksi
	S20W	-	$2 \times 2\phi 20$ diyag.	Kaynaklı + epoksi
	S20	-	$2 \times 2\phi 20$ diyag.	Serbest, sadece epoksi
	S16B	-	$2 \times 2\phi 16$ diyag.	Somunlu + epoksi
	S20BL	-	$2 \times 2\phi 20$ diyag.	Somunlu + epoksi, bindirmeli
	S16BL	-	$2 \times 2\phi 16$ diyag.	Somunlu + epoksi, bindirmeli
	S14BL	-	$2 \times 1\phi 20$ diyag.	Somunlu + epoksi, bindirmeli

2.3. Deney Sonuçları

Gökdemir H. [5] çalışmasındaki deney verileri kullanılarak çeşitli grafikler hazırlanmış ve bu grafikler dayanım, dayanımdaki azalma, süneklik, enerji tüketimi, rijitlik, rijitlik azalması ile ilgili olarak çizilmiştir.

Deney sonuçlarıyla ilgili detaylı bilgi bulunabilir. Kısa özet Tablo 4’te verilmiştir.

Güçlendirme çalışmalarında, birleşim bölgesinde çok önemli bir hasar olmadan kiriş eğilme donatılarının akması yani kirişte mafsallaşma oluşması amaçlanmıştır. Güçlendirmenin başarısı bu ölçüte göre değerlendirilmiştir. Tablo 4’te verilen değerler bu anlayışla yorumlanmaktadır.

Bu tabloda dört tür performansa göre değerlendirme yapılmaktadır. Bunlar: kapasite, süneklik, başlangıç rijitliği ve kiriş eğilme donatısının akıp akmamasıdır. Genel başarı bu dört kriter temel alınarak değerlendirilmiştir.

Kapasite oranı; en büyük yükün, kiriş eğilme donatısının akma yüküne oranı olarak tanımlanmıştır. (P_{maks} / P_y)

Süneklik oranı ise genelde yük-kiriş ucu deplasman grafiklerindeki en büyük yükün %85'ine karşılık gelen deplasmanın, akma anındaki deplasmana oranı olarak gösterilmektedir. Fakat yapılan deneylerde en büyük yükün aniden düşmesi ve eğimin değişmesi nedeniyle, bu yüke karşılık gelen deplasman değerleri grafiklerden tam olarak belirlenememiştir. Bundan dolayı en büyük yükteki ani düşme nedeniyle bu yükün %85 yerine, yaklaşık %60'ına karşılık gelen deplasman değerleri (δ_{60}) gözlenmiş ve Tablo 4'ün yedinci sütununda (δ_{60} / δ_y) oranı gösterilmiştir. Bu değer, gerçek sünekliği yansıtmasa da bir karşılaştırma oranı olarak anlamlı olduğu düşünülmüştür.

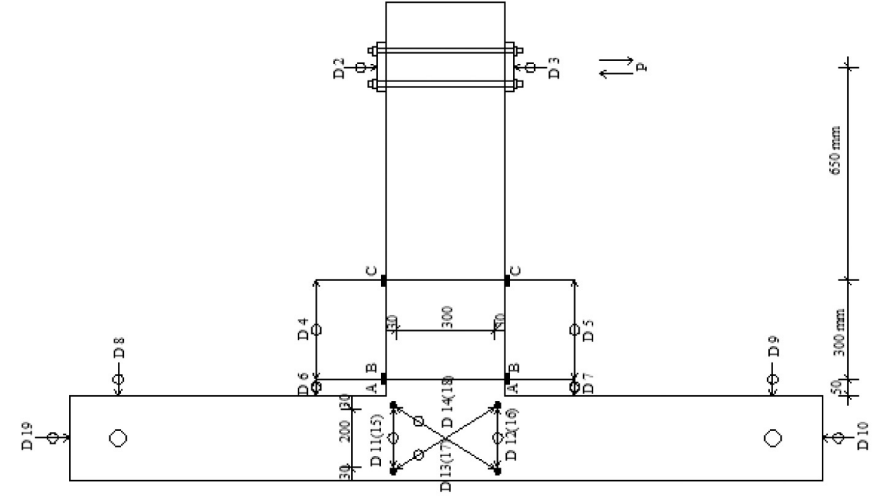
Eğilme rijitliği, moment-eğrilik ilişkisinin eğimidir. İdeal malzeme davranışına dayalı elastisite teorisinde $K=M/EI$ bağıntısı geçerli olduğundan, eğilme rijitliği EI olarak tanımlanır. Oysa davranışı ne doğrusal ne de elastik olmayan betonarme için bu basitleştirme geçerli değildir gerçek $M-K$ ilişkisinin eğimi göz önüne alınmalıdır.

Ancak, bu çalışmada yük-deplasman eğrisinin çıkış bölgesi eğimi, rijitliğin yaklaşık bir göstergesi olarak kullanılmıştır. Bu gösterge mutlak değerce doğru değilse de, tüm elemanlara uygulandığından bir karşılaştırma aracı olarak yeterlidir.

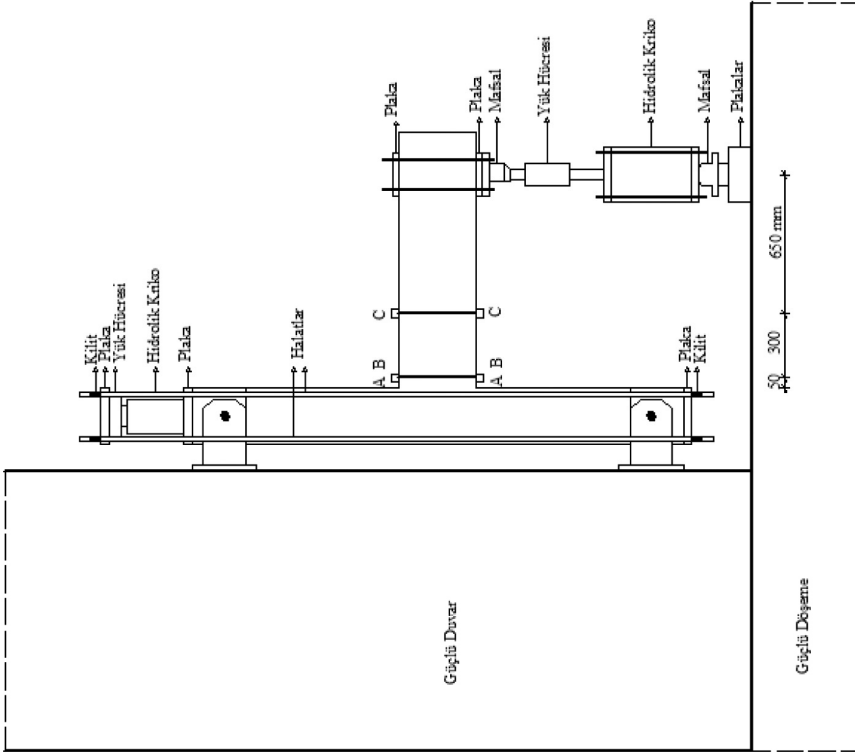
Kiriş-kolon birleşimindeki kiriş donatılarına yerleştirilen birim deformasyon ölçerlerden alınan okumalardan, kirişlerdeki eğilme donatılarının akıp akmadığı gözlenmiştir. Bazı deney elemanlarında ise kirişle kolonun birleştiği yüzeyde oluşan eğilme çatlaklarının büyüklüğü burada akma olduğunu doğrulamaktadır. Deney sırasındaki birleşim bölgesi hasarı ise Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Deney sırasındaki birleşim bölgesi hasarı (S20BL)



Şekil 8. Ölçüm atletlerinin yerleşim ve adlandırılması



Şekil 7. Mesnetleme ve yükleme dizeneği

Tablo 4. Deneysel elemanların sonuçları

Dizileri	Deneysel Elemanları	Birleşim Donatısı	P_{max} (kN)	Kapasite Oranı P_{max} / P_y	δ_y (mm)	Süneklik Oranı δ_{60} / δ_y	Rijitlik Oranı (kN/mm)	Kirş Donatısı	Genel Başarı	Birleşim Bölgesi Donatısı Yönetmelik Eşdeğeri
A Referans	RL	-	94	0.67	~17	~2.3	~8	Akmadı	Zayıf	Mevcut binaların çoğu
	RC	$\phi 8/80$ mm	111	0.79	~22	~3.4	~8	Akmadı	Yetersiz	$1.25 \times$ Yönetmelik donatısı
	RU	$\phi 8/50$ mm	144	1.02	~22	~4.1	~12	Aktı	Kabul edilebilir	$2 \times$ Yönetmelik donatısı
	S20B	$2 \times 2\phi 20$	137	0.98	~22	~3.5	~10	Aktı	Kabul edilebilir	$3 \times$ Yönetmelik donatısına eşdeğer
B Çelik Donatılı Güçlendirme	S20W	$2 \times 2\phi 20$	127	0.91	~22	~2.8	~10	Açık değil	Kabul edilebilir	$3 \times$ Yönetmelik donatısına eşdeğer
	S20	$2 \times 2\phi 20$	98	0.70	~17	~2.3	~10	Akmadı	Yetersiz	$3 \times$ Yönetmelik donatısına eşdeğer
	S16B	$2 \times 2\phi 16$	112	0.80	~24	~2.7	~10	Akmadı	Yetersiz	$2 \times$ Yönetmelik donatısına eşdeğer
	S20BL	$2 \times 2\phi 20$	136	0.97	~22	~2.7	~10	Aktı	Kabul edilebilir	$3 \times$ Yönetmelik donatısına eşdeğer
	S16BL	$2 \times 2\phi 16$	123	0.88	~22	~2.5	~10	Akmadı	Yetersiz	$2 \times$ Yönetmelik donatısına eşdeğer
	S14BL	$2 \times 1\phi 20$	116	0.83	~17	~3.0	~10	Akmadı	Yetersiz	$1.5 \times$ Yönetmelik donatısına eşdeğer

3. TARTIŞMA

Zarf eğrileri, yük-deplasman grafiğindeki giriş ucundan verilen tersinir-yinelenir yük durumu için tüm deneylerde iki farklı durumdaki deney dizileri birleştirilerek Şekil 9 ve 10'da sunulmuştur. Zarf eğrilerinde pozitif yük ve deplasman değerleri giriş ucundaki yükün yukarıdan aşağı verildiğini ve giriş ucu deplasmanın aşağı doğru olduğunu, negatif yük ve deplasman değerleri ise; giriş ucu yükün aşağıdan yukarıya verildiğini ve giriş ucu deplasmanın yukarı doğru olduğunu göstermektedir. Şekil 9 referans deneylerini içerir (Deney dizileri A); Şekil 10 çelik donatılarla güçlendirilmiş deney elemanları eğrilerini göstermektedir (Deney dizileri B). Eğrilerden son ikisi de referans deneylerinden alt ve üst sınır durumları içermektedir.

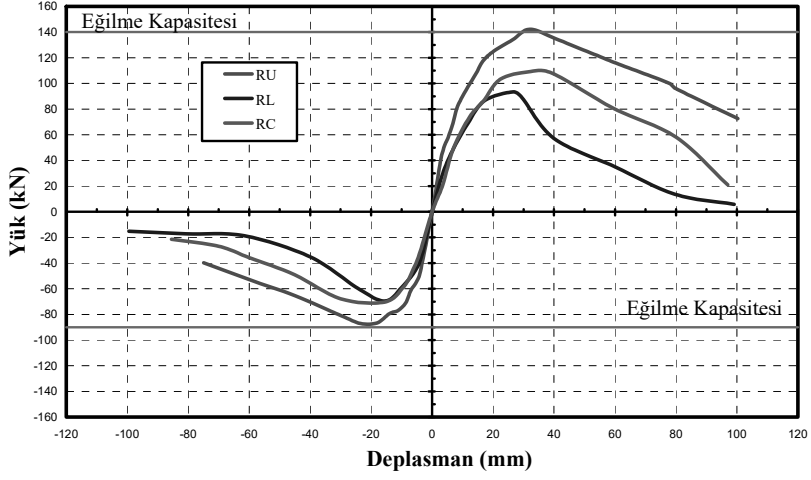
Bu grafikler üzerinde dikkatli ve hassas olarak yapılan bazı ilginç gözlemler Tablo 4'te verilen performans göstergeleri ile birlikte özetlenmiş ve kısaca aşağıdaki iki alt başlıkta ele alınmıştır.

3.1. Dizi A: Referans Deneyleri

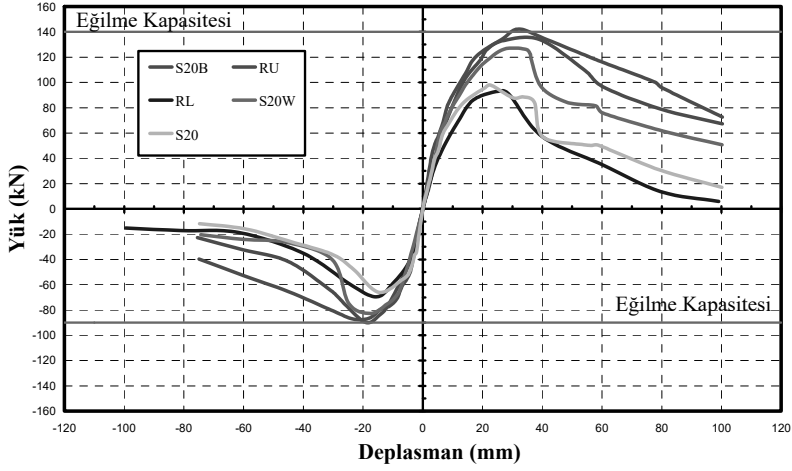
- Birleşim bölgesinde etriye bulunmayan (RL) deney elemanı beklendiği gibi yetersiz olmuştur.
- Birleşim bölgesinde etriye arttıkça, davranış ve dayanım doğal olarak iyileşmiştir.
- Yönetmeliğin öngördüğünden % 25 daha fazla birleşim donatısı (RC), yetersiz kalmıştır. Ancak yönetmelik donatısının iki katı kadar etriye konulduğunda, istenen davranış elde edilebilmiştir.

3.2. Dizi B: Çapraz Donatı ile Güçlendirme Deneyleri

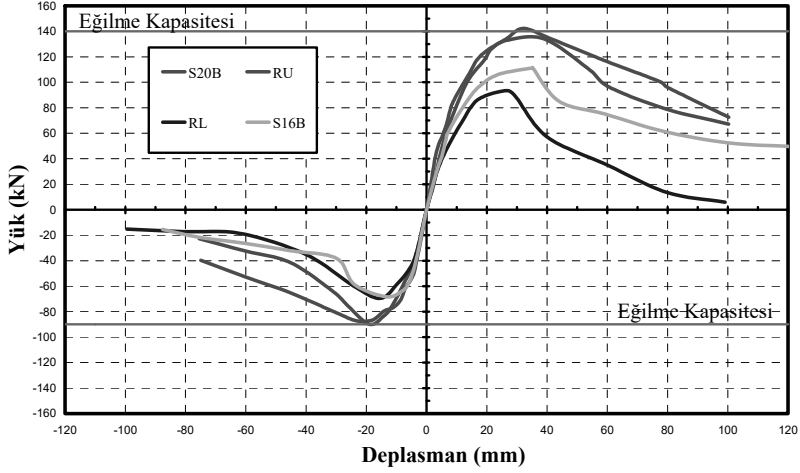
- Gerekli miktarda çapraz donatılar birleşim bölgesine yerleştirilir ve uçları uygun şekilde ankrajlanırsa performansın arttığı gözlenmiştir.
- Birleşim bölgesini çapraz donatılarla güçlendirmede (S20B & S20W) somunlu ya da kaynaklı olarak donatı uçlarını ankrajlama oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Fakat S20 deneyindeki gibi uçları ankrajlamadan, donatıları birleşim bölgesinden geçirmek yeterli olmamıştır.
- Çelik donatılarla yapılan güçlendirme çalışmalarında nervürlü donatıların miktarı önemlidir. S20B & S20W deneylerinde bir yöndeki çapraz donatılar, yönetmelik gereği olan birleşim donatısının (etriye) üç katı kadar uygulandığında oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. S16B & S16BL deneylerinde ise birleşim bölgesindeki donatı miktarının 1/3 oranında azalmasıyla kapasitede de 1/3 oranında azalma meydana gelmiştir.
- Çapraz donatıların bindirmeli olarak birleşim bölgesinden geçirilmesiyle oldukça başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Bindirmeli olarak uygulanan S20BL ve S16BL deney elemanları S20B ve S16B deney elemanlarıyla hemen hemen aynı sonuçları vermiştir.



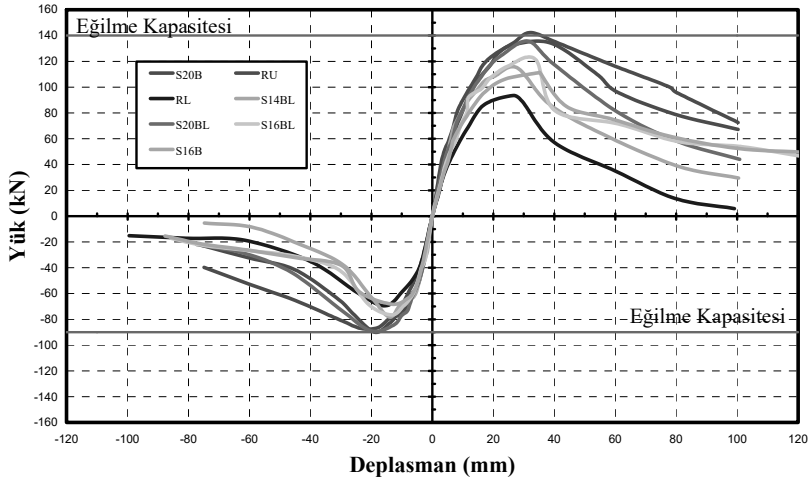
Şekil 9. Referans deney elemanları (Dizi A)



Şekil 10a. Çapraz donatı güçlendirme deneylerine ait zarf eğrileri



Şekil 10b. Çapraz donatı miktarına bağlı güçlendirme deneylerine ait zarf eğrileri



Şekil 10c. Bindirmeli donatı güçlendirme deneylerine ait zarf eğrileri

Şekil 10. Çapraz donatı ile güçlendirme deneyleri (Dizi B)

4. SONUÇLAR VE UYGULAMA İÇİN ÖNERİLER

Tipik bir betonarme yapının dış birleşim bölgesini gösteren, 2/3 ölçekli onbir deney elemanı üzerinde yapılan birleşim bölgesi güçlendirme çalışmalarından etkili ve başarılı olarak elde edilen sonuçlar aşağıda belirtilmiştir.

4.1. Sonuçlar

- Yönetmeliğin öngördüğünden % 25 daha fazla birleşim donatısı (RC), kirişin akmasına ulaşmayı sağlayamamıştır. Yönetmelik donatısının iki katı kadar etriye konulduğunda, kiriş donatısının akma konumuna gelmesi ancak sağlanabilmiştir; kirişte mafsallaşma-birleşimde ezilme türü bir bileşik kırılma elde edilebilmiştir. Bu gözlem yönetmelikte öngörülen birleşim donatısının bazı durumlarda yetersiz kaldığını göstermesi bakımından çok önemlidir. Ancak, deney elemanının en elverişsiz durumları yansıttığı, kuşatılmamış birleşim olduğu ve yüksek kesme kuvvetine maruz kaldığı anımsanırsa, bu yetersizliği, kesin bir yargıya dönüştürmek doğru değildir. Bu sonucun, yönetmelik yapanlar tarafından dikkate alınmasının uygun olacağı düşünülmektedir.
- Birleşim bölgesi güçlendirilmesi için önerilen bu teknik oldukça etkili ve pratiktir. Çapraz olarak iki yönde yerleştirilen nervürlü donatıların, kesme donatısı olarak performansı arttırdığı gözlenmiştir. Ancak, sargılama etkisi olmadığından, birleşim bölgesine yerleştirilen etriyelerin yerini tutamayacağı gözönünde bulundurulmalıdır.
- Önerilen teknikte kiriş-kolon birleşim bölgesini güçlendirmede çelik donatılar etkili bir biçimde kullanılabilir.
- Çelik donatılar uygun şekilde uçlarından ankrajlanmalıdır.
- Bindirmeli çapraz çelik donatılarla yapılan güçlendirme çalışmalarından, iki ucundan kenetlenmiş çapraz donatıyla yapılan güçlendirmelere eşdeğer sonuçlar alınmıştır.
- Deney elemanı, “yanal ötelenmesi önlenmiş” bir çerçeveden çıkarılmıştır. Bu çalışma öncü bir çalışmadır. Ayrıca ileride yapılacak olan “yanal ötelenmesi önlenmemiş” çerçeve davranışını içeren daha karmaşık deney düzeneklerinin kurulmasında yararlı olacağı düşünülmektedir.
- Tabla donatısının katkısıyla, kirişin eğilme kapasitesi yükseleceğinden, kirişte mafsallaşma zorlaşacak, birleşim bölgesi dayanımının daha da yüksek olması gerekecektir. Ancak, yukarıda da belirtildiği gibi bu bir öncü çalışmadır. Bu deneylerin ileride yapılacak tablalı eleman deney çalışmalarına katkı sağlayacağı amaçlanmıştır.

4.2. Uygulama İçin Öneriler

- Betonarme yapıların güçlendirilmesinde iki çeşit uygulama vardır. (i) Eleman Güçlendirme Teknikleri, yapılarda çerçeve elemanlarının deprem davranışı açısından bireysel olarak güçlendirilmesi ve (ii) Sistem Davranışı İyileştirme Teknikleri uygulamalarındaki amaç ise, mevcut yanal yük taşıyıcı sisteme aktarılan deprem etkilerini azaltmaktır. Bunun için ya deprem yüklerinin büyük bölümünü alarak mevcut yapıyı rahatlatan, yeni elemanlar yerleştirilir ya da taban yalıtımı sistemleri ve sönümlendiriciler kullanılarak deprem etkilerinin yapıya aktarılması engellenmeye çalışılır. Önerilen teknik elemanların bireysel olarak güçlendirilmesiyle yapılan ilk gruba girmektedir.
- Mevcut birçok yapının depreme karşı güçlendirilmesi gerekmektedir. Kiriş-kolon birleşim bölgelerinin çelik donatılar ile güçlendirilmesinde, önerilen tekniklerden oldukça başarılı sonuçlar elde edildiğinden, bu teknikler güçlendirme çalışmalarında uygulanabilir.

- Çelik donatılarla yapılan güçlendirme çalışmalarında uygulama kolaylığı açısından daha az sayıda, büyük çapta nervürlü donatıların kullanılması tercih edilmelidir. Genel kural olarak bir yöndeki çapraz donatıların çekme kapasitesi (donatı alanıyla çeliğin akma dayanımının çarpımı), yönetmelik gereği olan birleşim donatısının eğik doğrultudaki çekme kapasitesinin üç katına eşdeğer olmalıdır (birleşim bölgesindeki etriye sayısı, her etriyenin iki kolu, etriye alanı, etriyenin akma dayanımı ve yaklaşık olarak $\cos 45^\circ$ kabul edilerek 0.7 ile çarpımının üç katı kadar).
- Güçlendirilecek birleşim bölgesinin geometrik çizimi ve incelenmesi yapılmalıdır. Bölgede mevcut olan donatıların yerleri dedektörlerle belirlenerek çizimde işaretlenmelidir.
- Bazı birleşim bölgelerinde mevcut olan yoğun çelik donatılar nedeniyle bir köşeden diğer köşeye matkap ile tek doğrultuda delmenin yapılamaması durumunda; karşılıklı köşelerden iki paralel delik açılarak, çelik donatılar yerlerine bindirmeli olarak yerleştirilmelidir.
- Çelik donatılarla güçlendirme çalışmalarında, uçlardan ankrajlamayı somunlu veya kaynaklı olarak yapmak için bazı profil ya da plakalar gerekmektedir. Bu parçaların uygulamadan önce hazırlanmasına gereksinim duyulmaktadır.
- Hazırlıklar tamamlandığı zaman çelik donatılar, beton içinde önceden açılmış olan deliklere yerleştirilmeden önce boşluğun içine epoksi enjekte edilmelidir. Epoksili boşluğun içine, epoksi sürülmüş çelik donatılar yavaş yavaş döndürülerek yerleştirilmelidir. Somunla yapılan güçlendirmede, dışarıda kalan dış açılmış donatı uçları, somunlar yavaşça sıkılmak suretiyle plakalara tutturulmalıdır. Kaynaklı ankraj işleminde ise; epoksiyi yakmamak için kaynak yapılırken devamlı su ile soğutma yapılmalıdır.

Kaynaklar

- [1] Antonopoulos, C. P., Triantafillou, T. C., Exp Investigation of FRP Strengthened RC Beam-Column Joints, *Journal of Composites for Construction*, 344(7), 39-49, 2003.
- [2] Ghobarah, A., Said, A., Seismic Rehabilitation of Beam-Column Joints Using FRP Laminates, *Journal of Earthquake Engineering*, 5(1), 113-129, 2001.
- [3] Prota, A., Nanni, A., Manfredi, G., Cosenza, E., Selective Upgrade of Under-designed RC Beam-Column Joints Using CFRP, *ACI Structural Journal*, 101(11), 699-707, 2004.
- [4] Taşlıgedik, A.Ş., Lap Splice Behaviour of CFRP Rolls, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, 2008.
- [5] Gökdemir, H., Kiriş-Kolon Birleşimlerinin Depreme Karşı Güçlendirilmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Eskişehir, 2009.
- [6] Seçkin, M., Hysteretic Behaviour of Cast-in-Place Exterior Beam-Column Sub-Assemblies, Doktora Tezi, Toronto Üniversitesi, Toronto, Kanada, 1981.

Uydu Kaynaklı Yağmur Verilerinin Hata Oranlarının Deniz Kıyılarına Olan Uzaklığa Bağlı Analizi

Meriç YILMAZ¹
Muhammad AMJAD²
Burak BULUT³
M. Tuğrul YILMAZ⁴

ÖZ

Bu çalışmada, Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM, Tropik Yağmur Ölçme Misyonu) 3B42 v7 uydu kaynaklı aylık yağmur verileri, Meteoroloji Genel Müdürlüğü tarafından işletilen 257 adet gözlem istasyonunda 1998 - 2014 yılları arasında ölçülen yağış verilerinin aylık kümülatif toplamları kullanılarak doğrulanmıştır. İstasyon ve uydu kaynaklı yağış verilerinin uzun dönem ortalama değerleri, birbirleri arasındaki korelasyonları, aylık ortalama ve anomali bileşenlerinin standart sapmaları ile uydu verilerinin hata oranlarının standart sapmaları incelenmiştir. Uydu verilerinin hata oranlarının yüksekliğe ve kıyılara olan uzaklığa bağlı değişimi çalışmanın odak noktası olmuştur. Bulgular, özellikle uydu kaynaklı yağmur verilerinde anomali bileşeni hata oranlarının düşük kotlu bölgeler ve kıyı kesimleri için yüksek kotlu bölgeler ve iç kesimlere kıyasla çok daha yüksek olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Uzaktan algılama, istasyonda ölçülen yağış, uydu kaynaklı yağış hata oranı.

ABSTRACT

Investigation of the Dependence of Satellite-Based Precipitation Estimate Errors to Distance from the Coastline

In this study, Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) 3B42 v7 satellite based rainfall data are verified by using cumulative monthly rainfall data measured at 257 stations operated by the General Directorate of Meteorology between 1998 and 2014. Long-term

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu'na 25.11.2015 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2017 gününe kadar tartışmaya açıktır.
- DOI: 10.18400/tekderg.306970

1 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - smeric@metu.edu.tr

2 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - amj.mani@gmail.com

3 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - bulutburakk@gmail.com

4 Orta Doğu Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Ankara - tuyilmaz@metu.edu.tr

mean values of station-based and satellite-based rainfall data, correlation between them, Standard deviation of monthly average and anomaly components, and standard deviation of satellite based data error are analyzed. Variation of satellite-based data error with elevation and distance from coasts is the major focus of this study. The results show that, especially the anomaly component of satellite-based rainfall data error is much higher at low-elevation regions and coastal regions compared with high-elevation regions and interior regions.

Keywords: Remote sensing, station-based precipitation, satellite precipitation error.

1. GİRİŞ

Hidroloji ve su kaynakları alanlarında yapılan çalışmalarda kullanılan değişkenlerden en önemlilerinden birisi kuşkusuz yağış parametresidir. Barajlarda sürdürülebilir bir şekilde üretililecek elektrik potansiyelinin hesaplanması, barajlarda tutulabilecek suyun hesabı, tarımsal sulamada kullanım amaçlı ayrılacak suyun bütçe hesabı, su rezervlerinin aylık ortalamalardan farkının hesabı, kuraklık çalışmaları ve daha birçok hidroloji ve su kaynakları ile ilgili çalışma, yüzeye düşen yağışların aylık ve yıllık miktarlarının dikkate alınması ile mümkündür [1]. Dolaylı olarak yağış miktarlarının yukarıda sıralanan hidroloji ve su kaynakları uygulamalarında kullanımına uygun olacak şekilde aylık ve yıllık zaman serileri halinde incelenmesi çok kritik bir öneme sahiptir.

Yağış verileri genel bir bakışla, gözlem istasyonu ölçümleri, uzaktan algılama prensibine dayalı uydu ve radar gözlemleri ve iklim modellerinden elde edilen sonuçlar olmak üzere üç farklı yöntemle elde edilebilmektedir. İstasyonların çoğunlukla ekonomik sebeplerden ötürü seyrek kurulmasından ve bakım zorlukları sebebiyle kentsel alanlara daha yakın konumlandırılmasından dolayı, istasyonlardan elde edilen geniş ölçekli yağış verileri temsil hataları içermektedir. Buna rağmen istasyonlardan elde edilen yağış verileri genel itibarıyla en güvenilir veriler olarak düşünülmekte ve uydu ve model kaynaklı verilerin doğrulanmasında birincil derecede kullanılmaktadır [2-4].

Sayısal modeller ile elde edilen yağış verileri gözlemlenmiş veriler olmadığı halde, özellikle kısa süreli tahminlerde son derece doğru sonuçlar vermektedir. Bu da, birçok gözlemlenmiş verinin asimilasyonu ile birlikte su/enerji/momentum bütçelerinin korunumuna dayanan denklemlerin doğru uygulanmasına dayanmaktadır. Ancak, sayısal iklim modelleri ile konveksiyonel yağışların tahmininde halen sorun yaşanıyor olması ve bu modellerin düşük mekansal çözünürlüğe sahip olması (genellikle $0.40^\circ - 1.0^\circ$ arasında), model verilerinin çeşitli hidroloji ve su kaynakları çalışmalarında kullanımını sınırlandırmaktadır.

Uzaktan algılama prensibine dayalı ve genellikle mikrodalga bantlarında yapılan radar gözlemleri kullanılarak yüksek çözünürlükte yağış verisi elde etmek mümkündür. Ancak, radarların okyanus ve denizler üzerinde sayıca çok sınırlı olması, radarlardan elde edilen yağış verilerinin seçilen Z-R (Reflektivite-Yağış) ilişkisine olan bağlılığının doğru elde edilememesi, topoğrafyanın sinyalleri engellemesi ve meteorolojik olmayan kaynaklardan ötürü gerçekleşen yapay ekolar nedeniyle, radar verilerinin küresel veya geniş ölçekli alanlarda kullanımı sınırlı kalmaktadır. Öte yandan, yine uzaktan algılama prensibine dayalı ve genellikle mikrodalga bantlarında yapılan uydu gözlemlerinden elde edilen yağış verileri, küresel olarak yağışın tutarlı bir şekilde elde edilmesini sağlamaktadır [5].

Mikrodalga temelli yağış algoritmalarının ana prensibi, yağışlardan elde edilen sinyalin gözlemlenen yüzeyden gelen sinyalden emisyon ve polarizasyon karakterlerine bağlı olarak ayrıştırılmasına dayanmaktadır. Göreceli olarak modellerden daha yüksek mekansal çözünürlükte yağmur verisi vermesi sebebiyle olsa gerek, uydu kaynaklı yağış verileri birçok su kaynakları ve hidroloji uygulamasında yaygınlıkla kullanılmaktadır. Aktif ve pasif mikrodalga gözlemlerinin birleştirilmesi ile elde edilen bu veri setlerinin en yaygınlıkla kullanılan örneklerinden birisi ise şüphesiz Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM, Tropik Yağmur Ölçme Misyonu) uydusu gözlemlerine [5] dayanan verilerdir. Ayrıca bu uydudan elde edilen yağmur verileri, şüphesiz şu ana kadar uydulardan elde edilen en doğru uzun zaman serilerine sahip veri setlerinden birisidir.

TRMM verisi, dünyanın değişik bölgeleri için doğrulama çalışmalarında kullanılmıştır [6-9]. Gerçekleştirilen bir çalışmada [6] TRMM verilerinin yer radar ağından elde edilen yağmur verilerini kullanarak analizi gerçekleştirilmiştir ve TRMM verilerinin geciken sinyallere karşı düzeltilmiş olan TRMM sinyallerinin ortalama olarak 0.91 korelasyonla radar sinyalleriyle uyumlu olduğunu göstermiştir. Bir diğer çalışmada ise [7], TRMM dahil olmak üzere birçok uydu ve model verilerinin doğrulaması ve karşılaştırması yapılmıştır. Bu çalışmada sonuç olarak uydu verilerinin yaz aylarında daha doğru sonuçlar verdiği ve modellerin ise kış aylarında daha doğru sonuçlar verdiği ortaya konulmuştur.

Ülkemizdeki en önemli yer gözlem veri kaynaklarından birisi kuşkusuz Meteoroloji Genel Müdürlüğü (MGM) tarafından kurulmuş ve işletilmekte olan istasyonlardır [10]. Birçok çalışmada çok kritik önemi olmasına rağmen ülkemiz üzerinde TRMM verilerinin doğrulanmasına yönelik çalışmalar günümüze kadar çok sınırlı sayıda kalmıştır [11-12]. Bu çalışmada tüm Türkiye üzerinde 257 istasyonda elde edilen yağış gözlemleri kullanılarak TRMM uydu verilerinin 1998-2014 yılları arasında doğrulanması gerçekleştirilmiştir. Hidroloji ve su kaynakları uygulamalarını odaklayan bu çalışma yağış verilerini aylık zaman serileri şeklinde incelemiştir.

2. ÇALIŞMA YÖNTEMİ

2.1. İstasyonlarda Ölçülen Yağış Verileri

Uydu kaynaklı verilerin hata oranlarını analiz etmek amacıyla, ülkemizin farklı bölgelerinde MGM tarafından 80 yıldır işletilen 371 adet büyük ve küçük klima istasyonlarında elde edilen gözlem verileri kullanılmıştır. Bu istasyonlarda, plüviyometreler aracılığıyla 07:00, 14:00 ve 21:00 saatlerinde rasatlar yapılmaktadır. Bu çalışmada MGM tarafından ölçülen yağış verilerinin aylık ortalamaları kullanılmıştır. Verilerin sürekliliğinin göz önünde bulundurulduğu bir kalite kontrol gerçekleştirilmiştir ve bunun sonucunda 1998-2014 yılları arasında (17 yıl) toplamda 8 yıldan daha az verisi olan klimalar çalışmanın dışında bırakılmıştır. Bu çalışmada, veri sürekliliği sağlayabilen 257 iklimin MGM tarafından kaydedilen istasyon numaraları Çizelge 1'de sunulmaktadır. Bu istasyonlarda yapılan ölçümler hakkında detaylı bilgi Yalçın ve diğerleri (2005) tarafından verilmektedir [13]. MGM tarafından 2004 yılından günümüze kadar yaklaşık 1305 Otomatik Meteorolojik Gözlem İstasyonu (OMGİ) kurulmuş olmasına karşın, bu OMGİ'lerin sayısı 2010 yılına kadar sadece 206 ile sınırlı kalmıştır. Bu sebeple 1998 yılından günümüze kadar gözlem yapan uydu verilerinin doğrulanması amacıyla klimalarda yapılan gözlemler kullanılmıştır.

Çizelge 1. Analizlerde verileri kullanılan 257 MGM gözlem istasyon numaraları

17015	17086	17184	17262	17618	17695	17778	17852	17944
17020	17088	17186	17265	17622	17700	17780	17854	17948
17022	17089	17188	17270	17624	17702	17784	17860	17950
17024	17090	17190	17275	17626	17704	17786	17862	17952
17026	17094	17191	17280	17628	17712	17792	17864	17954
17030	17096	17192	17282	17631	17716	17793	17866	17956
17033	17097	17193	17285	17632	17718	17796	17868	17958
17034	17099	17196	17287	17634	17720	17798	17870	17960
17037	17100	17199	17290	17636	17722	17802	17871	17962
17040	17110	17201	17292	17646	17726	17804	17872	17966
17042	17111	17203	17294	17648	17728	17806	17874	17968
17045	17112	17204	17296	17650	17730	17808	17880	17970
17046	17114	17205	17297	17652	17732	17810	17882	17974
17050	17116	17210	17298	17656	17734	17812	17884	17979
17052	17119	17220	17300	17658	17736	17820	17886	17980
17054	17120	17221	17310	17662	17740	17822	17890	17981
17056	17123	17232	17320	17664	17742	17824	17892	17986
17059	17128	17233	17330	17666	17746	17826	17898	
17061	17129	17234	17340	17668	17748	17828	17900	
17062	17130	17237	17351	17674	17750	17832	17902	
17066	17135	17238	17355	17676	17752	17833	17906	
17069	17140	17239	17370	17679	17754	17835	17908	
17070	17145	17240	17372	17680	17756	17836	17910	
17072	17155	17242	17375	17681	17760	17837	17912	
17074	17160	17244	17380	17682	17762	17840	17914	
17078	17162	17246	17602	17683	17764	17843	17920	
17080	17165	17248	17604	17684	17766	17844	17924	
17083	17172	17250	17606	17688	17768	17846	17926	
17084	17175	17255	17608	17690	17774	17847	17928	
17085	17180	17261	17610	17692	17776	17850	17936	

2.2. Uydu Kaynaklı Veriler

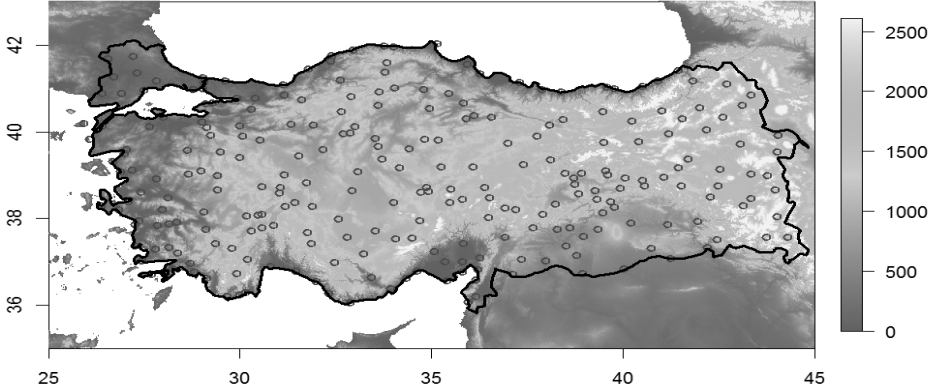
TRMM, Amerikan Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) ve Japon Uzay Araştırma Ajansı'nın (JAXA) ortaklaşa gerçekleştirdiği bir uzay misyonudur. Tropik yağmurların

araştırılması ve incelenmesi amacıyla geliştirilen TRMM, aynı zamanda bu misyon için kullanılan uydunun da ismidir. TRMM uydusunun üzerinde yer alan sensörler, uydunun farklı alanlardaki araştırmalarda kullanımını mümkün kılmaktadır. Bu sensörlerden yağış radarı sadece 40° kuzey ve 40° güney enlemleri arasında gözlem yapmaktayken, mikrodalga ve kızılötesi görüntü elde etmekte kullanılan sensörler 50° kuzey ve 50° güney enlemleri arasında gözlem yapabilmektedir. Yağış radarından ve mikrodalga ve kızılötesi bantlarında ölçüm yapan sensörlerden elde edilen gözlemler birleştirilerek yağış ürünleri elde edilmektedir. Bu ürünler 1998'den günümüze kadar 50° kuzey ve 50° güney enlemlerini kapsayacak şekilde 25 km mekansal ve 3 saatlik zamansal çözünürlükte elde edilmektedir. Bu uydü gözlemleri kullanılarak elde edilen TRMM 3B42 V7 ürünü [5] mekansal çözünürlüğü 25 km (orijinal gözlemlerle aynı) ve zamansal çözünürlüğü ise 1 günlük olacak şekilde sunulmaktadır. Elde edilen bu günlük TRMM 3B42 V7 ürünü ise daha sonra yazarlar tarafından aylık toplam olacak şekilde işlenmiştir. TRMM verileri hakkında ayrıntılı bilgi Huffman ve Bolvin (2014) tarafından verilmektedir [14].

2.3. Çalışma Alanı ve Karşılaştırmalar

Türkiye'nin farklı bölgelerinde yer alan 257 MGM gözlem istasyonundan 1998 – 2014 yılları arasında elde edilen yağmur gözlemleri kullanılarak, TRMM uydü verilerinin doğrulanması yapılmıştır. Kullanılan istasyonların bulunduğu coğrafyaların yükseklik bakımından incelenmesi amacıyla, istasyonlar Türkiye'nin dijital yükseklik haritası üzerinde gösterilmiştir (bkz. Şekil 1). Şekil 1'de istasyonların mekansal dağılımları, yükseklik bakımından istasyonların Türkiye'yi homojen bir şekilde temsil ettiğini göstermektedir. Bu tutarlı homojen dağılıma tek istisna olarak özellikle Doğu ve Güney Doğu Anadolu'da 2500 m yükseklikten daha yüksekte bulunan alanlar gösterilebilir. Orografik etkenlerden dolayı artan yükseklik ile yağış artışı olağandır ve bu sebeple yüksek kotlarda elde edilen yağış değerlerinin hata oranlarının düşük kotlardaki hata oranlarına göre değişiklik göstermesi mümkündür. MGM bu yüksekliklerde gözlem yapan istasyon sayısını 2015 yılı itibarıyla artırmaktadır. Fakat 2015 yılından önceki dönemlerde bu yüksekliklerde gözlem yapan istasyon sayısının azlığı, bu bölgelerde elde edilen yağış verilerinin doğruluğunun diğer bölgelerle mukayesesi gerektirmektedir.

Su kaynakları ve hidroloji konusunda, özellikle kuraklık ve taşkınların geri dönüş aralığı veya frekansına yönelik çalışmalarda aylık ortalama değerlerden sapma oranlarının elde edilmesi kritik bir öneme sahiptir. Bu sebeple, yağış zaman serileri aylık ortalama ve bu ortalamalardan sapma olarak elde edilen anomali parçalarına ayrılıp incelenmiştir. Bu çalışmada her bir istasyonun aylık ortalama değeri, 1998 ve 2014 yılları arasındaki 17 yıllık dönemde, her bir ay için ayrı ayrı ortalamaların hesaplanması ile elde edilmiştir. Örnekleme gerekirse, bir istasyondaki Ocak ayının ortalama değeri sadece o istasyonda elde edilmiş 17 adet Ocak ayı yağış miktarlarının ortalaması alınarak elde edilmiştir. Bu yöntemle, 12 ay için ayrı ortalama değerleri her istasyon için ayrı ayrı elde edilmiştir. Anomali değerleri ise, her ayın yağış miktarından o aya ait ortalama değeri çıkarılarak hesaplanmıştır. Yine örnekleme gerekirse, 17 adet Ocak ayı yağış miktarından Ocak ayının ortalama değeri çıkarılarak 17 adet anomali değeri hesaplanmıştır. Beklendiği üzere, her ay için hesaplanan 17 anomali değerinin ortalamaları sıfırdır. Her ayın anomali değerlerinin elde edilmesiyle, 257 istasyon için $12 * 17 = 204$ aylık zaman serileri elde edilmiştir.



Şekil 1. İstasyonların yükseklik (m) haritası üzerinde mekansal dağılımı

Yukarıdaki yöntemin TRMM uydu verilerine uygulanması amacıyla, her bir istasyonu içine alan hücrelerdeki günlük TRMM zaman serileri aylık TRMM zaman serilerine kümülatif toplam alınarak dönüştürülmüştür. Daha sonra, dönüştürülmüş aylık zaman serileri, yine aylık ortalama ve anomali bileşenlerine ayrılmıştır. Bu yöntemle istasyonlara benzer olarak 257 hücre için 204 aylık zaman serileri elde edilmiştir.

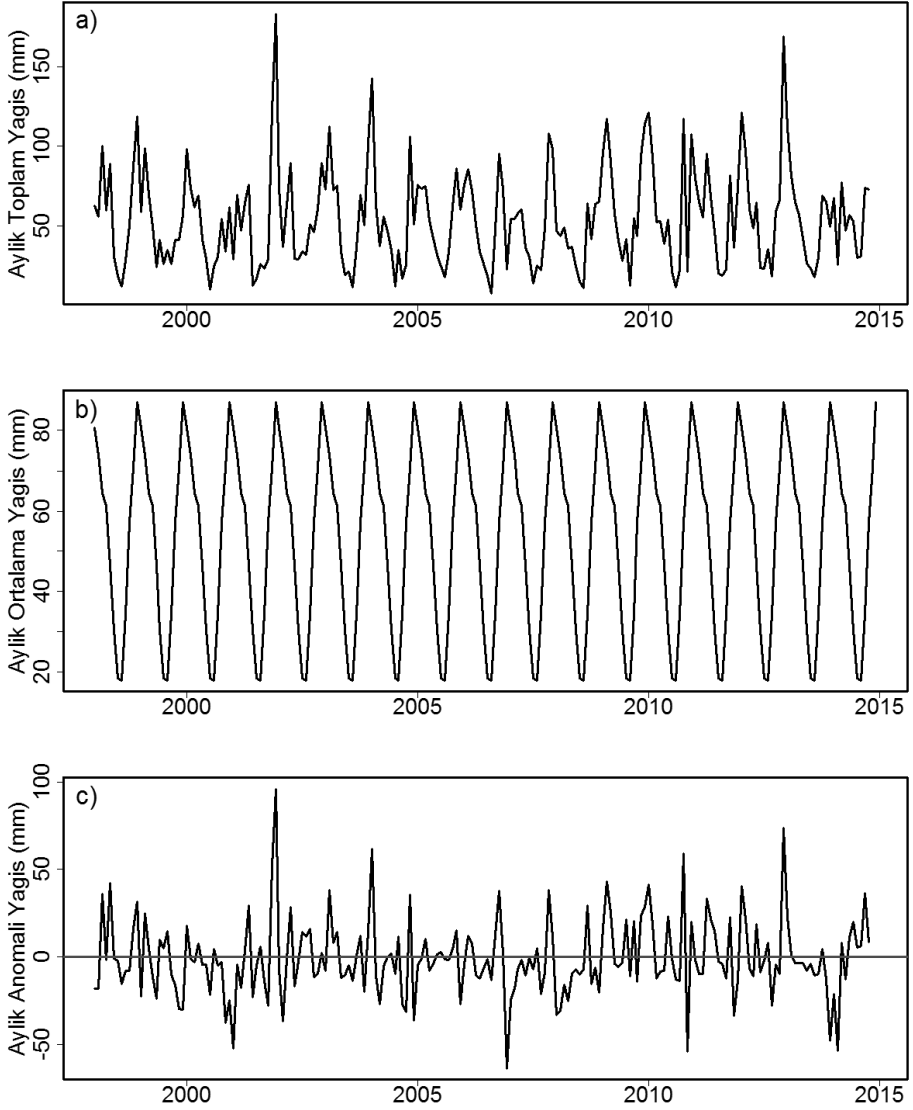
MGM istasyonlarında ölçülen yağış değerlerinin aylık toplamı doğru kabul edilerek, TRMM uydusundan elde edilen aylık yağış verilerinin hata oranları hesaplanmıştır. Aylık zaman serilerinin bileşenlerine ayrılmış olmaları göz önünde bulundurularak, 1) tüm zaman serisi, 2) aylık ortalama zaman serisi ve 3) anomali zaman serisi için hata oranları ve standart sapmaları istatistikleri ayrı ayrı hesaplanmıştır. Ayrıca, bahsi geçen üç değişik zaman serisi kullanılarak istasyon ve uydu arasındaki korelasyonlar bulunmuştur. 257 istasyon için bağımsız olarak elde edilen istatistiklerin ortalamaları alınmış ve histogram analizi vasıtasıyla uydu verilerinin doğruluğuna dair genel durum değerlendirmesi yapılmıştır.

3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

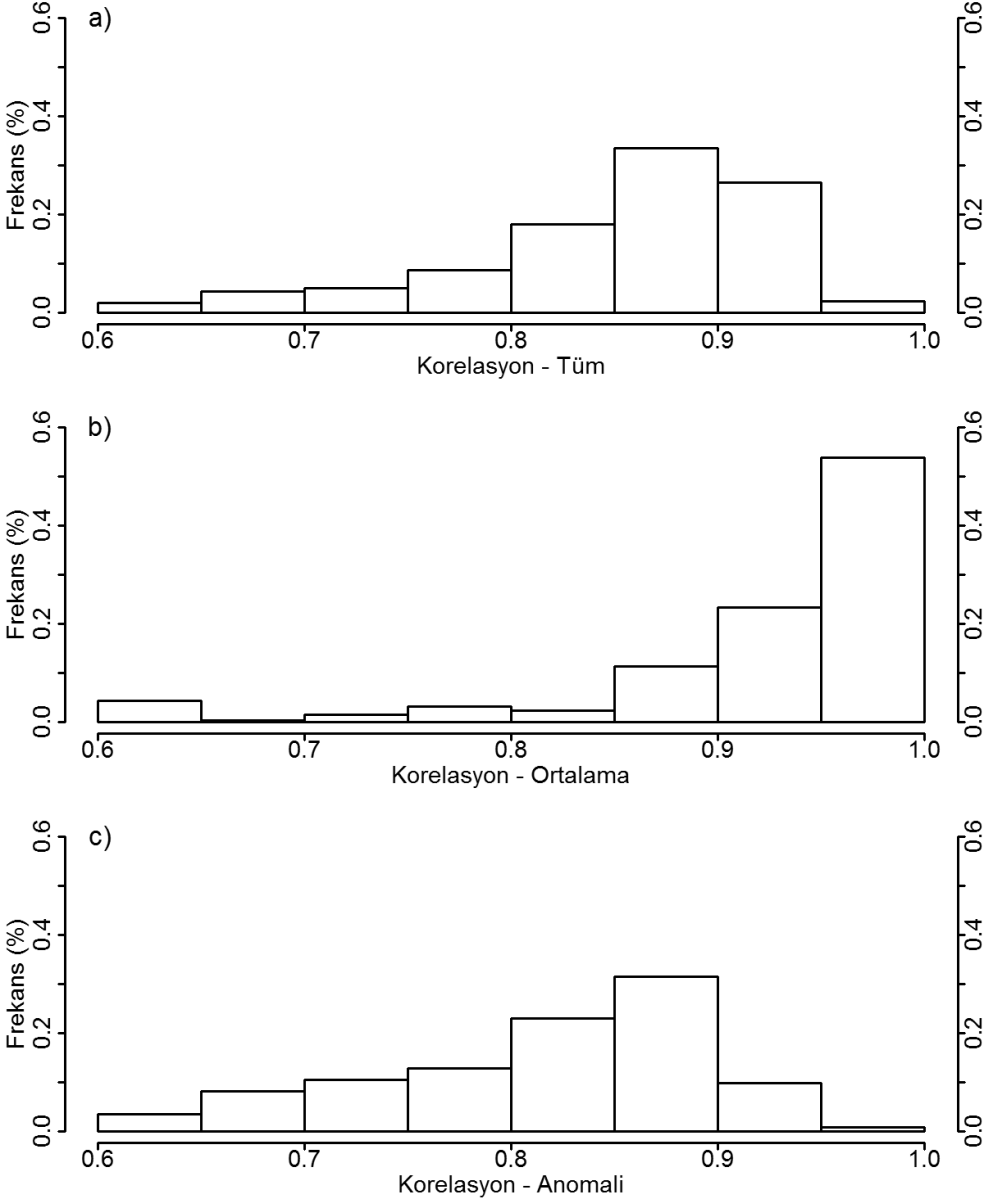
Tüm istasyonlardan elde edilen yer gözlem verilerinin aylık kümülatif toplam değerleri alınarak 1998-2014 yılları arasında Türkiye'deki yağışın değişimi bulunmuştur (bkz. Şekil 2). Aylık ortalama değerleri çıkarıldığında anomali değerleri kurak dönemleri (özellikle 2008 ve 2014 kuraklıklarını) ve bu kuraklıkların başlangıç ve bitiş evrelerini tüm verilere oranla daha net göstermektedir.

İstasyon ve uydudan elde edilen yağmur verileri arasındaki korelasyonlar 257 istasyon üzerinde tüm veri, aylık ortalama zaman serisi ve anomali zaman serileri için hesaplanmıştır. Bu korelasyonların histogramları Şekil 3'te sunulmaktadır. Uydu verileri ile istasyon verileri arasında, aylık ortalama değerler bazında büyük çoğunlukla 0.90 üzerinde korelasyonlar bulunurken anomali değerleri bazında korelasyonlar ağırlıklı olarak 0.80 ve 0.90 arasında olduğu görülmüştür (bkz. Şekil 3). Bu durum, uydu kaynaklı yağış verilerinin sahip olduğu yağış sinyalinin aylık ortalama değerlere daha fazla bağlı olduğu ve tüm veri

setine kıyasla anomali değerlerinin daha düşük doğruluk payına sahip olduğu sonucunu ortaya koymaktadır. Tüm veri, aylık ortalama zaman serisi ve anomali zaman serisi için elde edilen 257 korelasyon değerinin ortalamaları ile hata standart sapmalarının sunulduğu Çizelge 2’de, yukarıda bahsedilen durum daha net görülmektedir.



Şekil 2. Toplam 257 istasyon üzerinde ölçülen a) toplam yağış, b) aylık ortalama ve c) anomali zaman serileri



Şekil 3. İstasyon ve uydudan 1998 – 2014 yılları arasında elde edilmiş aylık yağmur verilerinin 257 istasyon üzerindeki korelasyonlarının a) tüm veri, b) ortalama ve c) anomali kısımlarına göre frekans dağılımı

Çizelge 2. İstasyon ve uydudan 1998 – 2014 yılları arasında elde edilmiş aylık yağmur verilerinin 257 istasyon üzerinde ortalama korelasyonları, uydu verilerinin ortalama hata standart sapması ve hata ortalaması

	Tüm	Aylık Ortalama	Anomali
Korelasyon [-]	0.85	0.91	0.81
Hata Stand. Sapması [mm]	28.23	13.61	24.98
Hata Ortalaması [mm]	4.02	3.02	0.90

Uydu verileri ile istasyon verileri arasındaki lineer ilişkiyi gözlemlemek amacıyla yukarıda elde edilen korelasyon değerleri hesaplanmıştır. Toplamda 204 (12 ay*17 yıl) veri ile hesaplanan korelasyon değerlerinin istatistiksel olarak anlamlı olabilmesi için yaklaşık olarak 0.14 (Fisher denklemi kullanılarak hesaplandı, kabaca $2/\sqrt{204} = 0.14$) korelasyon değerini geçmesi gerekmektedir. Çizelge 2’de sunulan korelasyon değerlerinin 0.80’den daha büyük olması, elde edilen korelasyon değerlerinin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Bu çizelgede anomali hata ortalamasının 0 çıkmamasının ve 0.90 gibi küçük bir sayı çıkmasının nedeni, zaman serisi bakımından eksik istasyon verilerine (ortalama olarak istasyonlar üzerinde 166 aylık veri bulunurken 38 aya karşılık gelen veriler eksiktir) karşılık gelen uydu verileri hata hesaplanmasında kullanılmazken uydu istatistiklerinin hesaplanmasında kullanılmasıdır. Bu durum bahsi geçen eksik istasyonlara karşılık gelen uydu verilerinin tüm analizlerden çıkarılmasıyla giderilebilir. Fakat daha az veri kullanılması çalışmada hesaplanan istatistiklerin (örneğin standart sapma değerleri) örnekleme hatalarının da artmasına sebebiyet verecektir. Bu sebeple hesaplanan istatistiklerin örnekleme hatalarının azaltılması için bu veriler analizlerden çıkarılmamıştır.

Uydu verilerinin istasyon verilerine kıyasla yanlış olup olmadığını gözlemlemek içinse, istasyon ve uydudan elde edilen aylık kümülatif yağış değerleri ile birlikte tüm veri ve aylık ortalama/anomali bileşenlerinin standart sapmaları hesaplanmıştır. İstasyon ve uydu verilerinden hesaplanan ortalama yağış karakteristikleri Çizelge 3’te sunulmuştur. Aylık yağış verilerinin uzun dönem ortalamaları kıyaslandığında, istasyon ve uydu verileri arasındaki farkın %1’den daha az olduğu gözlenmiştir. Dolayısıyla, uydudan elde edilen yağış verileri, havzalara düşen yıllık yağışların toplam hacimlerini hesaplamada güvenle kullanılabilir. Ancak, uydu verilerinin ortalama standart sapması 204 aylık tüm veri dikkate alındığında istasyonlardan %4 oranında daha düşük olduğu görülmektedir (bkz. Çizelge 3). Öte yandan yapılan anova testlerinde bu fark istatistiksel olarak anlamlı bulunmamıştır. Ortalama standart sapmalar aylık ortalama ve anomali bileşenlerine ayrıldığında, bu farkın ağırlıklı olarak anomali (%7 fark) kaynaklı olduğu görülmektedir. Ortalama standart sapmalar arasındaki fark, aylık ortalama bileşende çok daha düşük seviyelerdedir (%3). Uydu verilerinin ortalama standart sapma değerlerinin istasyonlara kıyasla düşük olması, kıyı (daha yüksek yağış alan) kesimlerdeki daha kuru ve iç (daha düşük yağış alan) kesimlerdeki daha ıslak verilerle de örtüşmektedir. Tüm veriler dikkate alındığında ortalama standart sapmalar arasında bulunan %4’lük farkın, hatalı bir sonuç çıkarımına yol açıp açmayacağı ise tamamen uygulamaya bağlıdır. Standart sapmalar arası farkın büyüklükçe önemli olduğu çalışmalarda, elde edilen fark normalleştirilebilir. Dolayısıyla, elde edilen fark, birçok çalışmada (özellikle zamansal olarak ortalamadan

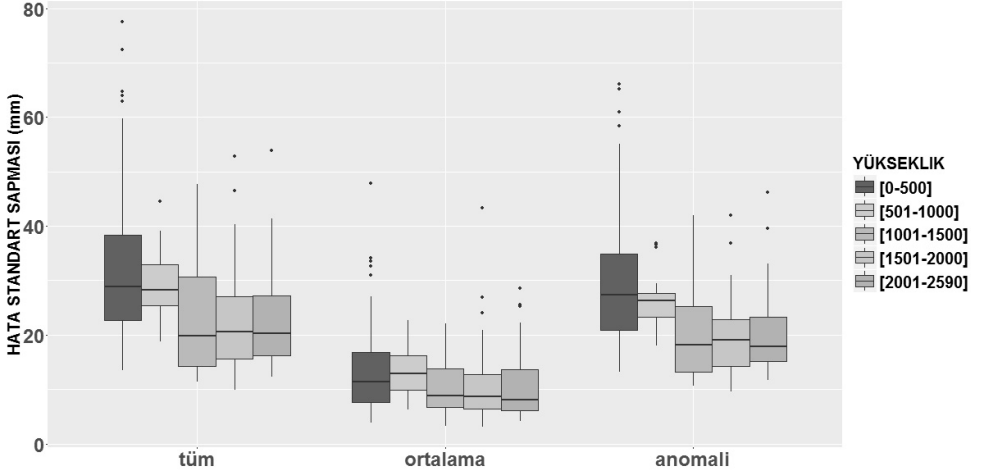
sapma analizlerini içeren kuraklık gibi uygulamalarda) hatalı bir değerlendirmeye yol açmayacaktır.

Çizelge 3. İstasyon ve uydudan 1998 – 2014 yılları arasında tüm istasyonların üzerinde elde edilmiş aylık yağmur verilerinin istatistikleri

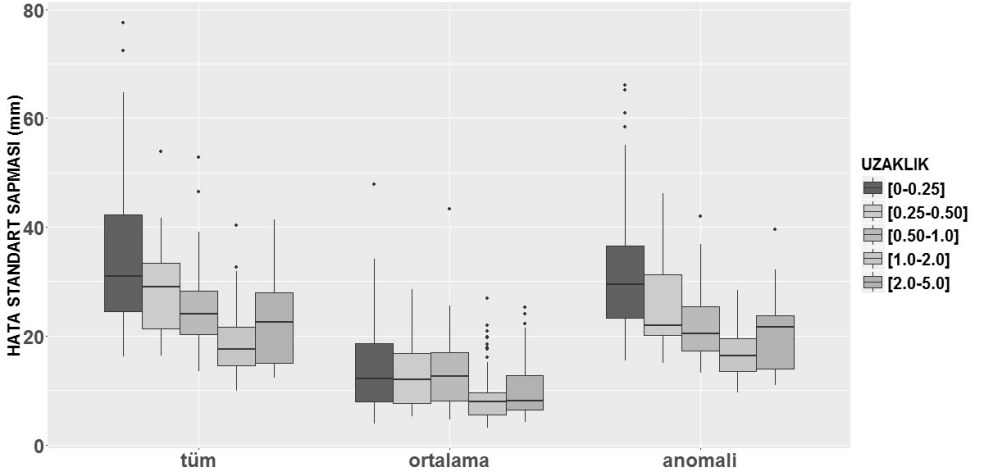
Yağış İstatistikleri (mm)	İstasyon	TRMM
Ortalama (tüm)	56.36	56.31
Stand. Sapma (tüm)	47.85	45.65
Stand. Sapma (aylık ortalama)	28.89	28.07
Stand. Sapma (anomali)	38.26	35.51

Uydu verilerinin hata standart sapmalarının yüksekliğe bağlı dağılımı ise Şekil 4'te gösterilmektedir. Bu şekilde, 500 m kotundan daha düşük bölgelerde elde edilen TRMM uydu verilerinin hata oranlarının, yüksek kotlu bölgelerden kayda değer oranda fazla olduğu açıkça görülmektedir. Daha yüksek kotlarda ise belirli bir seyir görülmemektedir. Düşük kotlarda hataların daha yüksek olması, uydu verilerinin 25 km'lik çözünürlükteki hücrelerinin sahil şeritlerinde deniz-kara ayrımı açısından homojen olmamasından ve bu sebeple deniz ve kara üzerinde kullanılan farklı yağmur elde etme algoritmalarının homojen olmayan bu hücreler üzerinde daha yüksek hata içermesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu sebeple, hata standart sapmalarının kıyıya olan uzaklıkla (derece cinsinden uzaklık elde edilmiştir, $1^\circ \sim 100$ km) ilişkisi Şekil 5'te görülmektedir. TRMM hücrelerinin 25 km çözünürlükte olduğu göz önünde bulundurulduğunda, yeşil ile gösterilen en yüksek hata oranlarının kıyıya 0.25° (~ 25 km) uzaklıktan daha yakın olan bölgelere, yani hem kara hem de deniz bölgesi içeren TRMM hücrelerine ait olduğu ortaya çıkmaktadır. TRMM yağmur elde etme algoritmaları deniz üzerinde deniz/kara emisyonu farkına dayanan bir metodoloji kullanırken kara üzerinde saçılma temeline dayanan bir algoritma kullanmaktadır [15]. Dolayısıyla, karasal alanların deniz alanlarına göre daha az olduğu ve deniz yağmur algoritmasının kullanıldığı hücrelerde deniz/kara emisyon farkından dolayı hata oranlarının artmasının, kıyıya yakın bölgelerdeki yüksek hata oranlarına yol açtığı düşünülmektedir. Hataların kıyı kesimlerde artışı anomali değerlerinde daha fazla görünürken aylık ortalama değerlerde artışın daha az olduğu görülmüştür.

TRMM uydu verilerinin hata oranları şüphesiz bu verinin düşük mekansal çözünürlüğü (25 km) ile ilintilidir. Bu verilerden daha yüksek çözünürlüklü yağış verilerinin elde edilmesi değişik yöntemlerin kullanılması ile mümkün olabilir. Fakat elde edilecek olan yüksek çözünürlüklü yağış verilerinin doğruluk oranları, kullanılan yöntemlerin ve yapılan varsayımların doğruluğuna bağlıdır. Şayet kullanılan yöntemlerin teorisi ile uyumlu veri kullanılırsa, daha yüksek doğrulukta ve çözünürlüklü yağış verisi elde edilmesi mümkündür.



Şekil 4. İstasyon ve uydudan 1998 – 2014 yılları arasında 257 istasyon üzerinde elde edilen hata standart sapmalarının tüm veri, ortalama ve anomali kısımlarına göre yükseklik (m) haritasındaki dağılımı



Şekil 5. İstasyon ve uydudan 1998 – 2014 yılları arasında 257 istasyon üzerinde elde edilen hata standart sapmalarının tüm veri, ortalama ve anomali kısımlarına göre kıyıya (Akdeniz veya Karadeniz) olan uzaklıkla (uzaklık ° biriminde verilmiştir; 1° enlem farkı yaklaşık 100 km uzaklığa karşılık gelmektedir)

4. SONUÇ

Bu çalışmada TRMM 3B42 V7 veri seti istasyonlarda ölçülen yağmur verileri ile karşılaştırılmıştır. Ortalama olarak uydu verilerinin yansız ve istasyonlardan elde edilen verilerle yüksek lineer ilişki içinde olduğu bulunmuştur. Tüm veri, aylık ortalama ve anomali değerleri için ayrı ayrı yapılan karşılaştırma sonucu ile uydu verisinden elde edilen yağmur ürününün kullanılacağı çalışmanın amacına göre hata oranları elde edilmiştir. Bu sonuçlar uydu verilerinin bilhassa istasyonlarla ölçülmesi güç bölgelerdeki yağmur verilerinin kullanımını gerektiren çalışmalarda rahatlıkla kullanılabilirliğini göstermektedir. Öte yandan sahil şeritlerindeki hata oranlarının daha yüksek bölgelere kıyasla daha fazla olması, bu bölgelerde yapılacak çalışmalarda bu hata oranı farkının mutlak suretle göz önünde bulundurulması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Kaynaklar

- [1] Yıldız, O. Spatiotemporal Analysis of Historical Droughts in the Central Anatolia, Turkey. Gazi University Journal of Science (GU J Sci), Vol. 27, No. 4, 1177-1184, 2014.
- [2] Widmann, M. ve Bretherton, C. S., Validation of Mesoscale Precipitation in the NCEP Reanalysis Using a New Gridcell Dataset for the Northwestern United States. J. Climate, 13, 1936–1950, 2000.
- [3] Thiemeig, V., Rojas, R. Zambrano-Bigiarini, M., Levizzani, V., ve De Roo, A., Validation of Satellite-Based Precipitation Products over Sparsely Gauged African River Basins. J. Hydrometeor, 13, 1760–1783, 2012.
- [4] Yatagai, A., Kamiguchi, K., Arakawa, O., Hamada, A., Yasutomi, N., ve Kitoh, A., APHRODITE: Constructing a Long-Term Daily Gridded Precipitation Dataset for Asia Based on a Dense Network of Rain Gauges. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93, 1401–1415, 2012.
- [5] Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA). Chapter 1 in Satellite Rainfall Applications for Surface Hydrology. Springer Verlag, ISBN: 978-90-481-2914-0, 3-22, 2010.
- [6] Islam, T., Rico-Ramirez, M. A., Han, D., Srivastava, P. K., Ishak, A., M., Performance evaluation of the TRMM precipitation estimation using ground-based radars from the GPM validation network, Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 77, 194-208, 2012.
- [7] Ebert E. E., Janowiak J. E., Kidd, C., Comparison of near real time precipitation estimates from satellite observations and numerical models. Bull. Amer. Meteor. Soc. 88, 47–64, 2007.
- [8] Tian Y, Peters-Lidard CD, Choudhury BJ, Garcia M, Multitemporal analysis of TRMM based satellite precipitation products for land data assimilation applications. J. Hydrometeor. 8, 1165–1183, 2007.

- [9] Ochoa, A., Pineda, L., Crespo, P. Ve Willems, P., Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific–Andean region of Ecuador and Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, 3179–3193, 2014.
- [10] Sönmez, I., Quality control tests for western Turkey Mesonet. *Meteorological Applications*, 20, 330–337, 2013.
- [11] Derin, Y., ve Yilmaz, K. K., Evaluation of Multiple Satellite-Based Precipitation Products over Complex Topography. *J. Hydrometeor*, 15, 1498–1516 2014.
- [12] Özcan, O., Musaoğlu, N., Bookhagen, B., Örmeci, C., Uydu ve yersel yağış verilerinin noktasal frekans analizi ile mekansal değerlendirmesi. *TMMOB Coğrafi Bilgi Sistemleri Kongresi*, Ankara, 2013.
- [13] Yalçın, G., Demircan, M., Ulupınar, Y., Bulut, E.. *Klimatoloji - 1. Çevre ve Orman Bakanlığı Devlet Meteoroloji İşleri Genel Müdürlüğü Ankara, Mart – 2005, DMİ Yayınları, Yayın no : 2005 / 1, 2005.*
- [14] Huffman, G.J., ve Bolvin, D.T., TRMM and Other Data Precipitation Data Set Documentation, ftp://precip.gsfc.nasa.gov/pub/trmmdocs/3B42_3B43_doc.pdf, 2014.

Çelik-Beton Kompozit Kat Döşemesi Yangın Dayanım Deneyi

Serdar SELAMET¹

Taygun Fırat YOLAÇAN²

ÖZ

Bu çalışma kapsamında Türkiye’de araştırma odaklı ilk çelik-beton kompozit kat döşemesi yapısal yangın deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, Türkiye’de gerek yangın yönetmelikleri açısından gerekse yapısal yangın konusunda teorik, nümerik ve deneysel araştırmalardaki eksiklikleri gidermeyi amaçlamaktadır. Yüksek katlı çelik bir yapı için tasarlanmış kompozit döşemenin iki kenarında simetrik bir birleşim mekanizması kullanılmış ve bu şekilde yangın fırını alanından daha büyük bir döşeme alanı testi imkânı sağlanmıştır. Yangın fırınına monte edildikten sonra döşemenin alt yüzeyi ISO834 standart yangın eğrisiyle 105 dakika ısıtılmış ve sonrasında 90 dakika kontrollü olarak soğutulmuştur. Deney sırasında yapının sehim ve sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Alınan sonuçlar, beton döşemenin membran davranışı göstererek yük taşıyıcı özelliğini yangın boyunca devam ettirdiğini göstermektedir. Dolayısıyla kompozit kat döşemelerinde ikincil çelik kirişlerin yalıtımsız kalması önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Yangın dayanımı testi, simetrik birleşim mekanizması, yapısal yangın mühendisliği, kompozit döşeme, çelik bağlantı.

ABSTRACT

Fire Resistance Testing of a Steel-Concrete Flor Slab

This study conducts the first research based structural fire resistance test on a steel-concrete composite floor in Turkey. The goal of this research is to fill the knowledge gaps in the current Turkish building code for the structural fire safety and provide valuable insight for the development of new theoretical, computational and experimental research. The tested composite floor is specifically designed for a high-rise steel building. The floor is equipped with a patent pending mechanism to provide symmetric boundary conditions on two edges. The floor is subjected to ISO-834 standard fire curve from the bottom surface for 105 minutes followed by 90 minutes cooling. Displacement and temperature measurements show that at elevated temperatures, the concrete slab carries the load by tensile membrane action without contribution of the secondary beams. This study suggests that secondary

Not: Bu yazı

- Yayın Kurulu’na 01.03.2016 günü ulaşmıştır.
- 30 Eylül 2017 gününe kadar tartışmaya açıktır.
- DOI: 10.18400/tekderg.307544

1 Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - serdar.selamet@boun.edu.tr

2 Boğaziçi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul - firat.yolacan@boun.edu.tr

steel beams are not need for fire protected as the concrete slab is sufficient in carrying gravity loading.

Keywords: Fire resistance test, symmetric connection mechanism, structural fire engineering, composite floor, steel connection.

1. GİRİŞ

Bu çalışmada, yüksek katlı yapılarda sıklıkla kullanılmakta olan birincil kirişler, ikincil kirişler, beton döşeme ve çelik bağlantılardan oluşan ve literatürde halen yangın esnasında oluşan yüksek sıcaklıklar altında davranışı analitik yöntemlerle açıklanamamış olan kompozit döşeme sistemlerinin, yangın esnasında oluşan yüksek sıcaklıklar altında dayanım ve davranışının deneysel yöntemlerle ölçülmesi hedeflenmektedir. Yangın dayanım deneyi dışında, patent başvurusu gerçekleştirilmiş olan düzeyde serbest ve moment aktaran yeni birleşim mekanizması tasarlanmıştır. Yangın testlerinde kullanılan fırınların sınırlı boyutlarda olması nedeniyle yangın testleri için uygun olmayan ölçülerdeki döşeme sistemlerinin simetrik parçalar halinde test edilmesine olanak sağlayacak bir mekanizma yangın dayanım deneyi ile test edilecektir.

Gerçek boyutlarda kompozit döşemenin (8.6 m x 7.6 m) sadece çeyreği yukarıda bahsi geçen birleşim mekanizması kullanılarak ISO834 standart yangın eğrisine maruz bırakılacak ve sonrasında kontrollü olarak soğutulacaktır. ISO834 standart yangını ve kontrollü soğuma esnasında kompozit döşemeye ait sehim ve sıcaklık değerleri kaydedilecektir ve döşemenin yangın performansı irdelenecektir.

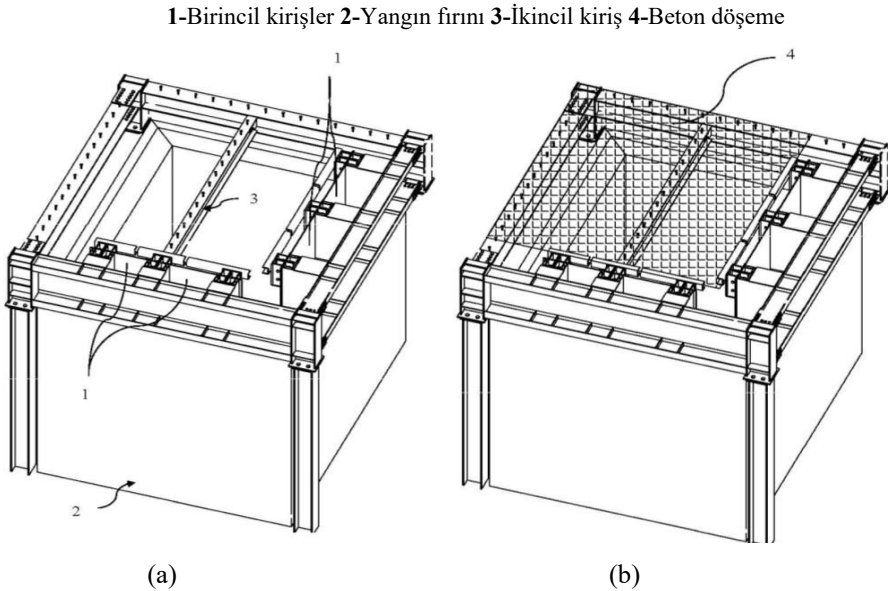
Son yıllarda gerçekleştirilen betonarme döşeme sistemlere ait yangın deneyleri, bu bölmelerin çökmeye karşı dirençli olduğunu göstermiştir [3, 4]. Bunun nedeni, beton döşemenin çevresel kirişler ve kolonlar tarafından desteklenip bir ‘membran’ gibi davranmasıdır. Bu davranış için yaklaşık bir analitik çözüm bulunmuştur [5, 6, 7], ayrıca deney sırasında gözlemler çöküş mekanizması hakkında bilgi vermiştir [8, 9]. Beton döşemenin, çekme kuvvetlerine karşı membran mekanizması ile yangına karşı daha dirençli olduğu bilinmesine rağmen, çelik kesme bağlantılarının bu çeşit bir sistemde dönme ve çekme kuvvetine maruz kalıp kalmayacağı tartışılan bir konudur [10, 11, 12]. Çelik bağlantılar, yapıların sabit kalması, özellikle kolonların yatay desteklenmesi ve burkulma yaşamaması için önemli bir fonksiyona sahiptir [1, 13, 14]. Bu nedenle yangından kaynaklanan kuvvetlere karşı yetersiz bağlantı gerilimi veya yetersiz süneklik durumu, çelik yapıda çökmeye yol açabilir. Kompozit döşemenin yangın altındaki yüksek sehimi ancak çelik bağlantıların dönme kapasitelerinin yükseltilmesi ve daha sünek şekilde tasarlanması ile olur [15, 16, 17]. Bununla beraber bulonların yangına karşı dayanıklılığı diğer çelik malzemelerine karşı değişiklik göstermektedir ve çelik bağlantılarının mekanik davranışlarını tespit etmeyi daha da zorlaştırmaktadır [18].

Yukarıda verilen literatür bilgisi ışığında bu projenin literatüre yapacağı katkı aşağıda belirtilmiştir:

Geçmişte yapılan deneylerde anlaşıldığı üzere, sadece beton döşemenin yangına karşı performansı analiz edilmiştir. Çelik kiriş ve bağlantılardan oluşan kompozit sistemin yangın dayanım deneyi bu alana yenilik getirecektir. Bu deney ile birlikte simetrik koşulları sağlayan yeni bir birleşim mekanizması hem oda hem de yüksek sıcaklıklarda test edilmiştir.

2. YANGIN DAYANIM TESTİ

Boyutları 8.6 m x 7.6 m olan yüksek katlı bir bina döşeme sisteminin simetrik çeyreği Şekil 1'de gösterilmiştir. Döşeme sistemi; birincil kirişler, ikincil kiriş, beton döşeme ve çelik bağlantılardan oluşmakta ve kompozit döşemenin 4.3 m x 3.8 m boyutlarındaki simetrik çeyreğini temsil etmektedir. Döşeme betonu, Eurocode standartlarına uygun olarak 4 ay bekletilmiş ve nem oranı 2.6% olması koşuluyla test edilmek için hazırlanmıştır. Deneysel Efectis Era Avrasya Yangın Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Binaların Yangından Korunması Hakkında Yönetmelik'te, döşemeler ile birlikte 30,50m'den yüksek binalardaki tüm yapı elemanlarında 120 dk standart yangın eğrisine (IS0834) dayanım aranmaktadır [19]. Ancak bu kapsamda çelik kirişlerin yalıtıldığı varsayılmaktadır. Yangın dayanım testinde ikincil çelik kiriş yalıtılmadığı için daha ihtiyatlı davranılıp döşeme alt yüzeyinden sadece 105 dakika ISO834 standart yangın eğrisine maruz bırakılmış ve ardından 90 dakika kontrollü olarak soğutulmuştur.



Şekil 1. 4.3 m x 3.8 m büyüklüğündeki çelik-beton kompozit döşeme ve çelik çerçevesinin yangın fırınına monte edilmiş halindeki CAD çizimleri (a) beton döşeme olmadan, (b) beton döşeme ile.

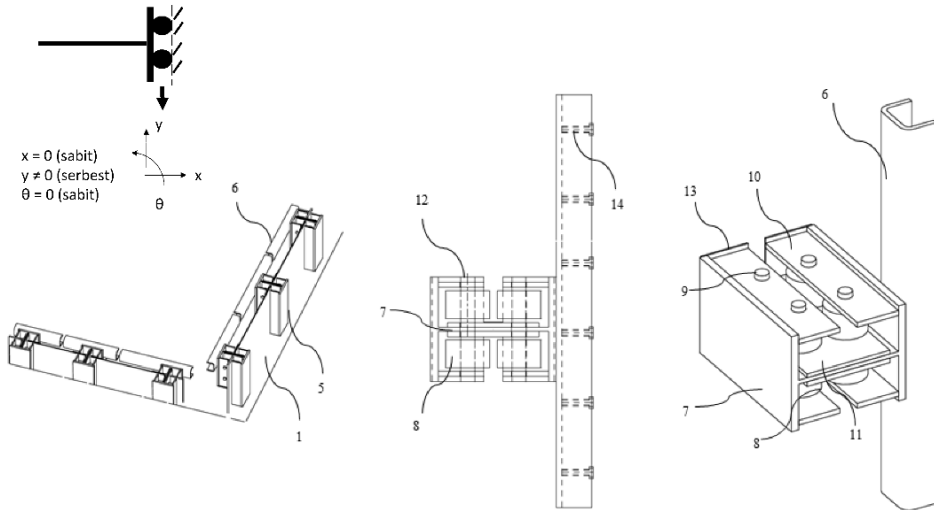
2.1. Test Düzenegi

Birincil kirişler, ikincil kiriş, beton döşeme ve çelik bağlantılardan oluşan kompozit döşeme sistemine ait elemanlar Şekil 1 ve 2'de numaralandırılarak ilgili şekiller üzerinde belirtilmişlerdir. Şekil 1b'de görülen çelik-beton kompozit döşeme sisteminin iki kenarında yer alan birincil kirişler için HEA 400 kullanılmış ve bu kirişler birbirlerine ankastre olarak bağlanmıştır. Döşemenin diğer iki kenarı ise simetrik eksenlerdir ve Şekil 3 ve 4'de gösterimi yapılan simetrik sınır koşulları sağlayan birleşim mekanizması ile diğer ana

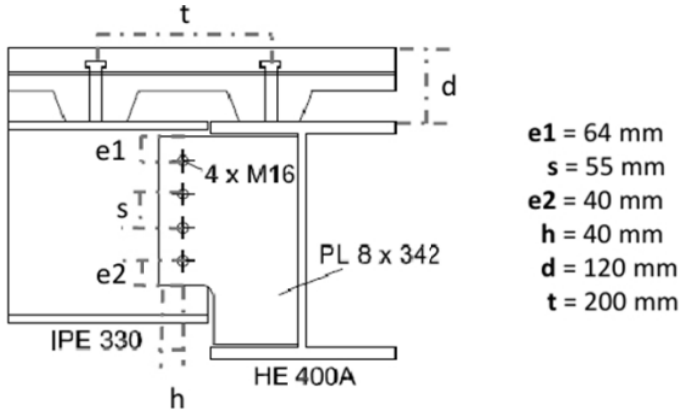
kirişlere bağlanmıştır. Toplamda dört ana kiriş yangın fırını duvarları üzerine oturtulmuş ve beton kayma kamaları ('shear stud') ile çelik çerçeveye bağlanmıştır. Deneyde kullanılan döşemede yüksek katlı yapılarda sıklıkla kullanılan C30 tipi beton kullanılmıştır. Beton kalınlığı 70-120 mm arasında değişen bir sac trapez ile belirlenmiştir. S500 A252 tipi çelik hasır donatı betonun üst yüzeyinden 50 mm uzaklıkta olacak şekilde betonun içine yerleştirilmiştir. Döşemenin ortasında (ve altında) bir ikincil kiriş (IPE330) bulunmaktadır. Bu kiriş, Şekil 3'de gösterilmiş olan kesme bağlantısı ile birincil kirişe (HEA 400) bağlanmıştır. Kompozit döşemeye ait çelik çerçeve, yangın laboratuvarına getirildikten sonra üzerine C30 beton dökülmüş ve oluşturulan çelik-beton kompozit döşeme yangın testi şartlarına uygun olacak şekilde nem yüzdesinin azalması için test öncesinde 4 ay süre ile bekletilmiştir. Oluşturulan kompozit döşeme, beton olmadan yaklaşık olarak 11 ton, beton ile ise 14 ton ağırlığındadır.

Kompozit döşeme sistemi, yangın fırınına yatay olarak monte edilmiştir. Monte işleminde ana kirişler yangın duvarlarına oturtularak çelik bulonlar ve kaynaklama ile sabitlenmiştir. Döşemenin tüm alanı, IPE 330 ikincil kirişi ve çelik kesme bağlantısı fırının içinde kalmıştır ve yangına direkt maruz bırakılmıştır. HEA 400 birincil kirişleri ve simetrik koşulları sağlayan ana kirişler (toplamda dört adet) fırın dışında olup, yangına dolaylı olarak maruz kalmıştır. Fırının içinde kalan simetrik koşullar sağlayan birleşim mekanizması ve kesme (mafsal) bağlantısı dışındaki tüm bölgeler yalıtımsız bırakılmıştır. Simetrik koşullar sağlayan birleşim mekanizması ve bağlantı bölgesi 25 mm'lik 2 adet seramik yünü ile kaplanmış ve yangın testi esnasında ortaya çıkacak olan yüksek sıcaklıklara karşı yalıtılmıştır.

1-Birincil kirişler 5-Lineer rulman sistemi 6-C profil 7-Hareketli kiriş 8-Rulman 9-Pim 10-Birinci pim destek yan plaka 11-İkinci pim destek yan plaka 12-Dikey destek plaka 13-Yatay destek plaka 14-Kayma kaması



Şekil 2. Simetrik sınır koşullarını sağlayan birleşim mekanizması: Moment aktaran, yatay sabit ve dikey serbestlik sağlayan lineer rulman sistemi CAD çizimi.



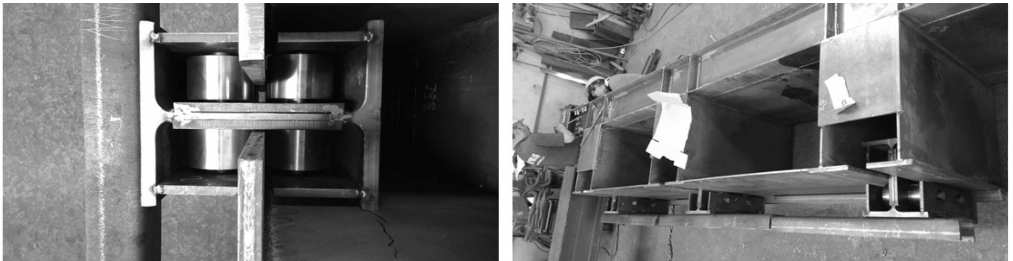
Şekil 3. IPE330 İkincil kiriş - HEA400 Birincil kirişi kesme bağlantı detayı.

2.2. Simetrik Birleşim Mekanizması

Yangın davranış testleri genellikle yangın fırınlarında gerçekleştirilmektedir. Ancak, döşemelerin de dâhil olduğu büyük genişlikteki yatay yapılara ait yangın davranış testleri kısıtlı hacimlere sahip yangın fırınlarında yapılamamaktadır. Geniş boyutlu döşemeler ancak ölçekli şekilde imal edilerek test edilmektedir. Ölçeklendirilmiş bir yapının ısı dağılımı ölçeklendirilmemiş yapıdan görece büyük farklılıklar göstermekte ve bu durum dolaylı olarak mekanik davranışa etki etmektedir. Bu nedenle, ölçeklendirilen bir yapının yangın davranış testi sonuçları ile gerçek boyuttaki bir yapı davranış testi sonuçları aynı olmayacaktır.

Sekiz metre genişlikten büyük bir yapıyı test edecek büyüklüğe veya donanıma sahip ulusal veya uluslararası bir yangın fırını bulunmamaktadır. Bu nedenle laboratuvar ortamında büyük genişlikteki kompozit döşemeler test edilememektedir.

Bu çalışma kapsamında Şekil 2'de şematik ve Şekil 4'de üretimi gerçekleştirilmiş olarak gösterilen moment aktaran, yatay düzlemde sabit hem çekme hem de basınca karşı dayanıklı, düşey düzlemde serbest olan simetrik sınır koşulları sağlayan bir yangın dayanım test mekanizması üretilmiştir. Bu proje aşamasında ortaya çıkan buluş için Türk Patent Ofisine başvuru yapılmıştır [20].



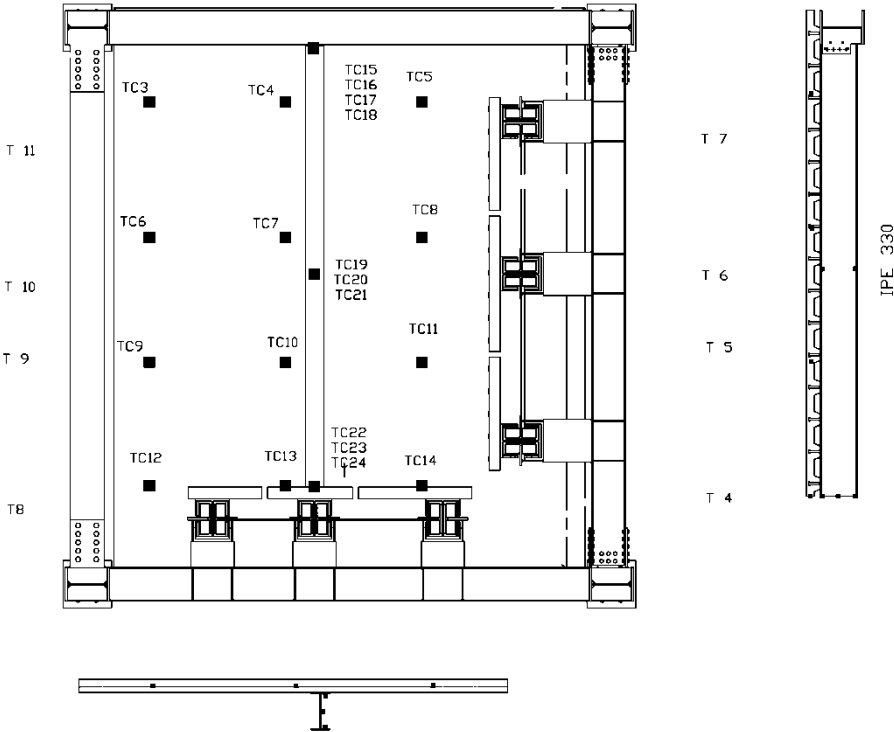
Şekil 4. Simetrik sınır koşullarını sağlayan birleşim mekanizmasının moment aktaran, yatay sabit ve dikey serbestlik sağlayan lineer rulman sistemi.

2.3. Ölçüm Metotları

Çelik-beton kompozit döşeme, düşey statik yükleme ve yangın testi öncesinde ölçüm aletleri ile donatılmış ve hem yangın öncesi hem de yangın sonrası kontrollü soğuma esnasında kesintisiz olarak izlenmiştir. Isıl-çiftler ile sıcaklık, doğrusal deplasman ölçme cihazları (LVDT) ile de sehim ölçülmüştür.

2.3.1. Sıcaklık Ölçerler

Tüm ısı-çiftler, krom-demir alaşımı ‘inconel’ malzeme ile kaplı K- tipidir ve 1200 °C’ye kadar dayanıklıdır. Şekil 5’de yer haritası gösterimi yapılmış olan ısı çiftleri ile yangın fırını, ikincil kiriş orta bölgesi, ikincil kiriş (IPE 330) – birincil kiriş (HEA 400) bağlantı bölgesi ve donatı üzerinde sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Fırın içerisinde bulunan ısı-çiftler (T4-T11), fırının ISO834 yangın eğrisine uygun olarak brülörler tarafından düzgün yayılı olarak ısıtıldığını teyit etmek için kullanılmıştır. İkincil kiriş (IPE 330) ve birincil kiriş (HEA 400) bağlantısı üzerine 4 adet, ikincil kiriş (IPE330) orta bölgesine 3 adet ve ikincil kiriş simetrik birleşim mekanizması bağlantısı yakınına 3 adet ısı-çift yerleştirilmiştir (TC15-TC24). Tüm ısı-çiftler çelik yüzeyine yerleştirilmiştir. Kesme bağlantısındaki ısı-çiftler yalıtım altında kalmıştır. Beton döşeme içindeki A252 çelik hasır üzerine toplamda 12 adet ısı-çift yerleştirilmiştir (TC3-TC14).



Şekil 5. Fırın içindeki ve kompozit döşeme üzerindeki ısı-çift (TC) ölçerlerin yer haritası.

2.3.2. Sehım Ölçerler

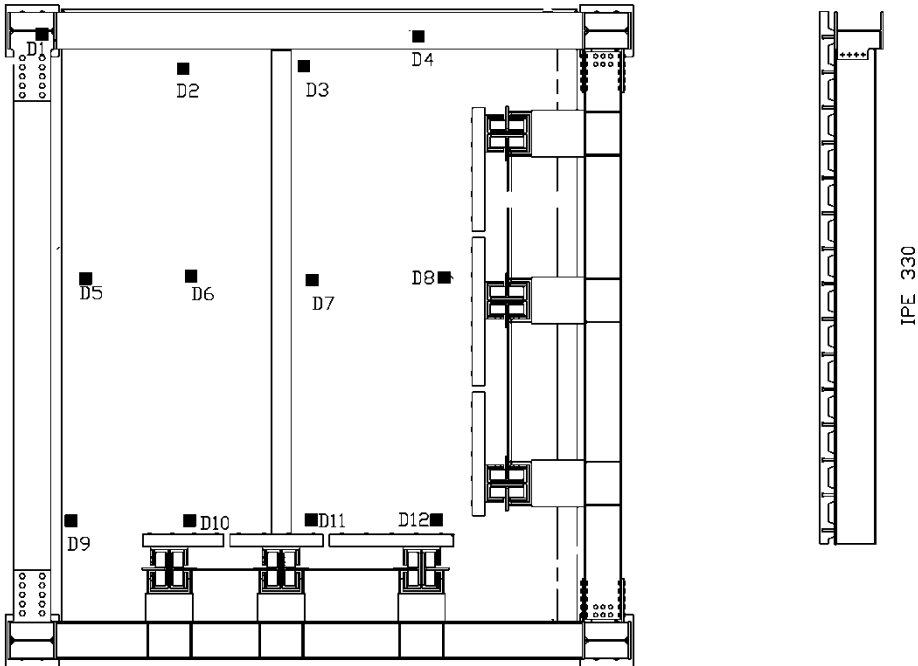
Şekil 6’de yer haritası gösterilmiş olan sehım ölçerler (D1-D12) beton döşemenin membran çekme etkisine girip girmediğini ve bu etkiye ne zaman girdiğini gözlemlemek amacıyla yerleştirilmiştir. Sehım ölçerler beton yüzeyin üzerinde yerleştirilmiştir. Sehım ölçerler için ısıya dayanıklı ve genleşmeyen bir malzeme kullanılmıştır. Ölçülen sehım ile simetrik birleşim mekanizmasının düşey serbestlik verip vermediğini teyit edilmiştir.

2.4. Düşey Statik Yükleme

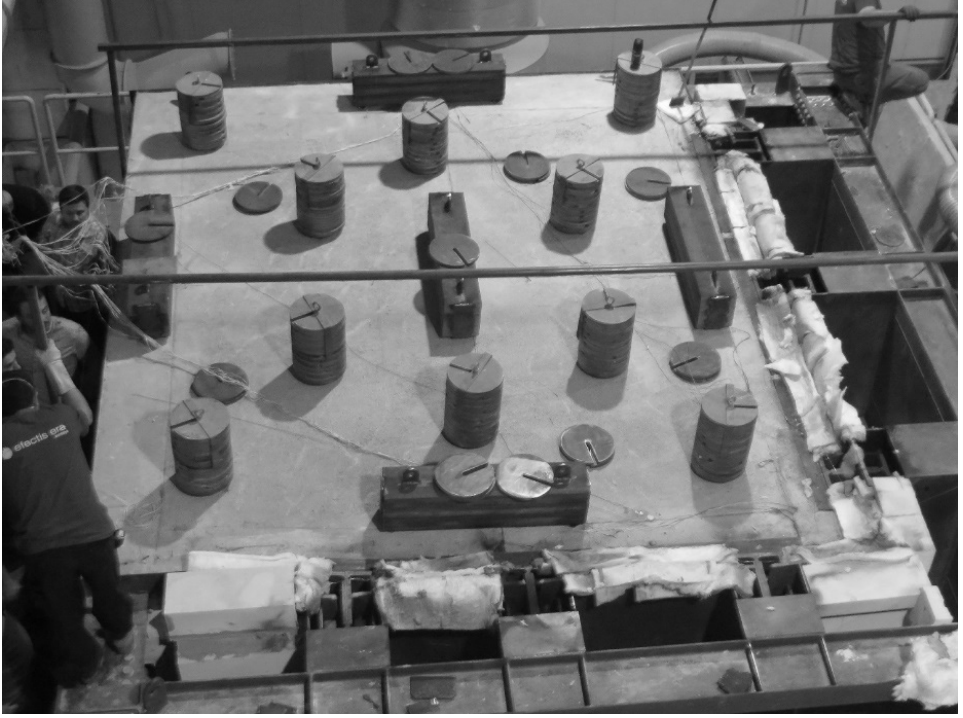
Denklem - 1, Eurocode (EC1) Standardına göre ofis yapıları için yapısal yangın anında uygulanması gereken yük kombinasyonunu göstermektedir. Denklem - 1 de “w” yangın tasarım yükünü, “Q” hareketli yükü, “G” ise yapı sabit yükünü ifade etmektedir [21]. Denklem - 1 de “Q” ile ifade edilen yükleme Eurocode (EC1) Standardına uygun olacak şekilde beton yüzeyine 2.5 kN/m^2 düzgün yayılı yük olarak uygulanmıştır [21]. Şekil 7’de düzgün yayılımı gösterilmiş olan “Q” hareketli yükü 10 adet 200 kg, 5 adet 375 kg, 13 adet 20 kg kullanılarak oluşturulmuştur. Yapı sabit yükü “G” beton özgül ağırlığı yani yaklaşık 2.4 kN/m^2 olacak şekilde dikkate alınmıştır. Bu bilgiler ışığında Denklem - 1’e göre yangın tasarım yükü 3.75 kN/m^2 ’dir.

$$w = 1,0G + 0,5Q$$

(1)



Şekil 6. Kompozit döşeme üstündeki sehım (D1-D12) ölçerlerin yer haritası.



Şekil 7. Kompozit döşeme üzerindeki test öncesinde yükleme durumu.

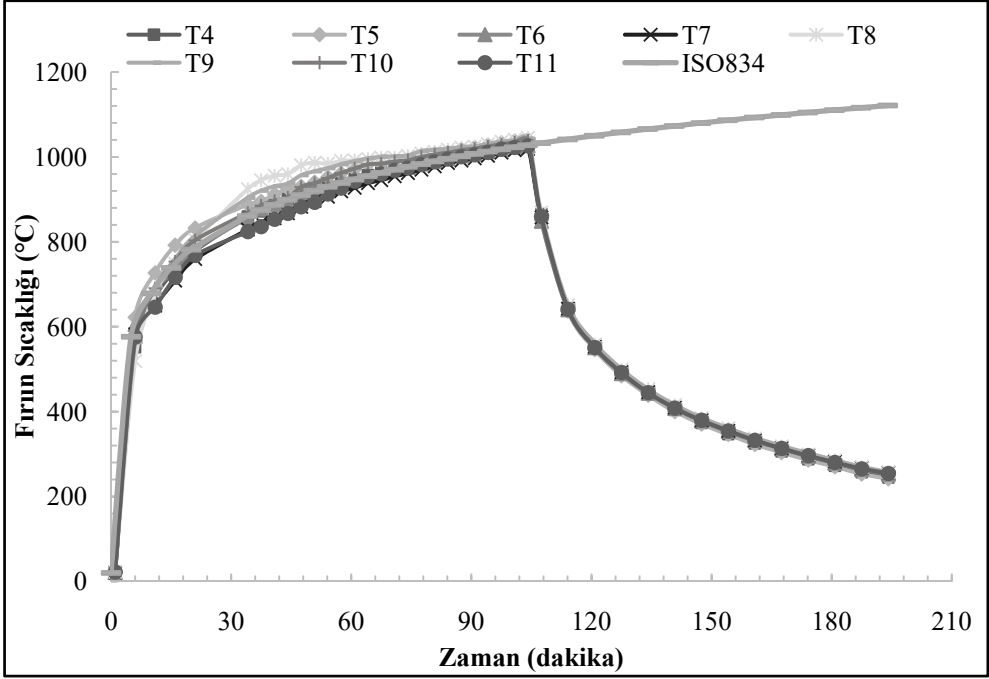
3. GÖZLEM VE DEĞERLENDİRMELER

Yangın fırınında ISO834 yangın eğrisine maruz bırakıldıktan 5 dakika sonra kompozit döşemenin simetrik eksenlerinden duman çıkmaya başlamıştır. 20 dakikada döşemede gözle görülür yatay yer değiştirmeler gözlemlenmiştir. 25 dakika içerisinde beton yüzeyinde çatlaklar gözlenmiştir. Bununla birlikte deneyin 30. dakikasından itibaren beton yüzeyinden gözle görülür miktarda su buharı çıkmıştır ve kabarmalar oluşmuştur. Soğuma esnasında ise döşemede az miktarda yukarı doğru geri çekilme olmuştur. Bunun nedeni ikincil kirişin (IPE330) soğuyarak mukavemetini ve rijitliğini geri kazanması olarak yorumlanabilir.

3.1. Fırın Sıcaklıkları

Fırındaki ortam sıcaklığı, fırın hacminin ortasına yerleştirilen ısıl-çiftler ile ölçülmüştür. Fırın içerisine yerleştirilen ısıl-çiftlerin yer haritası Şekil 5'de gösterilmiştir (T4-T11). Yangın fırını, fırın içerisindeki sıcaklığı ISO834 sıcaklık eğrisini uygun olacak şekilde oluşturmak için hacimdeki basıncı ve gaz brülörü ayarını otomatik olarak değiştiren dijital bir mekanizma ile donatılmıştır. Bu sayede tüm hacimde tekdüze ve ISO834 eğrisine çok yakın bir sıcaklık eğrisi elde edilmiştir. Şekil 8 yangın fırını içerisinde yer alan ısıl çiftlere

ait sıcaklık eğrileri göstermektedir. 105 dakika ısınma sonrasında gaz brülörleri kapatılıp 90 dakika kontrollü bir soğuma evresine girilmiştir.

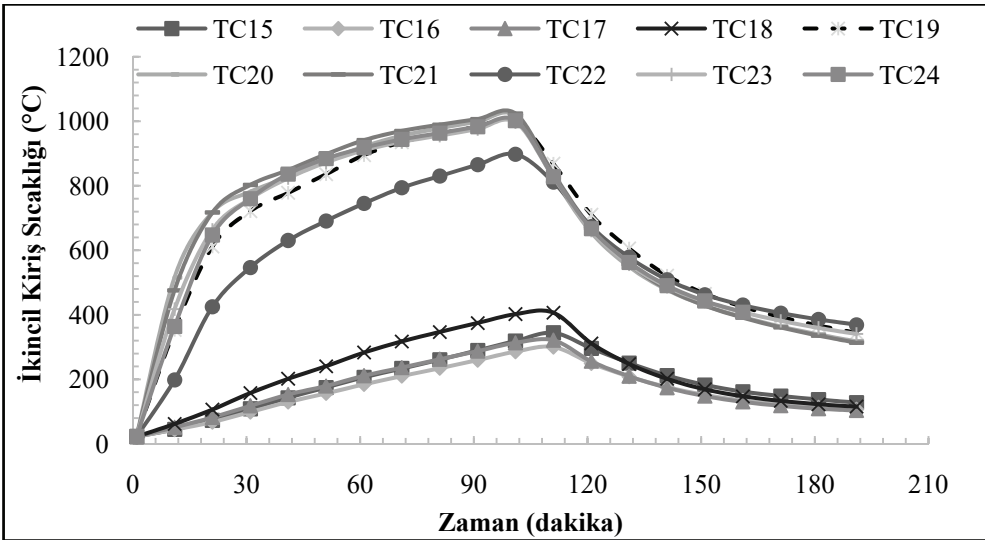


Şekil 8. Fırının farklı bölgelerindeki sıcaklık verileri (bkz. Şekil 5).

3.2. Çelik kiriş ve Beton Döşemedeki Donatı Sıcaklıkları

ISO834 yangın eğrisine maruz bırakılan kompozit döşeme bileşenlerinin sıcaklıkları, farklı bölgelerdeki ısı-çiftler aracılığı ile ölçülmüştür (Şekil 9). TC10 ısı-çifti deney başından itibaren hata vermiş ve 5. dakikada devre dışı kalmıştır. Alınan sonuçlara göre, korunmasız ikincil kiriş (IPE330) orta bölgesinde yer alan ve alt yüzeyden üste doğru sıralanan TC21, TC20 ve TC19 numaralı ısı-çiftler beklenen doğrultuda ISO834 yangın eğrisine yakın davranış göstermişlerdir. İkincil kiriş orta bölgesinin alt yüzeydeki ısı-çifti (TC21), TC19'dan yaklaşık 100 °C daha fazla ısınmıştır. İkincil kiriş yalıtımsız bırakıldığı için kirişin alt ve üst yüzeyindeki sıcaklık farkı oldukça azdır. İkincil kiriş ve birincil kiriş (HEA400) bağlantısı seramik yünü ile kaplanmıştır. Bağlantının yakınındaki kiriş bölgesinde yer alan ve alttan üste doğru sıralanan TC18, TC17, TC16 ve TC15 ısı-çiftleri beklenen doğrultuda oldukça düşük bir sıcaklığa maruz kalmışlardır. İkincil kiriş ve birincil kiriş bağlantı bölgesinin alt ve üst yüzeyleri arasında yaklaşık olarak 100°C'lik sıcaklık farkı oluşmuştur. İkincil kiriş- birincil kiriş bağlantısı üzerinde yer alan ısı çiftlerinden TC15 ve TC18, 1. ve 3. bulona, TC16 ve TC17 ise bağlantı plakası üzerine sabitlenmiştir. Bulon üzerine sabitlenmiş olan TC18 ısı çifti TC15-17'den daha fazla sıcaklığa sahip olması bağlantının alt yüzeyinde yalıtımın tam anlamıyla sağlanmadığını göstermektedir.

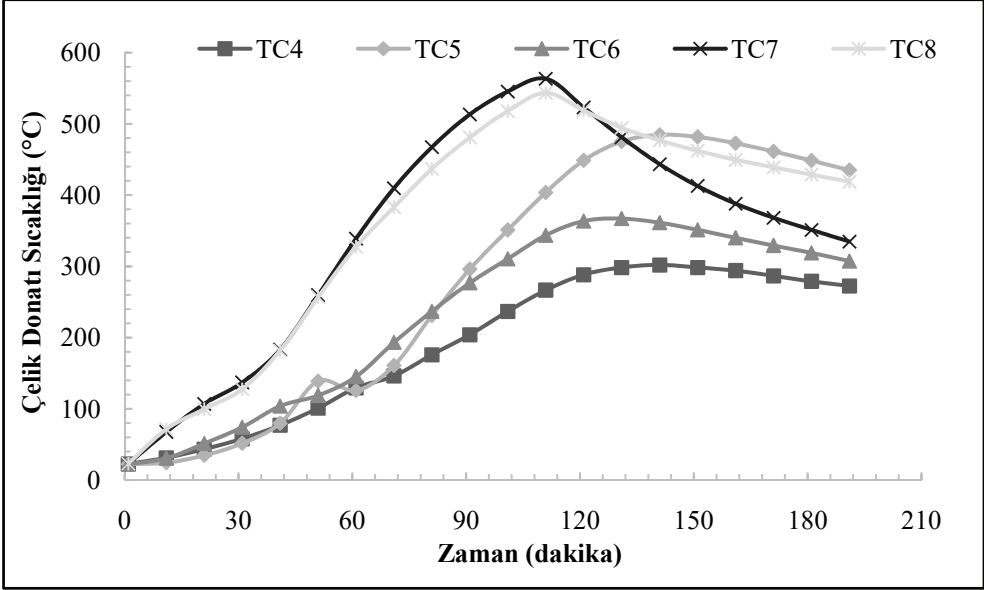
TC24, TC23 ve TC22 ısı çiftleri simetrik koşulu sağlayan lineer rulman sistemine yakın yerde ikincil kiriş üzerinde olacak şekilde sırasıyla alt yüzeyden üste doğru yerleştirilmiştir. Lineer rulman sistemi, yangından etkilenmemesi için yalıtılmıştır ancak kiriş üzerindeki TC23 ve TC24 ısıl-çiftleri yalıtımın dışında bırakılmıştır. TC22 ısıl çifti ise yalıtımın içinde kalmak zorunda kalmış ve Şekil 9'da görüldüğü üzere lineer rulman sistemi bölgesinde bulunan diğer ısıl çiftlerden ayrılmıştır.



Şekil 9. Çelik kiriş üzerindeki ısıl-çift sıcaklıkları (bkz. Şekil 5).

Şekil 5'de yer haritası gösterilmiş olan beton donatısında yer alan ısıl-çiftlere ait sıcaklıklar Şekil 10'da gösterilmiştir. TC3 ısıl çifti döşemenin montajı sırasında hasar görmüştür ve bu ısıl çifti üzerinden ölçüm yapılamamıştır. Ayrıca TC12 ısıl çifti 135 dakikadan sonra hasar görmüştür, dolayısıyla bu ısıl-çiftten 135. dakika sonrası veri alınamamıştır. Döşemedeki donatıda değişik noktalarda yer alan ısıl çiftlerden elde edilen sıcaklık verileri 300 °C'ye kadar farklılık göstermektedir. Bu sıcaklık farkının bir nedeni sac trapezin kalın (120 mm) ve ince (70 mm) olduğu bölgelerde bulunan ısıl-çiftlerin yangın ile arasında 50 mm beton yalıtımı farkı olmasıdır. Diğer bir nedeni ise fırın duvarına yakın bölgelerin daha az sıcaklığa sahip olmasıdır. Fırının orta bölgesinde bulunan ısıl çiftler (TC7, TC8, TC9, TC11) 500-600 °C'ye kadar ısınırken, fırın duvarlarına yakın bölgelerde bulunan ısıl-çiftler 300 °C'ye kadar ısınmışlardır.

Eurocode standartlarına göre ikincil kirişin (IPE330) yük taşıma özelliğini yitirdiği kritik sıcaklık 635 °C'dir [22]. Şekil 9'da görüldüğü üzere, kirişin sıcaklığı 20. dakikadan itibaren 635 °C'yi aşmıştır ve dolayısıyla döşeme sistem üzerinde ölü yük olarak asılı kalmıştır. Düşey statik yüklemeye sadece beton döşeme tarafından taşınmıştır. Mafsallı çelik bağlantı yalıtıldığı için yangın esnasında 400°C altında kalmış ve Eurocode standartlarına göre kuvvet aktarım kapasitesini korumuştur [22].



Şekil 10. Beton döşemedeki donatı üzerindeki ısı-çift sıcaklıkları (bkz. Şekil 5).

3.3. Döşemedeki Sehım Göstergeleri

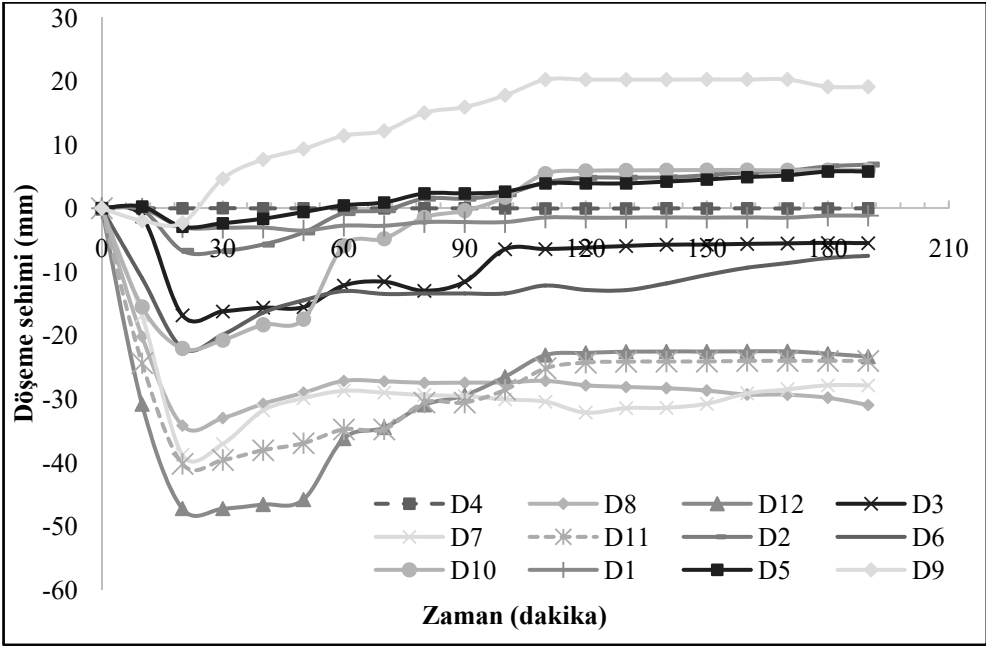
Beton döşeme üzerine Şekil 7’de gösterilmiş olan düşey statik yükleme yapıldıktan sonra kompozit döşeme simetrik kenar köşe noktasında 45 mm’lik deplasman kaydedilmiştir. Şekil 11’deki sehım ölçümleri düşey statik yükleme tamamlandıktan sonra betonun üst yüzeyine çakılan çivilere takılan cihazlar ile kaydedilmiştir. Şekil 11’de negatif (-) değerler statik yüklemekten gelen yer değiştirme (sehım) sıfırlandıktan sonra aşağı yönde yer değiştirmeyi ifade etmektedir. Şekil 11’de görüldüğü üzere yangın duvarı üzerindeki çevre kirişlerin etrafındaki noktalar beklenen doğrultuda çok az hareket etmişken, simetrik sınıra yakın, özellikle de köşe noktadaki bölge (D12) 50 mm kadar aşağı doğru sehım vermiştir. Dolayısıyla, statik yükleme ile beraber simetrik köşe (D12) toplamda 50+45=95mm sehım vermiştir. Diğer noktadaki sehımler beklediği gibi simetrik sınıra yaklaşırken kademeli olarak artmıştır. D1-D5 ana kirişe yakın oldukları için az sehım göstermişlerdir. Bunlardan D3, ikincil kirişin üzerinde olduğundan 20 mm kadar sehım verebilmiştir. 15. Dakikada tüm ölçerlerde hızlı bir aşağı inme eğilimi vardır, bunun nedeni ikincil kiriş (IPE330) sıcaklığının ortalama 800 °C’ye çıkması ve kirişin taşıma kapasitesini kaybetmesidir.

İkincil kiriş üzerindeki D11 en fazla 40 mm sehım göstermiştir. Bu veri, Eurocode standartlarına göre kompozit kirişlerde işletilebilirlik (‘serviceability’) $L/250$ değerini aşmaktadır [21].

Sıcaklıklar arttıkça, sehımlerde yukarı doğru bir eğilim görülmüştür. Hızlı bir yükseliş ise 60. dakikada D12 ve D10’da gözükmektedir. Sıcaklık artarken betonun yukarı çıkabilmesi fiziksel olarak ihtimal dışı olduğundan, bu esnada betona tutturulan çivilerin 60. dakikadan sonra beton üzerindeki çatlak ve kabarmalardan dolayı yerlerinden çıkıp gevşemeleri ve

dolayısıyla hatalı bir okuma gerçekleştirmeleri muhtemeldir. D9 noktasındaki oldukça fazla yukarı yönde (+) hareket tam olarak açıklanamamaktadır.

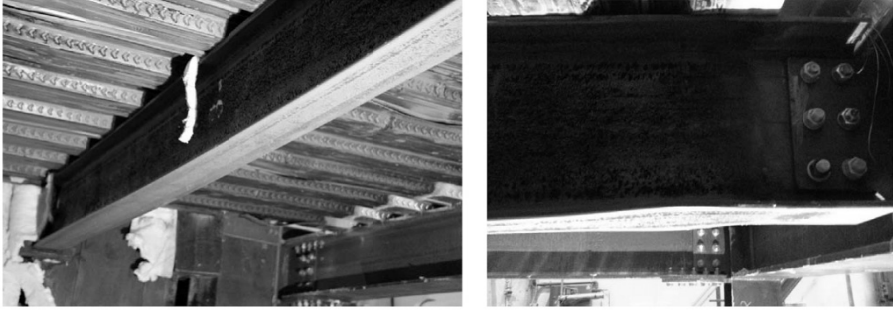
Genel olarak, döşeme beklenenden daha az sehim göstermiştir. Bunun bir nedeni ölçümden kaynaklanan hatalar olabilir. Diğer bir nedeni ise simetrik birleşim mekanizmasında yangın esnasında oluşan sıcaklık artışı sonucunda genişlemelerin yaşanması ve döşemede oluşan aksenal kuvvetler sonucunda simetrik birleşim mekanizması birleşenleri arasında sürtünme kuvvetlerinin ortaya çıkmış olması olarak yorumlanabilir. Bu sürtünme kuvvetlerinin oluşması birleşim mekanizmasının doğru işleyişinin bir sonucudur. Sürtünme katsayısını azaltacak yağ vb. maddelerin kullanımı yangın deneyinde mümkün değildir. Bu araştırma kapsamında yapılacak yeni deneylerde sürtünme kuvvetlerinin etkisini azaltmak için hidrolik bir yükleme yapılacak ve bu şekilde döşeme üstündeki yük yangın süresince kademeli olarak arttırılacaktır.



Şekil 11. Statik yükleme sonrasında, yangın esnasında beton döşeme üstünden ölçülen farklı noktalardaki sehimler (bkz. Şekil 6)

3.4. Yangın Testi Öncesi ve Sonrası Gözlemleri

Kompozit döşeme simetrik sınır koşullarını sağlayan birleşim mekanizmasının yüksek sıcaklıklarda doğru olarak çalıştığı teyit edilmiştir. Şekil 12'de görüldüğü üzere deney sonrasında ikincil kiriş (IPE330) kararlılığını (stabilite) yitirmemiş, kesme bağlantısı (bkz. Şekil 3) yakınlarında IPE330 alt bölgesinde yerel burkulmaya rastlanmıştır.



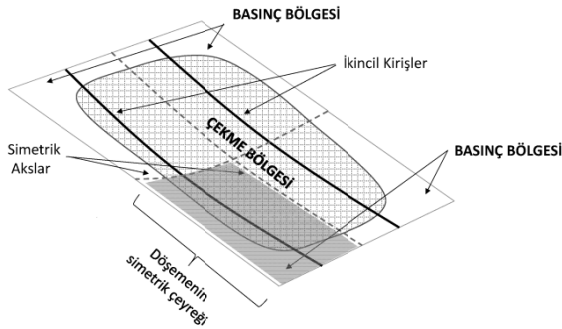
Şekil 12. Yalıtımsız IPE330 kirişinin ve sac trapezin test sonrası deformasyonu IPE330 kirişindeki bağlantı yakınındaki yerel burkulma

Şekil 13a-b'de kompozit döşemenin test sonrası görüntüsü yer almaktadır. Simetrik kenarlara doğru artan sehim, döşemede çekme bölgesi oluşturmuş beton yüzeyinde çatlaklar meydana gelmiştir. Bu durum beton döşemenin membran etkisine girdiğini açıkça göstermektedir (bkz. Şekil 13c).



(a)

(b)



(c)

Şekil 13. (a) Kompozit döşemenin test sonrasındaki görüntüsü, (b) çatlakların kırmızı boya ile belirlenmiş hali, (c) döşemenin yangın esnasındaki membran davranışı tasviri

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Türkiye’de araştırma odaklı ilk çelik-beton kompozit kat döşemesi yapısal yangın deneyi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma, Türkiye’de gerek yangın yönetmelikleri açısından gerekse yapısal yangın konusunda teorik, nümerik ve deneysel araştırmalardaki eksiklikleri gidermeyi amaçlamıştır.

Kompozit döşemenin standart yangın eğrisine göre 105 dakika yangın dayanımı olduğu kanıtlanmıştır. Alınan sonuçlar, yalıtımsız bırakılmış olan ikincil kirişin (IPE330) 800 °C’e kadar ısındığını ve dayanımını yitirdiğini göstermektedir. Ancak beton döşemenin membran davranışı göstererek yük taşıyıcı özelliğini yangın boyunca devam ettirdiği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla kompozit kat döşemelerinde taşıyıcı özelliğini yangın esnasında yitirecek olan ikincil çelik kirişlerin yalıtımsız bırakılması önerilmektedir. Büyük çaplı çelik yapılarda, sabit ve hareketli yük dağılımını sağlayan ikincil kirişlerin yalıtılmamasının yangına karşı yalıtım maliyetini 15-20% civarında azaltacağı öngörülmektedir. Bu öneri ulusal ve uluslararası ekonomik kazanımlara ve inşaat sektöründe karbon ayak izinin azaltılmasına olanak sağlayacaktır.

Bununla birlikte kompozit döşemede yer alan donatıların da sıcaklıkları kompozit döşeme merkezi çevresinde 400 °C’e kadar ulaşmıştır. Çelik (hasır) donatıların betonun alt yüzeyinden uzak yerleştirilmesi ve böylece yangına karşı beton tarafından yalıtılması önerilmektedir. Donatının basınç bölgesine yakın yerleştirilmesi, geleneksel tasarımın karşıtı bir çözümdür. Döşemenin membran davranışını gerçekleştirmesi ancak içindeki donatıların sünek ve yüksek mukavemete sahip olmasına bağlıdır.

Yapısal yangın deneyinde ilk defa kullanılan simetrik sınır koşulları oluşturan bir birleşim mekanizması kullanılmıştır. Bu mekanizma yangın esnasında moment aktaran, yatay düzlemde sabit hem çekme hem de basınca karşı dayanıklı, düşey düzlemde serbest olacak şekilde tasarlanmıştır. Bu proje aşamasında ortaya çıkan buluş için Türk Patent Ofisine başvuru yapılmıştır. Birleşim mekanizmasının yangın esnasında oluşan yüksek sıcaklıklar altında beklendiği şekilde düşey serbestlik sağladığı, sehim ölçerlerden alınan veriler ile doğrulanmıştır.

Teşekkür

Bu araştırma Boğaziçi Üniversitesi Bilimsel Araştırma (BAP) No. 7122P, TÜBİTAK 3001 Başlangıç Ar-Ge No. 114M791 ve Avrupa 7. Çerçeve Marie Curie IIF CONFIRE 328993 proje destekleri ile gerçekleştirilmiştir. Kompozit döşemenin çelik çerçeve ve birleşim mekanizması imalatında emeği geçen Çeçen İnşaat ve Enerji Sistemleri A.Ş.’den Cengizhan Çeçen ve RZK Çelik A.Ş.’den Kağan Yemez’e teşekkür ederiz. Deney sırasında proje asistanlığı yapmış Boğaziçi Üniversitesi’nde yüksek lisansını devam ettiren Caner Bölükbaş’a yardımlarından dolayı teşekkür ederiz.

Kaynaklar

- [1] Gann, RG. Final report on the collapse of World Trade Center Building 7, Federal building and fire safety investigation of the World Trade Center disaster, NCSTAR-1A, NIST, 2008.

- [2] The Geneva Association, World Fire Statistics Newsletter, 29, 2014.
- [3] Beitel J and Iwankiw N., Analysis of needs and existing capabilities for full-scale fire resistance testing, National Institute of Standards and Technology, NIST GCR, 02-843, 2002.
- [4] British Steel plc, Swinden Technology Centre U. The behaviour of multi-storey steel framed buildings in fire, Technical report, British Research Establishment (BRE), UK, 1999.
- [5] Bailey CG., The structural behaviour of steel frames with composite floor slabs subject to fire: Part 1: Theory, *The Structural Engineer*, 78(11), 19-27, 2000.
- [6] Bailey CG., Membrane action of slab/beam composite floor systems in fire, *Engineering Structures*, 26, 1691-1703, 2004.
- [7] Bailey CG. and Toh WS., Small-scale concrete slab tests at ambient and elevated temperatures, *Engineering Structures*, 29, 2775-2791, 2007.
- [8] Buchanan Andrew H., *Structural Design for Fire Safety*, New York, Wiley, 2001.
- [9] Wald F, da Silva LS, Moore D, Lennon T, Chladna M, Santiago A, Benes M, and Borges L., Experimental behaviour of a steel structure under natural fire, *Fire Safety Journal*, 41(7), 509–522, 2006.
- [10] Astaneh-Asl A, Liu J, McMullin KM., Behavior and design of single plate shear connections, *Journal of Constructional Steel Research*, 58(5-8), 1121-41, 2002.
- [11] Garlock ME and Selamet S., Modeling and behavior of steel plate connections subject to various fire scenarios, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, USA, 136(7), 897–906, 2010.
- [12] Selamet S, Garlock ME., Robust fire design of single plate shear connections. *Engineering Structures*, 32(8), 2367-2378, 2010.
- [13] Chung KF and Ip KH., Finite element investigation on the structural behaviour of cold-formed steel bolted connections, *Engineering Structures*, 23(9), 1115-25, 2001.
- [14] El-Rimawi JA, Burgess IW, Plank RJ., The influence of connection stiffness on the behaviour of steel beams in fire, *Journal of Constructional Steel Research*, 43(1-3), 1997.
- [15] Selamet S, Garlock ME., Predicting the maximum compressive beam axial force during fire considering local buckling, *Journal of Constructional Steel Research*, 71, 189-201, 2012.
- [16] Selamet S, Garlock ME., Plate buckling strength of steel wide-flange sections at elevated temperatures. *Journal of Structural Engineering*, ASCE 2013; 139(11): 1853-1865.
- [17] Selamet S, Bolukbas C., Fire resilience of shear connections in a composite floor: Numerical investigation, *Fire Safety Journal*, doi:10.1016/j.firesaf.2016.02.003, 2016.

- [18] Kirby BR., The behaviour of high-strength Grade 8.8 bolts in fire, *Journal of Constructional Steel Research*, 33(1-2): 3-38, 1995.
- [19] Binaların yangından korunması hakkında yönetmelik, *Resmi Gazete*, Sayı 27344, 2009.
- [20] “Simetrik sınır koşulları sağlayan bir yangın dayanım test mekanizması”, Evrak tarihi: 26.11.2015, Evrak No: 2015-GE-436248, Dosya No: 2015/14992
- [21] CEN. ENV 1991-1-2:2002 – Eurocode 1, Actions on structures, Part 1.2: General actions – Actions on structures exposed to fire, Brussels, 2002.
- [22] CEN. ENV 1993-1-2:2005 – Eurocode 3, Design of steel structures, Part 1.2: General rules – Structural fire design, Brussels, 2005.

