

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA ULUSLARARASI AKADEMİK ÇALIŞMALAR

Haziran 2024

EDİTÖR

PROF. DR. EROL İSKENDER

Genel Yayın Yönetmeni / Editor in Chief • C. Cansın Selin Temana

Kapak & İç Tasarım / Cover & Interior Design • Serüven Yayınevi

Birinci Basım / First Edition • © Haziran 2024

ISBN • 978-625-6319-50-9

© copyright

Bu kitabın yayın hakkı Serüven Yayınevi'ne aittir.

Kaynak gösterilmeden alıntı yapılamaz, izin almadan hiçbir yolla çoğaltılamaz.

The right to publish this book belongs to Serüven Publishing. Citation can not be shown without the source, reproduced in any way without permission.

Serüven Yayınevi / Serüven Publishing

Türkiye Adres / Turkey Address: Kızılay Mah. Fevzi Çakmak 1. Sokak

Ümit Apt No: 22/A Çankaya/ANKARA

Telefon / Phone: 05437675765

web: www.seruvenyayinevi.com

e-mail: seruvenyayinevi@gmail.com

Baskı & Cilt / Printing & Volume

Sertifika / Certificate No: 47083

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ALANINDA ULUSLARARASI AKADEMİK ÇALIŞMALAR

Haziran 2024

Editör

Prof. Dr. Erol İSKENDER

İÇİNDEKİLER

Bölüm 1

HAFİF ÇELİK YAPILARDA BİRLEŞİM TİPLERİ VE DÖNME RİJİTLİĞİ

Casim YAZICI..... 7

Bölüm 2

ULAŞIM TALEP TAHMİN MODELLERİNDE TRAFİK ANALİZ
ZONU BÜYÜKLÜKLERİNDEKİ DEĞİŞİMİN YOLCULUK ATAMA
SONUÇLARINA OLAN ETKİSİNİN MODELLENMESİ

Yunus Emre AYÖZEN 23

Bölüm 3

DİKDÖRTGEN KESİTLİ BETONARME KİRİŞİN ÜÇ NOKTALI EĞİLME
DAVRANIŞININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Halit Erdem ÇOLAKOĞLU 39

Muhammed ÖZTEMEL..... 39

Bölüm 4

PAS SÖKÜCÜ KİMYASALIN DONATI ÇELİĞİ DAYANIMINA ETKİSİ

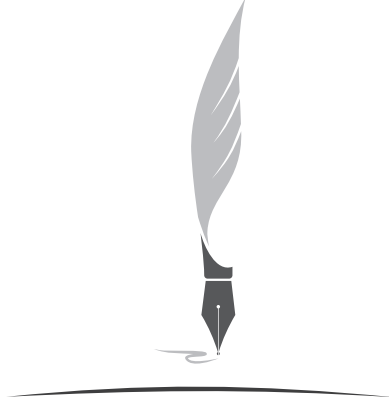
Said DUSAK 55

Bölüm 5

FARKLI BETON DAYANIM SINIFININ BETONARME KİRİŞ
DAVRANIŞINA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Muhammed ÖZTEMEL..... 67

Halit Erdem ÇOLAKOĞLU 67



Bölüm 1

HAFİF ÇELİK YAPILARDA BİRLEŞİM TİPLERİ VE DÖNME RİJİTLİĞİ

Casim YAZICI¹

¹ Dr. Öğr. Üyesi, Ağrı İbrahim Çeçen Üniversitesi, Doğubayazıt Ahmed-i Hani Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, ORCID: 0000-0002-2061-4275

1. Giriş

Hafif çelik yapılar, inşaat sektöründe giderek daha fazla tercih edilen bir yapı türüdür. Bu yapıların tercih edilmesinin başlıca nedenleri arasında hızlı inşaat süreci, maliyet etkinliği ve yüksek mukavemet özellikleri bulunmaktadır. Hafif çelik yapılarda birleşimlerin tasarımı ve bu birleşimlerin dönme rijitliği, yapısal performans açısından kritik öneme sahiptir. Bu bölümde, hafif çelik yapılarda kullanılan çeşitli birleşim tipleri ve bu birleşimlerin dönme rijitliği üzerindeki etkileri ele alınacaktır.

Hafif çelik yapılar, inşaat mühendisliği uygulamalarında düşük maliyet, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve hızlı inşaat süreleri gibi avantajları nedeniyle giderek daha fazla tercih edilmektedir. Bu yapılarda kullanılan birleşim türleri ve bu birleşimlerin dönme rijitliği, yapının genel performansı ve stabilitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Birleşimlerin doğru tasarımı ve uygulanması, yapının güvenliğini ve dayanıklılığını artırmaktadır. Bu bölümde, hafif çelik yapılarda kullanılan başlıca birleşim türleri ve bunların dönme rijitliği detaylı bir şekilde ele alınacaktır.

2. Hafif Çelik Yapılarda Birleşim Tipleri

Hafif çelik yapılarda kullanılan birleşim tipleri, yapının genel performansını ve dayanıklılığını doğrudan etkiler. Bu birleşim tipleri arasında vidalı, kaynaklı, perçinli, bulonlu, hibrit, pnömatik çivileme ve pres perçinleme ve raf sistemlerindeki tırnaklı birleşimler olmak üzere hafif çelik yapılarda yaygın olarak yedi farklı birleşim tipi kullanılmaktadır. Her bir birleşim türü, belirli avantaj ve dezavantajlara sahiptir ve kullanım alanına göre seçilmektedir.

Hafif çelik yapılarda kullanılan birleşim tipleri, inşaat mühendisliğinde çeşitli uygulama alanlarına sahiptir. Bu birleşim türlerinin her biri, belirli koşullar altında en iyi performansı sağlamak üzere tasarlanmıştır. Aşağıda, bu birleşim tiplerinin bazı uygulama alanları ve özellikleri detaylandırılmıştır:

Prefabrike Yapılar: Vidalı birleşimler, prefabrike yapıların montajında yaygın olarak kullanılır. Bu yapılar, genellikle hızlı inşaat gerektiren projelerde tercih edilir. Vidalı birleşimler, bu yapılar için hızlı ve ekonomik bir montaj sağlar (Schafer, 2006). Prefabrike yapılar, modüler inşaat tekniklerinin kullanıldığı projelerde, vidalı birleşimlerin sağladığı esneklik ve kolay montaj avantajı ile öne çıkar.

Köprüler ve Yüksek Binalar: Kaynaklı ve bulonlu birleşimler, ağır yük taşıyan yapılar için uygundur. Bu birleşim türleri, yüksek mukavemet ve dayanıklılık sunarak, köprüler ve yüksek binaların güvenliğini sağlar (Salmon & Johnson, 1996). Bu tür yapılarda, kaynaklı birleşimler sürekli bir bağlantı sağlayarak yüksek stabilite sunarken, bulonlu birleşimler montaj ve bakım kolaylığı sağlar.

Tarihi Yapı Restorasyonları: Perçinli birleşimler, estetik ve mukavemet gerektiren tarihi yapı restorasyonlarında kullanılır. Bu birleşimler, yapının orijinal görünümünü korurken, yüksek dayanıklılık sağlar (Winter, 1970). Tarihi yapıların restorasyonunda, orijinal malzeme ve tekniklerle uyumlu perçinli birleşimler kullanılarak, yapının tarihi ve estetik değerleri korunur.

Özel Projeler: Hibrit birleşimler, karmaşık ve özel projelerde kullanılır. Bu birleşimler, farklı birleşim türlerinin avantajlarını bir araya getirerek, yapının genel performansını ve dayanıklılığını artırır. Hibrit birleşimler, özellikle yüksek mühendislik gerektiren projelerde yaygın olarak tercih edilir (Yu, 2000). Bu tür birleşimler, esnek ve uyarlanabilir çözümler sunar, bu da karmaşık mühendislik gerektiren projelerde büyük avantaj sağlar.

Lojistik Yapılar: Lojistik yapılar, depolama amaçlı kullanılan çelik çerçeve yapı sistemleridir. Bu yapı sistemlerinde kiriş-kolon birleşimi, konnektör denen birleşim aparatı ile yapılmaktadır. Konnektör, tırnak yapıları sayesinde kolon gövdesine girerek kiriş-kolon birleşimini sağlar. Konnektörün diğer ucuna ise kiriş kaynak yapılarak bağlanmaktadır. Bu yöntem, hızlı montaj ve yüksek mukavemet sunar, bu da lojistik yapılar için idealdir. Birleşim türlerinin avantajları ve dezavantajları Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo1. Birleşim türlerinin avantaj ve dezavantajları

Birleşim Tipi	Avantajlar	Dezavantajlar
Vidalı Birleşimler	Ekonomik, hızlı ve kolay montaj, gerektiğinde sökülebilir ve yeniden monte edilebilir.	Montaj süreci doğruluğuna bağlı mukavemet, ince cidarlı profillerde uygun değil.
Kaynaklı Birleşimler	Yüksek mukavemet ve kalıcı bağlantı, yüksek rijitlik.	İnce cidarlı profillerde deformasyona neden olabilir, uzmanlık gerektirir.
Bulonlu Birleşimler	Yüksek dayanıklılık ve güvenilirlik, montaj ve sökümü kolay.	İnce cidarlı profillerde delikler nedeniyle zayıflama, yüksek montaj doğruluğu gerektirir.
Perçinli Birleşimler	Yüksek mukavemet, estetik görünüm, kalıcı bağlantı.	Yanlış montajda stabilite kaybı, aşırı yüklemde deformasyon riski.
Pnömatik Çivileme ve Pres Perçinleme	Hızlı ve verimli montaj, düşük iş gücü maliyeti, yüksek tutunma gücü, yüksek mukavemet ve stabilite.	Yanlış montajda stabilite kaybı, aşırı yüklemde deformasyon riski.
Tırnaklı Birleşimler	Hızlı montaj ve demontaj, yüksek stabilite ve mukavemet, düşük maliyet.	Yanlış montajda stabilite kaybı, aşırı yüklemde deformasyon riski.
Hibrit Birleşimler	Montaj kolaylığı ve yüksek mukavemetin birleşimi, farklı birleşim türlerinin avantajlarını bir araya getirir.	Farklı birleşim türlerinin birleşimi karmaşık olabilir, montaj süresi ve maliyeti artabilir.

2.1. Vidalı Birleşimler

Vidalı birleşimler, hafif çelik yapılarda en yaygın kullanılan birleşim türlerinden biridir. Ekonomik olmaları, hızlı ve kolay kurulabilmeleri nedeniyle tercih edilmektedirler (Yu, 2000). Vidalı birleşimlerin mukavemeti, kullanılan vidaların kalitesine ve montaj sürecinin doğruluğuna bağlıdır. Ayrıca, gerektiğinde bu birleşimler kolayca sökülebilir ve yeniden monte edilebilirler (Winter, 1970).

İnşaat mühendisliği alanında vidalı birleşimler, genellikle prefabrike yapıların montajında ve demontajında kullanılır. Bu birleşimlerin esnekliği, yapı elemanlarının kolayca değiştirilmesine ve bakımının yapılmasına olanak tanır. Bu özellik, özellikle geçici yapılar veya sık sık değişiklik gerektiren projelerde büyük bir avantaj sağlar. Hafif çelik çerçeve sistemlerinde de yaygın olarak kullanılan vidalı birleşimler, düşük maliyet ve hızlı inşaat süresi ile karakterizedir (Schafer, 2006).

Vidaların ucu matkaplı olanları, montaj sürecini daha da kolaylaştırır. Vidalı birleşimlerin en büyük avantajlarından biri, montajın kolayca yapılabilmesi ve gerektiğinde demonte edilebilmesidir. Bu nedenle, prefabrike yapılar ve geçici yapılar için büyük bir avantaj sağlarlar (Yu, 2000; Schafer, 2006). Hafif çelik yapılarda vidalı birleşim modeli örneği Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Vidalı birleşim (Maali vd., 2023)

2.2. Kaynaklı Birleşimler

Kaynaklı birleşimler, çelik yapılar arasında kalıcı ve yüksek mukavemetli bağlantılar sağlar. Çelik elemanların birbirine sürekli bir bağ oluşturacak şekilde birleştirilmesini mümkün kılar. Ancak, ince cidarlı hafif çelik profillerde kaynaklı birleşimlerin kullanımı sınırlıdır. Bunun nedeni, kaynak işlemi sırasında meydana gelen ısı etkilerinin ince malzemelerde deformasyona ve zayıfla-

maya yol açmasıdır (Rondal, 2000). Ayrıca, kaynak işlemi uzmanlık gerektiren bir işlemdir ve doğru bir şekilde yapılmadığında birleşimlerde çatlaklar ve zayıflıklar oluşabilir (Davies & Brown, 1996). Kaynaklı birleşimler, inşaat mühendisliğinde genellikle köprüler, yüksek binalar ve endüstriyel tesisler gibi ağır yük taşıyan yapılar için tercih edilir. Bu tür birleşimler, yapının dayanıklılığını ve stabilitesini artırır. Ayrıca, çelik iskelet sistemlerinde ve ağır endüstriyel yapılarında yaygın olarak kullanılır (Salmon & Johnson, 1996).

Yüksek mukavemet ve rijitlik sağlamaları, kaynaklı birleşimleri ağır yük taşıyan yapıların inşasında vazgeçilmez kılmaktadır (Şekil 2). Ancak, montajı bulonlu birleşimlere göre daha zordur ve daha fazla uzmanlık gerektirir. Kaynak işlemi sırasında oluşan ısı etkileri, ince cidarlı hafif çelik profillerde deformasyona neden olabilir. Bu nedenle, kaynaklı birleşimler genellikle daha kalın profillerde tercih edilir (Jaspart, 2000; Davies & Brown, 1996).



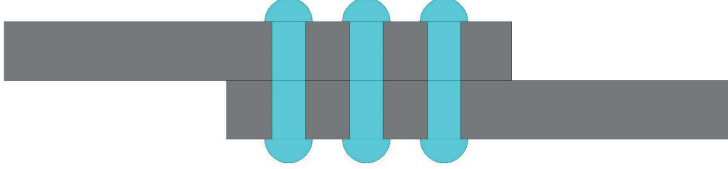
Şekil 2. Kaynaklı birleşim

2.3. Perçinli Birleşimler

Perçinli birleşimler, özellikle otomotiv endüstrisinde ve belirli hafif çelik yapı uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Perçinler, iki veya daha fazla çelik elemanı kalıcı olarak birleştirir ve yüksek mukavemet sağlar (Hancock, 1998). Son yıllarda geliştirilen ucu matkaplı “akıllı vida” gibi özel birleştirme araçları da perçinli birleşimlere alternatif olarak kullanılmaktadır (Larson & Gustafson, 1990).

İnşaat mühendisliği alanında perçinli birleşimler, genellikle tarihi yapıların restorasyonunda ve dekoratif çelik yapı elemanlarının montajında kullanılır. Bu birleşimler, estetik bir görünüm sağlarken, aynı zamanda yüksek mukavemet ve dayanıklılık sunar (Winter, 1970). Perçinli birleşimler, özellikle ince cidarlı profillerin birleştirilmesinde etkilidir. Perçinler, montaj sırasın-

da yüksek mukavemet sağlar ve deformasyona karşı dayanıklıdır. Bu nedenle, kalıcı bağlantılar oluşturmak için idealdirler ve özellikle tarihi yapıların restorasyonunda veya dekoratif yapı elemanlarının montajında tercih edilirler (Yu, 2000; Hancock, 1998). Perçin birleşim detayı Şekil 3'te sunulmuştur.



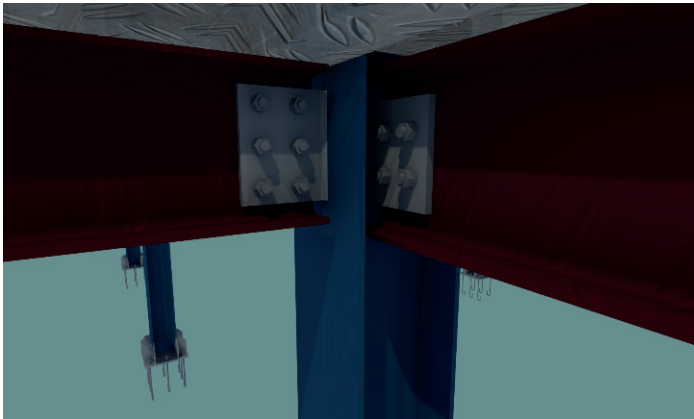
Şekil 3. Perçinli birleşim

2.4. Bulonlu Birleşimler

Bulonlu birleşimler, özellikle ağır yük taşıyan hafif çelik yapılarda yaygın olarak kullanılır. Bu birleşim türü, yüksek dayanıklılık ve güvenilirlik sunar. Ancak, ince cidarlı hafif çelik profillerde bulon delikleri malzemenin zayıflamasına neden olabileceğinden, bu tür profiller için pek uygun değildir (Jaspart, 2000).

İnşaat mühendisliğinde bulonlu birleşimler (Şekil 4), çelik çerçevelerin ve köprü yapılarının montajında sıklıkla tercih edilir. Bu birleşimler, yüklerin güvenli bir şekilde aktarılmasını sağlar ve yapının genel stabilitesini artırır. Ayrıca, bulonlu birleşimlerin montajı ve sökümü kolaydır, bu da gerektiğinde yapı üzerinde değişiklikler yapılmasını mümkün kılar (Fisher & Struik, 1974).

Bulonlu birleşimler, yapısal elemanların birbirine mekanik olarak bağlanmasını sağlar. Bu tür birleşimler, yüksek mukavemet ve güvenilirlik sunar ve genellikle montajı kolaydır. Özellikle büyük yüklere maruz kalan yapılar için tercih edilen bu birleşim türünde, genellikle yüksek mukavemetli bulonlar kullanılır ve montaj sırasında doğru sıkma torkunun uygulanması önemlidir (Yu, 2000; Fisher & Struik, 1974).

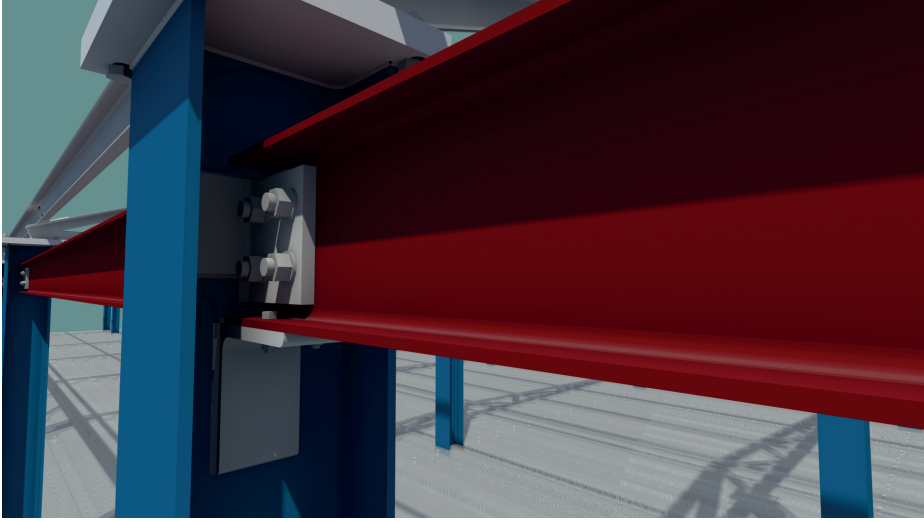


Şekil 4. Bulonlu birleşim

2.5. Hibrit Birleşimler

Hibrit birleşimler, birden fazla birleşim türünün kombinasyonunu içerir. Örneğin, bulonlu ve kaynaklı birleşimlerin bir arada kullanılması, montaj kolaylığı ile yüksek mukavemeti birleştirir. Bu tür birleşimler, belirli uygulamalarda optimal performans elde etmek için tercih edilmektedir (Yu, 2000).

İnşaat mühendisliğinde hibrit birleşimler, genellikle karmaşık yapı sistemlerinde ve özel projelerde kullanılır. Farklı birleşim türlerinin avantajlarını bir araya getirerek, yapının genel performansını ve dayanıklılığını artırır. Hibrit birleşimler, özellikle yüksek mühendislik gerektiren projelerde yaygın olarak tercih edilir (Schafer, 2006). Bu projeler, yüksek mukavemet ve esneklik gerektiren karmaşık yapılar içerir ve hibrit birleşimler bu gereksinimleri karşılamak için ideal bir çözüm sunar. Birden fazla birleşimin beraber kullanıldığı hibrit birleşim detayı Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. Hibrit birleşim

2.6. Pnömatik Çivileme ve Pres Perçinleme

Pnömatik çivileme ve pres perçinleme yöntemleri, özellikle kalın mesnet elemanlarına hafif çelik profillerin birleştirilmesinde kullanılır. Bu yöntemler, yüksek mukavemet, stabilite ve dayanıklılık sağlama özellikleriyle öne çıkar. İnşaat mühendisliğinde, özellikle ağır yük taşıyan yapılarda ve endüstriyel uygulamalarda sıkça tercih edilmektedir. Aşağıda bu yöntemlerin detayları ve kullanım alanları genişletilmiş bir şekilde ele alınmaktadır.

Pnömatik çivileme, yüksek basınçlı hava kullanılarak çivilerin çelik elemanlara çakılmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu yöntem, hızlı ve verimli montaj imkanı sunar. Pnömatik çivileme, özellikle prefabrike çelik yapıların montajında yaygın olarak kullanılır. Bu yöntemin başlıca avantajları arasında

hızlı uygulama, düşük iş gücü maliyeti ve yüksek tutunma gücü sağlamaktadır. Pnömatik çivileme işlemi sırasında, çiviler yüksek hızda ve basınçta malzemeye çakılır, bu da çivilerin malzemeye sıkı bir şekilde tutunmasını sağlar. Bu yöntem, özellikle kalın çelik plakaların ve profillerin birleştirilmesinde etkilidir. Ayrıca, pnömatik çivileme, bağlantı noktalarında homojen bir kuvvet dağılımı sağlayarak, birleşimlerin daha dayanıklı ve uzun ömürlü olmasını sağlar.

Pres perçinleme, çelik elemanların birleştirilmesi için kullanılan bir diğer yöntemdir. Bu yöntemde, perçinler pres makineleri yardımıyla çelik elemanlara yerleştirilir ve sıkıca bağlanır. Pres perçinleme, yüksek mukavemet ve stabilite sağlar ve bu nedenle ağır yük taşıyan yapılar için idealdir. Pres perçinleme, özellikle endüstriyel uygulamalarda ve büyük ölçekli inşaat projelerinde tercih edilir. Bu yöntem, manuel perçinleme işlemlerine göre daha hızlı ve güvenilirdir. Pres perçinleme makineleri, yüksek basınç ve kuvvet uygulayarak perçinlerin malzemeye tam oturmasını ve güçlü bir bağlantı oluşturmalarını sağlar. Bu da yapıların genel dayanıklılığını artırmakta olup birleşim detayı görseli Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. Pnömatik Çivileme ve Pres Perçinlemeli birleşim (Kaya, 2019)

2.7. Raf Sistemlerindeki Tırnaklı Birleşimler

Raf sistemlerinde kullanılan tırnaklı birleşimler, özellikle hızlı montaj ve yüksek stabilite sağlama özellikleriyle öne çıkar. Bu birleşimler, raf kolonları ve traversleri (kiriş ve konnektör) arasında güvenli ve sağlam bağlantılar oluşturur ve çeşitli yük kapasitelerine uygun olarak tasarlanmıştır. Depolama sistemlerinde tırnaklı birleşim tipi etkin bir şekilde kullanılmaktadır (Yazıcı, 2023). Tırnaklı birleşimler, raf sistemlerinin kolon ve traversleri arasında

bağlantı sağlamak için kullanılır. Traversin uçlarında yer alan tırnaklar, dikme üzerindeki deliklere veya yuvalara geçirilerek bağlantı sağlanır. Bu mekanizma, montaj sırasında hızlı ve kolay bir şekilde uygulanabilir. Tırnakların dikme üzerindeki deliklere tam oturması, birleşimin stabilitesini ve taşıma kapasitesini artırır (Galambos, 1998).

Tırnaklı birleşimlerin çalışma prensibi, bağlantı noktalarında oluşan sürtünme ve mekanik kilitlenme ile açıklanabilir. Tırnakların dikme üzerindeki deliklere geçirilmesi sırasında oluşan sürtünme kuvvetleri, birleşimin yerinden oynamasını engeller. Aynı zamanda, tırnakların deliklere tam oturması ile mekanik bir kilitlenme sağlanır ve bu da birleşimin yüksek mukavemet ve stabilite sunmasına katkıda bulunur (Trahair & Bradford, 1998). Depolama raf sistemlerinde yaygın olarak kullanılan tırnak detaylı raf birleşim modeli Şekil 7’de sunulmuştur.

Tırnaklı birleşimlerin avantajları arasında hızlı montaj ve demontaj, yüksek mukavemet, stabilite ve düşük maliyet yer alır. Bu birleşim türü, özellikle büyük depolama sistemlerinde ve sık sık değişiklik gerektiren uygulamalarda tercih edilir. Tırnaklı birleşimler, kullanıcıların raf sistemlerini kolayca yeniden düzenlemelerine olanak tanır (Schafer, 2006). Ancak, tırnaklı birleşimlerin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Örneğin, yanlış montaj veya eksik oturma durumunda birleşimin stabilitesi azalabilir. Ayrıca, aşırı yükleme durumlarında tırnakların deformasyonu veya kırılması riski mevcuttur. Bu nedenle, tırnaklı birleşimlerin doğru montajı ve uygun yük kapasitelerinin belirlenmesi büyük önem taşır (Yu, 2000).

Tırnaklı birleşimler, raf sistemlerinde güvenli, hızlı ve esnek bir montaj sağlar. Yüksek mukavemet ve stabilite sunan bu birleşimler, özellikle endüstriyel depolama tesisleri, lojistik merkezleri ve perakende depolarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Tırnaklı birleşimlerin doğru montajı ve uygun yük kapasitelerinin belirlenmesi, raf sistemlerinin güvenli ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar. İnşaat mühendisliği projelerinde, tırnaklı birleşimlerin avantajları ve dezavantajları dikkate alınarak doğru birleşim tipinin seçilmesi büyük önem taşır.



Şekil 7. Raf birleşimi

İnşaat mühendisliği alanında tırnaklı birleşimler, özellikle depolama sistemlerinin tasarımında ve uygulanmasında yaygın olarak kullanılır. Bu birleşimler, yüksek mukavemet ve stabilite sağlayarak, raf sistemlerinin güvenli ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlar. Ayrıca, tırnaklı birleşimlerin hızlı montaj özellikleri, inşaat projelerinin süre ve maliyet etkinliğini artırır (Rondal, 2000).

1. Endüstriyel Depolama Tesisleri: Tırnaklı birleşimler, endüstriyel depolama tesislerinde raf sistemlerinin hızlı ve verimli bir şekilde kurulmasını sağlar. Bu tesislerde, büyük miktarda malzemenin düzenli ve güvenli bir şekilde depolanması gerekmektedir ve tırnaklı birleşimler bu gereksinimleri karşılar (Schafer, 2006).

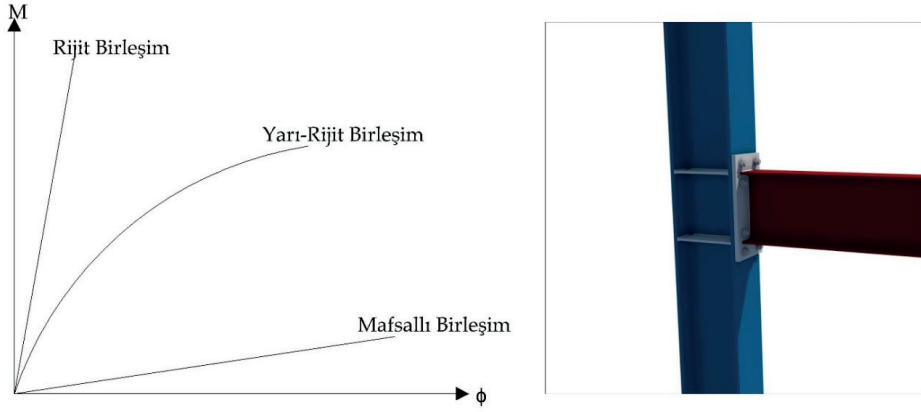
2. Lojistik Merkezleri: Lojistik merkezlerinde, sürekli değişen depolama ihtiyaçlarına hızlı bir şekilde yanıt verebilmek için tırnaklı birleşimler kullanılır. Bu merkezlerde, raf sistemlerinin kolayca yeniden düzenlenebilmesi, operasyonel verimliliği artırır (Winter, 1970).

3. Perakende Depoları: Perakende sektöründe, ürün çeşitliliği ve stok değişiklikleri sıkça gerçekleşir. Tırnaklı birleşimler, perakende depolarında raf sistemlerinin esnek kullanımını sağlar ve bu da stok yönetimini kolaylaştırır (Trahair & Bradford, 1998).

3. Dönme Rijitliği

Birleşimlerin dönme rijitliği, yapının genel stabilitesi ve dayanımı üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Dönme rijitliği, birleşimin maruz kaldığı bükülme momenti ile bu momente karşı oluşan dönüş arasındaki ilişkiyi ifade eder. Birleşimlerin rijitlik derecesi, yapının deplasmanlarını ve iç kuvvetlerin dağılımını etkiler. Birleşimlerin rijit, yarı-rijit ve mafsallı olduğu mo-

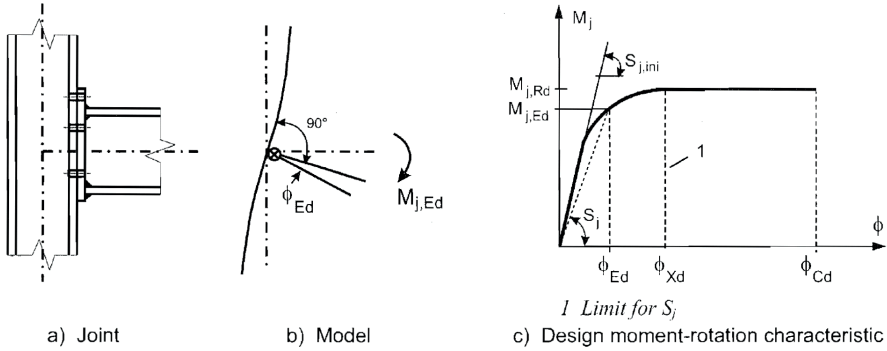
ment-dönme eğrilerine göre belirlenmekte olup moment-dönme eğrisi Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 8. Birleşimlerin dönme rijitliği

Eurocode 3, çelik yapılarda bağlantıların dönme rijitliğini hesaplamak için yönergeler sağlar. İlk adım, bağlantının dönme rijitliği ve kapasitesine göre rijit, yarı rijit veya esnek olarak sınıflandırılmasıdır. Başlangıç olarak, birleşimdeki moment ve buna karşılık gelen dönme açısı belirlenir ve bu bilgiler kullanılarak başlangıç dönme rijitliği hesaplanır. Çelik yapılarda birleşimin tasarım moment-dönme rijitliği karakteristiği Şekil9'da verilmiştir.

$$S_{j,ini} = \frac{M_j}{\theta}$$



Şekil 9. Bir birleşim için tasarım momenti-dönme karakteristiği (EN 1993-1-8, 2005)

Daha sonra, bağlantının rijitliğine katkıda bulunan civatalar, kaynaklar, uç plakaları ve bağlanan elemanlar gibi çeşitli bileşenler belirlenir. Bu bileşenlerin her birinin rijitliği, Eurocode 3, Bölüm 1-8 (EN 1993-1-8) tarafından sağlanan formüller kullanılarak hesaplanır. Bu hesaplamalar, her bir bile-

şenin geometrisine, malzeme özelliklerine ve yükleme koşullarına bağlıdır. Bireysel bileşenler için rijitlik değerleri elde edildikten sonra, bunlar toplam bağlantı rijitliğini belirlemek için birleştirilir.

$$\frac{1}{S_{j,ini}} = \sum \frac{1}{S_{c,i}}$$

Burada $S_{c,i}$ her bir bileşenin rijitliğidir.

Toplam başlangıç dönme rijitliği belirlendikten sonra, bağlantı rijitliğine göre sınıflandırılır. Eurocode 3'e göre, bir bağlantı rijit kabul edilir eğer

$$S_{j,ini} \geq 25 \frac{EI}{L}$$

yarı rijit kabul edilir eğer

$$0.5 \frac{EI}{L} \leq S_{j,ini} < 25 \frac{EI}{L}$$

ve mafsallı kabul edilir eğer

$$S_{j,ini} < 0.5 \frac{EI}{L}$$

Burada E çeliğin elastik modülü, I kirişin ikinci momenti ve L kirişin uzunluğudur.

Bu süreci daha iyi anlamak için, bilinen bir moment ve buna karşılık gelen dönme açısına sahip bir bağlantıyı ele alalım. Moment-dönme eğrisini çizerek ve başlangıçtaki doğrusal bölümü belirleyerek, başlangıç rijitliği bu segmentin eğimi olarak belirlenebilir. Örneğin, moment 0'dan 10 kNm'ye artarken dönme açısı 0'dan 0.01 radiana çıkarsa, başlangıç rijitliği

$$\frac{10 \text{ kNm}}{0.01 \text{ rad}} = 1000 \text{ kNm/rad}$$

olarak hesaplanır.

3.1. Rijit Birleşimler

Rijit birleşimler, bağlı elemanların uçlarındaki dönmelerin aynı olmasını sağlar ve yapının global rijitlik düzeyini artırır. Bu tür birleşimler, yüksek moment kapasitesine sahip olup, yapının stabilitesini artırır. Rijit birleşimler, genellikle köprüler, yüksek binalar ve endüstriyel tesisler gibi ağır yük taşıyan yapılarda kullanılır (Jaspart, 2000; Eurocode 3, 1992).

3.2. Yarı Rijit Birleşimler

Yarı rijit birleşimler, belirli bir rijitlik seviyesine sahip olup, bağlı elemanlar arasında bir miktar dönme farkı oluşmasına izin verir. Bu tür birleşimler, yapının genel rijitliğini artırırken, daha ekonomik bir çözüm sunar. Yarı rijit birleşimler, özellikle deprem ve rüzgar gibi dinamik yüklere karşı yapının performansını artırır (Jaspart, 2000; Schafer, 2006).

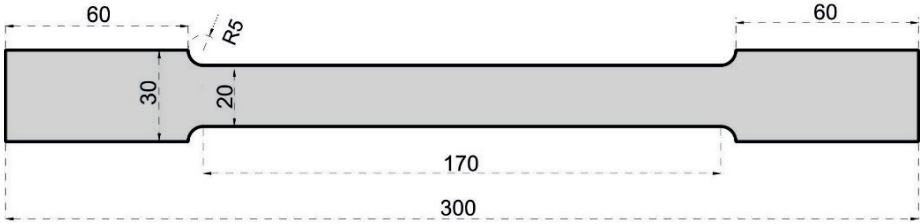
3.3. Mafsallı Birleşimler

Hareketli veya mafsallı birleşimler, bağlı elemanlar arasında dönmeye izin verir. Bu tür birleşimler, yapının esnekliğini artırır ve dinamik yüklere karşı daha iyi performans gösterir. Hareketli birleşimler, özellikle geçici yapılar ve hafif yapılar için uygundur (Yu, 2000; Winter, 1970).

4. Birleşim Tiplerinin Tasarım Kriterleri

4.1. Malzeme Seçimi

Hafif çelik yapılarda kullanılan birleşimlerin tasarımında malzeme seçimi kritik bir rol oynar. Çelik elemanların kalitesi, birleşimin dayanıklılığı ve mukavemeti üzerinde doğrudan etkilidir. Yüksek kaliteli çelik malzemelerin kullanılması, birleşimlerin uzun ömürlü ve güvenilir olmasını sağlar. Şekil 10'da verilen çekme kuponu test numunesi test edilmesi ile çelik elemanların mekanik özellikleri belirlenmektedir.



Şekil 10. Çekme kuponu test numunesi (Yazici vd. 2023)

4.2. Yük Taşıma Kapasitesi

Birleşimlerin tasarımında yük taşıma kapasitesi önemli bir faktördür. Birleşimlerin, yapının taşıyacağı yükleri güvenli bir şekilde aktarabilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, birleşimlerin tasarımında, maksimum yük taşıma kapasitesinin hesaplanması ve bu kapasitenin aşılmaması için gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir.

4.3. Dayanıklılık ve Hizmet Ömrü

Hafif çelik yapılarda kullanılan birleşimlerin dayanıklılığı ve uzun ömürlü olması, yapının genel performansı açısından büyük önem taşır. Birleşimlerin, çevresel faktörlere karşı dayanıklı olması ve zamanla performansını yitirmemesi gerekmektedir. Bu nedenle, birleşim tasarımında dayanıklılık ve uzun ömür kriterleri göz önünde bulundurulmalıdır.

5. Dönme Rijitliği ve Önemi

Dönme rijitliği, bir birleşimin dönmeye karşı gösterdiği direnci ifade eder. Yani, birleşimin belirli bir moment altında ne kadar dönme yapacağını belirler. Dönme rijitliği, yapısal analizde önemli bir parametredir ve birleşimlerin performansını doğrudan etkiler. Dönme rijitliği, yapısal analizde kritik bir rol oynar. Birleşimlerin dönme rijitliği, yapının genel stabilitesi ve dayanıklılığı üzerinde doğrudan etkilidir. Dönme rijitliği yüksek olan birleşimler, yapının daha az deformasyon yapmasını sağlar ve bu da yapının güvenliğini artırır.

Farklı birleşim tiplerinin dönme rijitliği üzerinde farklı etkileri vardır. Örneğin, vidalı birleşimler genellikle yüksek dönme rijitliği sağlarken, perçinli birleşimler daha düşük dönme rijitliği sunabilir. Birleşim tiplerinin bu etkileri, yapısal analizde dikkate alınmalı ve birleşimlerin tasarımında göz önünde bulundurulmalıdır.

5.1. Birleşimlerin Dönme Rijitliğinin Hesaplanması ve Modellenmesi

Birleşimlerin dönme rijitliğinin hesaplanması için çeşitli teorik modeller kullanılabilir. Bu modeller, birleşimlerin mekanik özelliklerini ve davranışlarını analiz etmek için matematiksel formüller ve yaklaşımlar kullanır. Teorik modeller, birleşimlerin tasarımında önemli bir rehberlik sağlar.

DeneySEL yöntemler, birleşimlerin dönme rijitliğinin belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Bu yöntemler, laboratuvar ortamında gerçekleştirilen testler ve ölçümler aracılığıyla birleşimlerin performansını değerlendirir. DeneySEL veriler, teorik modellerin doğrulanması ve birleşim tasarımının iyileştirilmesi için kullanılır.

Sayısal simülasyon teknikleri, birleşimlerin dönme rijitliğinin analizinde yaygın olarak kullanılır. Finite Element Method (FEM) gibi simülasyon teknikleri, birleşimlerin karmaşık mekanik davranışlarını modellemek ve analiz etmek için kullanılır. Bu teknikler, birleşim tasarımının optimize edilmesine ve yapısal performansın iyileştirilmesine yardımcı olur.

6. Sonuçlar

Hafif çelik yapılarda kullanılan çeşitli birleşim türleri, yapının performansı ve dayanıklılığı üzerinde önemli etkilere sahiptir. Bu çalışmalarda ele alınan birleşim türlerinin her biri, belirli avantajlar ve dezavantajlar sunar ve farklı uygulama alanlarında optimum performans sağlamak için kullanılır.

Vidalı birleşimler, ekonomik ve hızlı montaj imkanı sağlar. Bu birleşimler, gerektiğinde kolayca sökülebilir ve yeniden monte edilebilir, bu da prefabrik yapılar ve geçici yapılar için büyük bir avantajdır. Ancak, vidalı birleşimlerin mukavemeti, montaj sürecinin doğruluğuna bağlıdır ve ince cidarlı profillerde uygun olmayabilir.

Kaynaklı birleşimler, yüksek mukavemet ve kalıcı bağlantılar sağlar. İnşaat mühendisliğinde ağır yük taşıyan yapılarda yaygın olarak kullanılır. Ancak, kaynak işlemi ince cidarlı hafif çelik profillerde deformasyona neden olabilir ve uzmanlık gerektirir.

Bulonlu birleşimler, yüksek dayanıklılık ve güvenilirlik sunar ve montajı kolaydır. Bu birleşimler, çelik çerçevelerin ve köprü yapılarının montajında sıklıkla tercih edilir. İnce cidarlı profillerde delikler nedeniyle zayıflama riski bulunur.

Perçinli birleşimler, yüksek mukavemet ve estetik görünüm sağlar. Tarihi yapıların restorasyonunda ve dekoratif yapı elemanlarında yaygın olarak kullanılır. Yanlış montaj durumunda stabilite kaybı ve aşırı yüklemde deformasyon riski vardır.

Pnömatik çivileme ve pres perçinleme yöntemleri, hızlı ve verimli montaj imkanı sunar ve ağır yük taşıyan yapılarda yüksek mukavemet ve stabilite sağlar. Pnömatik çivileme ve pres perçinleme, endüstriyel uygulamalarda ve büyük ölçekli inşaat projelerinde tercih edilir. Yanlış montaj durumunda stabilite kaybı riski vardır.

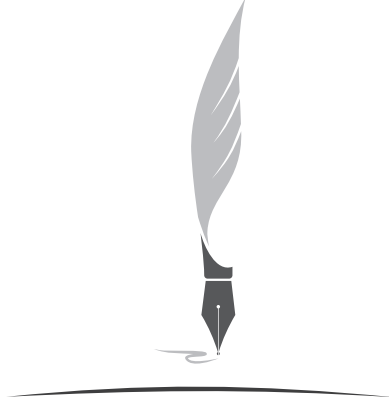
Tırnaklı birleşimler, raf sistemlerinde hızlı montaj ve demontaj imkanı sunar. Yüksek stabilite ve mukavemet sağlar, ancak yanlış montaj durumunda stabilite kaybı riski mevcuttur. Bu birleşimler, özellikle depolama sistemlerinde ve sık sık değişiklik gerektiren uygulamalarda tercih edilir.

Hibrit birleşimler, birden fazla birleşim türünün avantajlarını bir araya getirir. Montaj kolaylığı ve yüksek mukavemetin birleşimi, bu birleşimlerin karmaşık yapı sistemlerinde ve özel projelerde kullanılmasını sağlar. Ancak, hibrit birleşimlerin montaj süresi ve maliyeti artabilir.

Bu çalışmada ele alınan birleşim türleri, hafif çelik yapıların performansını ve dayanıklılığını artırmak için kritik öneme sahiptir. Doğru birleşim tipinin seçimi, yapıların güvenliği ve uzun ömürlülüğü açısından büyük önem taşır.

KAYNAKÇA

- Davies, J. M., & Brown, B. (1996). *The Stability and Strength of Steel Structures*. CRC Press.
- EN 1993-1-8: Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-8: Design of joints.
- Fisher, J. W., & Struik, J. H. A. (1974). *Guide to Design Criteria for Bolted and Riveted Joints*. Wiley-Interscience.
- Galambos, T. V. (1998). *Guide to Stability Design Criteria for Metal Structures*. Wiley.
- Hancock, G. J. (1998). *Design of Cold-Formed Steel Structures*. Australian Institute of Steel Construction.
- Jaspart, J. P. (2000). General report: session on connections. *Journal of Constructional Steel Research*, 55(1-3), 69-89.
- Kaya, M. T. (2019). Hafif çelik yapıların bulon, vida ve perçinli birleşimlerinde farklı seviyelerdeki korozyonun etkileri (Yüksek Lisans Tezi). Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Larson, S. C., & Gustafson, C. G. (1990). *Structural Applications of Mechanical Fasteners*. American Society of Civil Engineers.
- Maali, M. S., Maali, M., & Yazici, C. (2023, January). Experimental investigation of screwed beam-column connection using cold-formed steel back-to-back sections with gusset-plate. In *Structures* (Vol. 47, pp. 2025-2036). Elsevier.
- RMI (Rack Manufacturers Institute). (2012). *Considerations for the Planning and Use of Industrial Steel Storage Racks*. MHI.
- Rondal, J. (2000). Cold-Formed Steel Members and Structures: General Report. *Journal of Constructional Steel Research*, 55(1-3), 59-68.
- Salmon, C. G., & Johnson, J. E. (1996). *Steel Structures: Design and Behavior*. Harper-Collins College Publishers.
- Schafer, B. W. (2006). Review: The Direct Strength Method of Cold-Formed Steel Member Design. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(7), 709-726.
- Trahair, N. S., & Bradford, M. A. (1998). *The Behaviour and Design of Steel Structures to EC3*. Taylor & Francis.
- Winter, G. (1970). *Design of Cold-Formed Steel Structures*. McGraw-Hill.
- Yazici, C., Arik, E., & Özkal, F. M. (2023). Influence of design parameters on beam-to-column connections of steel storage rack systems. *Engineering Failure Analysis*, 152, 107439. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107439>
- Yu, W. W. (2000). *Cold-Formed Steel Design* (3rd ed.). John Wiley & Sons, Inc.



Bölüm 2

ULAŞIM TALEP TAHMİN MODELLERİNDE TRAFİK ANALİZ ZONU BÜYÜKLÜKLERİNDEKİ DEĞİŞİMİN YOLCULUK ATAMA SONUÇLARINA OLAN ETKİSİNİN MODELLENMESİ

Yunus Emre Ayözen¹

¹ Dr., 0000-0002-9394-1568

Yıldız Teknik Üniversitesi, İSTANBUL

DOKTORA TEZİ

Yunus Emre AYÖZEN

(Y1313.690001)

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

İnşaat Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç Dr. Mehmet Fatih ALTAN

1. Giriş

Uzun yıllardan beri otoriteler, ulaşım yatırımlarının yapılabilirlik ve ekonomik başarısını ortaya koymak için talep tahmin modellerini kullanmaktadırlar. Ulaşım sisteminin ve sistemi kullanacak kullanıcının niteliklerinin değişmesi durumunda ulaşım altyapısının talebinin ne olacağını tahmin etmek ulaştırma mühendislerinin üzerinde çalıştığı konular arasındadır. Bu amaçla yolculuk talep tahmin modelleri geliştirilmiştir. Yolculuk talep tahmin modelleri kullanılarak alternatif senaryolar, arazi kullanım konfigürasyonları ve ulaşım altyapıları ile yolculuk, kullanıcı ve zon karakteristiklerine göre geleceğe yönelik tahminler gerçekleştirilmektedir.

Karar verme sürecini iyileştirmek için ulaşım ile ilgili kuruluşlar sürekli yeni model altyapıları geliştirmektedir. Son zamanlarda geleneksel modeller oldukça geliştirilmiş ve kişilerin yolculuklarını zaman ve tür bazlı modellemeye yarayan bireysel aktivite tabanlı modeller ortaya çıkmıştır.

Yolculuk talep tahmin modelleri farklı kabuller altında yolculuk taleplerinin nasıl değiştiğini sistematik bir çerçevede incelemeyi sağlamaktadır. Kullanılacak modelin tipi ve detayı da çalışmanın beklentilerine göre değişiklik göstermektedir. Temelde yolculuk modeli olarak yaygın kullanılan üç temel yöntem bulunmaktadır:

1. Kroki Planlama Modellemesi; elektronik Çizelgeler ve coğrafi bilgi sistemleri gibi yazılım araçlarını kullanan, genellikle basit, uygulanması kolay ve nispeten daha az veri gerektiren modellerdir. Kroki planlama modelleri, belirli hedef analizleri için kullanılabilir; fakat büyük ölçekli, uzun vadeli politika ve yatırım kararları için bilgi vermeyebilirler (Joe C, 2015).

2. Yolculuk Tabanlı Modelleme; yaygın olarak zonsal, alt zonlara ilişkin ve proje bazlı ulaşım yatırımlarının analiz edilmesinde ve karar verme süreçlerinde kullanılır. Yolculuk tabanlı modeller genellikle 4 aşamalı model olarak anılır. Bu aşamalar sırası ile yolculuk üretim ve çekimi, yolculuk dağılımı, türel seçim ve şebeke ataması aşamalarından oluşmaktadır (Joe C, 2015).

3. Aktivite Tabanlı Modelleme; yolculuk tabanlı modelleme ile benzerlik göstermekle birlikte, zaman ve mekân konularında daha gerçekçi verilere dayanması, aktiviteler ve yolculuklar arasındaki ilişkilere dayanıyor olması ile de bazı avantajlar içermektedir. Toplaştırılmış veriler dışında bireysel kişi bazlı veriler kullanıyor olmasıyla da ölçülebilirliği daha iyidir. Yolculuk tabanlı modeller ise trafik analiz zonları bazında toplaştırılmış verilere dayanmaktadır (Joe C, 2015).

Çalışmanın birinci bölümünde, yolculuk talep tahmin modelleri olarak “Yolculuk Tabanlı Modelleme” ve “Aktivite Tabanlı Modelleme” yöntemleri incelenmiştir.

İkinci bölümde ise; talep tahmin modellerinin yapısına ve TransCAD yazılımı uygulamalarına değinilmiştir. TransCAD yazılımı uygulaması üretim-çekim modeli, dağılım modeli, türel seçim modeli, şebeke atama modeli, toplu taşıma şebeke atama modeli başlıklarında incelenmiştir.

Çalışmanın üçüncü bölümünde ise, İstanbul İli için hazırlanan talep tahmin modelinin yapısına değinilmektedir. İstanbul İli için uygulanan yolculuk tabanlı dört aşamalı talep tahmin modeli incelenmiştir.

Dördüncü bölümde ise; İstanbul İli için oluşturulan trafik analiz zonlarının yapısı incelenmiştir. Bu bölümde daha küçük zon yapılanması kurlurken yapılan düzenlemelere değinilerek bu iyileştirmelerin şebeke ataması algoritmaları üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Kadıköy-Kartal-Pendik Metro Hattı için genel işletme bilgileri verilerek; hat boyunca farklı büyüklüklerdeki trafik analiz zonları için talep tahmin modeli çıktılarının tutarlılığı incelenmiş, elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Son bölümde ise tezin genel bir değerlendirmesi yapılmış, farklı zon büyüklükleri ile yapılmış model atamaları incelenmiş ve karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan karşılaştırmalar sonucunda zon büyüklüğünün belirlenmesi ile zon nitelik bilgileri arasında bir ilişki aranmıştır.

Kent içi ulaşım sorununa yaklaşım, ilk ortaya çıktığından bugüne kadar çeşitli aşamalardan geçmiştir. Sorun, daha önceleri otomobil talebinin artması ve buna karşılık yolların yetersiz kalması nedeniyle trafik sıkışıklığı şeklinde ortaya çıkmıştır. Daha sonraları, trafikteki tıkanıklıklara tek tek veya caddeler bazında yaklaşmanın yetersiz bir yol olduğu açık bir biçimde anlaşılmıştır. Bunun sonucu olarak; kent içi ulaşım, tüm şebeke gözetilerek bir sistem anlayışı ile ele alınmıştır (Elker, 2003:177-178).

Dünyada kentsel ulaştırmanın önemi, İkinci Dünya Savaşı'nın ardından otomobilin ve motorlu taşıtların sayılarının hızla artışına bağlı olarak ön plana çıkmıştır. Otomobil arzının artması, buna karşılık karayolu ağlarının yetersizliği, kent içinde trafik sorununun doğmasına neden olmuştur. 1950'li yıllardan itibaren, dünyada ulaşımında uzun dönemli planlama çalışmaları önem verilmiştir. Bu döneme kadar ulaştırmada ayrıcalıklı ve az sayılı bireysel araç sayısında hızla büyüyen bir artış görülmüştür. İnsanların özel otomobillere olan talebi büyük kentler dışında toplu taşıma araçlarının kaybolmasına neden olmuştur. Buna bağlı olarak trafiğe çözüm üretebilmek amacıyla, kentlerde yeni yol ağları oluşturulmuş ve kent merkezlerine de otoparklar inşa edilmiştir. 1960'larda dünyada meydana gelen hızlı teknolojik gelişmelerin etkisinde kalınmış ve sorunların çözümünde teknolojinin yeterli olacağı düşünülmüştür. Bu düşünce planlama çalışmalarını olumsuz yönde etkilemiştir. 1970'lerin sonlarından başlayarak daha çok kabul gören ve genellikle yolculuk talep yönetimi olarak adlandırılan politika da böyle bir yaklaşımdan doğmuştur (Kancabaş,1998:25).

Gelecekteki ulaşım talebini olabildiğince hassas bir biçimde tahmin etmek, ulaştırma mühendislerinin önde gelen çabalarından biri haline gelmiştir. Bunun için, yolculuk davranışları ile diğer kentsel ögeler (arazi kullanımı ve nüfusun sosyo-ekonomik yapısı) arasındaki ilişkiyi açıklayan modeller geliştirilmiştir. Böylece, kentin gelecekteki yapısı (zonların nüfusu, sosyal yapısı, arazi kullanım şekli ve yoğunluğu) bilindiğinde, yollar üzerinde meydana gelecek yolculuk talebinin tahmin edilmesine yardımcı olacak teknik araçlar ortaya çıkmıştır (Elker, 2002:150-152).

Yolculuk modelleri; seyahat talep değişikliklerinin farklı varsayımlarla cevaplandığı, sistematik yapıyı temsil eden analizlerdir. Yolculuk talep tahmin modelleri farklı biçimler alabilirler. Bazı trafik modelleri, insanların nerede ve ne zaman, hangi aktivitelerde olduğunu, bu aktiviteleri nasıl yaptıkları gibi birbirlerini kapsamlı bir şekilde temsil eden zonsal yolculuk davranış özelliklerini araştırmaktadır. Bazı modeller ise daha küçük bir ulaşım pazarına hitap eden havaalanı seyahatleri gibi bir koridor içinde ya da kentin belirli zonlarına yapılan seyahatlerle ilgilendiği için daha dar kapsamdadır.

Geleneksel ulaşım planlaması yönteminin kilit noktasında gelecekteki ulaşım talebini kestirmeye yarayan modeller bulunmaktadır. Bu modeller kentteki sosyal, demografik ve ekonomik değişkenlerle ulaşım talebi arasındaki ilişkiyi açıklamakta kullanılmaktadır. Öncelikle, anketler ve sayımlar vasıtasıyla, bugün yapılmakta olan yolculukların miktarı, başlangıç ve bitiş yerleri, amacı, türü ve zamanı gibi özellikleri belirlenmektedir.

Yolculuk talep tahmin modelleri olarak “Yolculuk Tabanlı Modelleme” ve “Aktivite Tabanlı Modelleme” yöntemleri incelenmiştir.

Yolculuk tabanlı talep tahmin modelleri aynı zamanda dört aşamalı talep tahmin modelleri olarak da anılmaktadır. 4 aşamalı talep tahmin modelleri 1979 yılında Mannheim tarafından başlatılmış, 1988 yılında ise Florian tarafından geliştirilmiştir. Mannheim (1979), ulaştırma sistemini, “insan ve eşyaların belirli ve iyi tanımlanmış bir şekilde ulaşımı ile ilgili tüm fiziksel, sosyal, ekonomik ve kurumsal bileşenlerin bir araya getirilmesi ile oluşan bir küme olarak tanımlamaktadır. Bu sistem; yol şebekesi, taşıt filosu, işletme ve terminaller gibi alt sistemlerden oluşmaktadır (Mannheim 1979).

Mannheim/Florian ulaşım sistemi analizi diyagramı olarak literatüre geçmiş olan akış şeması Şekil 2.1’de görülmektedir. “Ulaşım Sistemi” ulaşım altyapısı ve servislerinin tüm bileşenlerini, “Aktivite” ise mekânsal arazi kullanımı ve bu arazi kullanımında yer alan sosyo-ekonomik aktiviteleri ifade etmektedir. “Talep” ve “Performans” dört aşamalı talep tahmin modelinin temelini oluşturmaktadır.

“Mekân” türlerinin çeşitliliği gerekli olmakla birlikte genellikle modelde bağımsız olarak hesaplanmaktadır. Nadiren de “Denge” prosedürü içinde

herhangi bir şekilde entegre edilmiş halde bulunmaktadır. Benzer bir şekilde “Arz” prosedürü de fiilen gerçekleşmemektedir. Arz prosedürü, modele entegre olarak bulunmaktadır.

“Talep” prosedürü, genellikle bir noktadan bir noktaya belirli bir amaç için gerçekleştirilen yolculukları tanımlamaktadır. Bu yolculuklar zaman ve mekan birimlerini yansıtmaktadır.

“Performans” prosedürü, genellikle linkler üzerindeki hacimler (toplu taşıma yada karayolu olabilir) olarak tanımlanan spesifik araç yolcu değerlerini yansıtmaktadır.

2. Kavramlar ve Tasarım

Aktivite tabanlı modeller, insanların faaliyetlere nereden, nasıl katılacakları hakkında verdikleri kararlar dahil olmak üzere, bu aktivitelere ait mevcut kısıtlamalara nasıl karar verdiklerini baz alan davranış teorilerine dayanmaktadır.

Aktivite tabanlı modellerde yolculuk üretimi aktivite hareketlerinden elde edilir ve aktivitelerin organizasyonları ile ilişkilidir. Bu modeldeki yolculuk kalıpları birbiri ile ilişkili olan ve “TUR” olarak adlandırılan seyahatler ile organize edilir. Bu sebeple aktivite tabanlı modelin diğer bir ifade yöntemi de “Tur Tabanlı Seyahat Modeli”dir. Bu modelde, anket ve diğer yöntemlerle elde edilen hanehalkı verilerinin sosyo-ekonomik karakteristikleri ile hanehalkı bireylerinin ilişkiler ve ortaya çıkan yolculuk eğilimlerini tahmin etmek için kullanılmakta ve model için büyük önem teşkil etmektedir.

Aktivite tabanlı modeller yolculuk tabanlı modellerde test edilmesi güç olan yatırım ve politika senaryolarını test etmekte kullanılır. Buna ilaveten aktivite tabanlı modeller, yolculuk tabanlı modellerde yapılabilen tüm zonsal planlama, yolculuk tahminleri (toplu taşıma, otomobil gibi) ve talep yönetimi yapabilme yeteneklerine de sahiptirler.

Aktivite tabanlı modeller davranış teorisine dayanmaktadır. Burada insanların farklı durumlar altında nasıl karar verdiği, nereye seçeceği, ne zaman seçeceği yani bu aktiviteyi nasıl, nerede, hangi zamanda yapacağı gibi kararlar modellenmektedir. Aktivite tabanlı modeller her kişinin aktivitelerini, aktivitenin zamanlamasını ve tüm gün için yolculuk seçimini aktivitenin tipi ve kişinin ihtiyaçları doğrultusunda değerlendirmektedir. Aktivitelerin türleri göz önünde bulundurularak, birbirinden farklı aktiviteler için ihtiyaç ve öncelikler belirlenmektedir. Bireyin programı doldukça, mevcut aktiviteleri azalır.

Yolculuk tabanlı modellerin aksine aktivite tabanlı modeller belirli başlangıç ve bitiş noktalarına sahip “TUR”ların kendi içlerinde ayrı seyahat serilerini incelemektedir. Her yolculuğun bağımsız temsil edilmesinin yerine her yolcu için günlük seyahat zincir kalıpları modellenir.

Bağımsız yolcular seviyesinde çalışan aktivite tabanlı modeller, toplu yolculuk tabanlı modellere kıyasla büyük varyasyonları kapsamaktadır. Yeni açıklayıcı değişkenlerin ve yeni duyarlılıkların çok kolayca dahil edilebilmesi aktivite tabanlı modellerin en önemli avantajıdır. Çünkü birey ve hane seçimleri değerlendirilip tipik bir mikro simülasyon çerçevesinde uygulanır. Örneğin, sıkışıklık ücretlendirmesi uygulanacak bir zonda kullanıcılar içeri girdikten sonra diğer aktiviteleri için de ödeme yapacaklarını varsayan yolculuk bazlı modellere göre tur bazlı aktivite tabanlı modellerde tek bir ücret alındığı kabul edilir. Bu nedenle, bu tip uygulamalarda daha gerçekçi sonuçlar elde edilmektedir. Aktivite tabanlı modelde bu tür politikaları temsil edebilmek için değişiklikler yapılabilir fakat yolculuk tabanlı modelde bu imkânsızdır.

Yolculukların yerine turların tahmin edilmesinin faydalarından biri hanehalkının koordineli kararlarının daha fazla etkileyici mekânsal faktörler yardımı ile daha kapsamlı bir şekilde modellenebilmesidir. Bir örnek olarak; yukarıdaki şemada ev-kütüphane arası bir seyahat olarak alınabileceği gibi farklı araç sahipliğine, mekânın yer seçimine veya sosyo-ekonomik karakteristiğe sahip başka bir hanehalkı için yeşil okların tamamını kapsayan bir turun içinde durak veya ev-iş turu içinde bir durak olarak alınabilme ihtimali vardır.

Aktivite tabanlı modelle ilgili 5 önemli nokta bulunmaktadır:

1. Yolculuk, aktivitelere katılma sonucu üretilen bir taleptir.
2. Aktivite tabanlı yaklaşım, aktivite kalıp dizilerine odaklanmaktadır.
3. Aktivitelerin tamamı hanehalkı ve sosyal karakteristikler bazında planlanır ve uygulanır.
4. Aktiviteler yolculuk tabanlı modeldeki zirve-zirve dışı saat mantığının aksine 24 saat diliminde ve sürekli devam eden bir şekilde değerlendirilir.
5. Yolculuk ve yer seçimi, zaman-mekan ve kişisel kısıtlamalara bağlı olarak sınırlandırılır.

Yukarıdaki maddeler dikkate alındığında, aktivite tabanlı modelin ulaşım talep tahmin modellemesine günlük davranış kalıplarını doğru analiz etme noktasında zengin ve doğru bir çerçeve oluşturduğu söylenebilir.

Aktivite tabanlı modeller insanların hangi aktiviteleri izlediği, nerede, ne zaman, ne kadar süre için, kiminle, hangi ulaşım türünü kullanarak yaptığı gibi soruları tanımlarken aynı zamanda bu aktivitelerin nasıl planlandığı, potansiyel gidilecek yer ve faaliyetleri, mevcut karayolu ağı, kurumsal bağlamda yönleri, kişisel ve hanehalkı özelliklerini kullanarak gerçekleştirir.

Aktivite tabanlı modellerde en önemli 4 değişken aktivitelerin çeşitliliği, lokasyon verisi, zaman ve aktivitenin kiminle yapıldığıdır. Aktivite tabanlı modellerde en önemli değişken “aktivitelerin çeşitliliği”dir. Aktiviteler

modelde istenilen düzeyde detaylandırılarak toplanmalıdır. Temel olarak; iş, okul, alışveriş vb. gruplandırılabilir.

İkinci en önemli veri ise “lokasyon” verisidir. Trafik akışını da dikkate alarak coğrafi bilgi sistemi ile ilişkilendirilmiş arazi kullanım verisi ve çeşitli faaliyetlerin lokasyonu nerede hangi aktivitelerin hangi yoğunlukta olduğu bilgisini içermektedir. Aktivite tabanlı model muhtemel yerler dışındaki özel lokasyonları ve olası yerlerin çekiciliğinin ne kadar olacağını tahmin eder. Aktivite tabanlı model birçok farklı aktiviteyi barındırdığından lokasyonların çekiciliğinin tanımlanmasında birçok etken barındırmaktadır. Örneğin; bir alışveriş merkezinin giriş katının özellikleri, fiyatı, otopark kapasitesi, atmosferi, mağaza çeşitliliği ve sunduğu servis imkânlarının lokasyon çekiciliği üzerinde etkisi vardır.

Aktivite tabanlı model için üçüncü önemli veri kaynağı ise “zaman”dır. Yolculuk kararlarının verilmesinde yolculuğun başlama ve bitiş zamanları, aktivite duraklarının tahmininde girdi olarak kullanılır. Örneğin; alışveriş merkezinin kapanma ve açılma saatleri aktivitenin çekiciliği ve tur zaman dilimi içerisinde yapılma olasılığının olup olmaması konusunda önem arz etmektedir.

“Kiminle” verisi hiçbir modelde tam olarak kullanılmamaktadır. Eğer bu veri modele eklenmek isteniyorsa hanehalkı üyelerinin hangi aktivitelere kim ile katıldığı verisinin incelenmesi gerekir.

Yukarıda bahsedilen bu verilerin hepsi aktivite tabanlı model için temel verilerdir. Özel modelleme yaklaşımlarına ya da daha özel simülasyonlara göre veri çeşitleri eklenebilir. Yalnız tüm modellerde aktivite-lokasyon-ulaşım türü ve zamanının olması gerekmektedir.

Model kalibrasyonu, gözlemlenen gerçek veriler ile model tarafından tahmin edilen yolculuk talepleri ve tür seçimlerinin karşılaştırılmasından oluşmaktadır. Kalibrasyonda kullanılan veriler zona ait özellikler ve modelin hedeflerine göre şekillendirilir. Örneğin; model ile bisiklet kullanım oranındaki değişimi görmek istiyorsak bu konudaki tahminlerin ne kadar sağlıklı gerçekleştiği ön plana çıkmaktayken sıkışıklık ücretlendirmesi uygulaması düşünülüyorsa bu zonda tahmin edilen talepleri ve tür seçiminin doğruluğu kalibrasyon sürecinde ön plana çıkacaktır.

Bireysel talep tahmin modellerinin kalibrasyonunda birinci derecede hanehalkı anket verisi kullanılır. Aktivite tabanlı modellerde gidilecek olan mekânın seçimi, türün seçimi ve günün hangi zamanında bu yolculuğun gerçekleşeceğinin seçimi modellenir. Kalibrasyon aşamasında da bu seçimlerin gerçekleşen seçimler ile olan uyumluluğu gözlemlenir.

Hanehalkı verisine ilaveten günün farklı zamanları ve araç tiplerine göre karayolundaki araç sayısı ve hızlarına ilişkin veriler de model kalibrasyonunda gerek duyulan veriler arasındadır.

Toplu ulaşım verisi olarak da araç içi anketler, transfer sayısı, istasyon ve durak bazlı bindi sayıları gibi veriler model kalibrasyonunda kullanılmaktadır.

Aktivite tabanlı model kullanıcıları ihtiyaç duyulan verilerin çeşitliliği ve detayı konusunda pek çok problem ile karşı karşıya kalmaktadır. En önemli zorluk alansal verilerde doğru büyüklüğünün ne olacağına ve hangi detayda ulaşım ağı verisi ortaya konacağına karar verilmesidir. Yolculuk verisi bireysel davranışlara dayanmaktadır. Parsel verisine incek kadar veri hassasiyeti sağlandığı takdirde modeli o ölçekte kurmak mümkündür. Ancak zorluklar baz yıl için ortaya konan arazi kullanım verilerinin gelecek hedef yıllar yada alternatif senaryolar için tahmini söz konusu olduğunda ortaya çıkmaktadır.

Aktivite tabanlı modeli geliştirmek ve uygulamak için gerekli veriler, yolculuk tabanlı bir modeli geliştirmek için gerekli verilerden önemli ölçüde farklı değildir. Hem aktivite tabanlı hem de yolculuk tabanlı modelleri geliştirmek ve uygulamak için birincil veriler, hanehalkına ait yolculuk bilgileri, istihdam ve hane dağılımı hakkında ekonomik ve demografik bilgiler ve ulaşım bilgilerini içermektedir.

Hanehalkı seyahat anketleri, bireysel ve hanehalkının nerede nasıl ve ne zaman bulundukları hakkında detaylı bilgi verir. Eğer çok daha detaylı bilgiler mevcut olursa, örneğin ayrıntılı sektör istihdamı ya da hanehalkının kategorileri gibi, bu bilgi aktivite tabanlı modelde çok daha kolay kullanılabilir.

Aktivite tabanlı modeller için bir zonun yolcularını ve onların detaylı özelliklerini temsil eden “yapay nüfus”un geliştirilmesi gerekmektedir. Ulaşım ağı veri gereksinimleri aktivite tabanlı ve yolculuk tabanlı modeller için çok benzerdirler.

Bununla birlikte aktivite tabanlı modeller günün her saatine ayrı ve çok detaylı beyanlar içerdiğinden, genellikle daha fazla zaman periyodunda özel bilgi ağıları gerektirir.

Geleneksel yolculuk tabanlı modellerde yolculuk üretimi için farklı modeller kullanılsa da en yaygın olanı trafik analiz zonlarının nüfus değerleri ile üretim yapan modellerdir. Genellikle çoğu model bunun da ötesine giderek araç sahipliği oranı, gelir seviyeleri ve trafik analiz zonu ulaşılabilirliği gibi parametreleri kullanmaktadır.

Aktivite tabanlı model tahminlerinde “Günlük Aktivite Davranışları” yaklaşımı bulunmaktadır. Örnek olarak; hastalığı sebebiyle o gün evde kalan bir çocuk, çalışanlardan birinin o gün evde kalmasına sebep olabilir. Aktivite tabanlı modeller bireysel ve hane içi çıktıların gerçekçilik oranlarını maksimize etmeyi amaçlamaktadır.

Günlük aktivite davranışlarının sınıflandırılması farklı yollarla yapıla-

bilmektedir. Bu tanım normalde bir kişinin gün içinde bir hiyerarşiye bağlı olarak gerçekleştirdiği aktivitelerin listelerini içermektedir. Ayrıca aktivite takvimlendirme ve yolculuk ilişkili karakteristikleri de içerebilir.

Aktivite tabanlı modeller yolculuk modellerinden sonra yaygınlaşmış; ancak aktivite tabanlı modellerin eksikliklerini giderecek araçlar ile hızla yayılmıştır.

Aktivite tabanlı modeller, alternatif yatırımları ve politikaları değerlendiren. Bunları yolculuk tabanlı ve kroki tabanlı modelleri kullanarak test etmek çok zordur. Aktivite tabanlı modeller genellikle sıkışıklık ücretlendirme senaryolarını değerlendirmek için çok daha sağlıklı yetkinliklere ve duyarlılıklara sahiptirler. Aktivite tabanlı modeller bireysel davranışların bir fonksiyonu olduğu ve bu kişilerin tüm gün için yolculuk talepleri karşısında nasıl davrandığını bir tur mantığı dahilinde ele aldığı için yolculuk bazlı modellerden daha duyarlıdır. Yolculuk tabanlı modellerde karmaşık ödeme seçenekleri (zirve saatte farklı fiyat uygulanması, sadece belirli zamanlarda fiyat uygulanması gibi) karşısında yolculuk davranışlarındaki farklılıklar gözlemlenemezken “Ne Zaman?” sorusunun yanıtını arayan aktivite tabanlı modeller için bu mümkündür. Bunlara ilaveten aktivite tabanlı modeller yolculuk tabanlı modellerin içerdiği zonsal planlama desteğini, toplu taşıma ve karayolu ulaşım talep yönetim tahminlerini sağlamaktadırlar.

Yolculuk tabanlı modeller konumların, yolculuk türleri ve zamanlamalarının birbiriyle ilişkili olduğunu kabul etmezler. Buna ek olarak; bireysel seyahat ve diğer hane üyelerinin koordinasyonu hakkında ayrıntılı bilgi eksiklikleri vardır.

Kişi ve ailelerin farklı gelirleri, ulaşım erişebilirliği, hanehalkı üyeleri arasında araçlar için çekişmeler, günün ayrıntılı yolculuk süreleri ve diğer tüm etkenler yolculuk kararlarını vermede muazzam çeşitlilikler yaratır. Yolculuk tabanlı modeller bu konularda yanıt verme yeteneklerine sahip değildir.

Yolculuk tabanlı modellerin zayıf yanları aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Yolculukların, aktivite katılım kararları sonucu oluşan talepler olduğunu önemsemez.
- Yolculuğa odaklanırken yolculuklar ve aktiviteler arasındaki zaman ve mekân ilişkilerini göz ardı eder.
- Genel davranışları seçimleri etkileyen kompleks kısıtlar yerine sade seçim süreçleri ile sunar.
- Yolculuk ile aktivite katılımları arasındaki karşılıklı ilişkileri belirtmede yetersizdir.
- Bireysel seçim setlerinin eksik belirlenmesinden dolayı karar vericiler için belirgin seçim alternatiflerinin oluşturulamamasına sebep olur.

- Modelin genel yapısı faydanın maksimize edilmesi üzerine kurulu olduğu için hanehalkını kapsayan alternatif karar stratejileri, bilgi seviyesi, karar kompleksitesi gibi bazı önemli bulguları göz ardı eder.

Aktivite tabanlı modeller, önemli ölçüde detaylı giriş bilgilerini birleştirir ve yolculuk tabanlı modellerden daha detaylı çıktılar üretir. Bunun yanı sıra etkinlik katılımlarında harcanan zaman, varış ve kalkış saatleri gibi zaman seçimlerinin açık ve detaylı bir şekilde gösterildiği modellerdir.

Aktivite tabanlı modellerin teorik olarak sunduğu faydalar aşağıda açıklanmaktadır.

Detay Seviyesi: Klasik 4 aşamalı ulaşım modelleri tahminlerini sosyo-ekonomik bazlı verilerin toplandığı trafik analiz zonları aracılığı ile yaparken; aktivite tabanlı modeller farklı istatistik stratejileri ile mevcut zonsal veriler ile daha detaylı nüfus dağılımı inşa edebilmektedir.

Hassasiyet: Esas olarak aktivite tabanlı bir modelin sonucunu alt ölçeklerde de değerlendirmek mümkündür. Bu seviye, hanehalkı ölçeğine kadar inebilir ancak bunun için giriş verilerinin hassasiyet ve doğruluk oranı çok önemlidir. Ayrıca çeşitli politikaların hane halklarına etkileri, toplam sonuçtan bilgileri elde etmek yerine belli aşamalarda bu sayede incelenebilmektedir.

Tutarlılık: Genel yapısı itibari ile aktive tabanlı modeller yüksek tutarlılık seviyesi yakalama imkânı sunmaktadır. Ayrıca bu model birincil (ev-iş) hedefler ile ikincil (alışveriş-spor) hedeflerin ilişkilerinin yönetimi ile ilgili doğrudan modelleme imkânı sunmaktadır. Zirve saati yayılması ve yolculuk iptali (Sıkışıklık ve başka faktörlere bağlı olarak seyahatten vazgeçilmesi durumu) gibi zaman ve sıkışıklık temelli olağanüstü durumların modellenmesi için seyahatlerin başlangıç saati-sıralama ilişkileri ve seyahat dahilindeki tür seçimi tutarlılığı kolayca elde edilebilmektedir.

Davranışsal Gerçekçilik: Aktivite tabanlı modellerin seyahat davranışlarını modelleme noktasında yolculuk tabanlı modellere göre daha gerçekçi sonuçlar elde ettiği söylenebilir. Pratik olarak, aktivite tabanlı modeller daha hassas girdi ve veriler arası daha kesin istatistiksel ilişkilerden faydalanır. Bu sebeple modelin çıktısı gerçek hayatta yaşananlara daha yakın sonuçlar verebilmektedir. Teorik olarak aktivite tabanlı modeller “davranış modellemesi” olarak da ifade edilmektedir.

Analiz Esnekliği: Aktivite tabanlı modeller, daha tutarlı ve detaylı sonuçlar üretmesi sebebiyle Ulaşım Talep Yönetimi stratejilerinin ve yeni ulaşım politikalarının test edilebilmesi açısından büyük olanaklar sunmaktadır. Böylelikle model, trafik hacim üreticisi yerine kapsamlı politika analiz aracı haline dönüşmektedir. Ayrıca hanehalkı temelli model yapısı, arazi kullanımı tahmin modelleri ile ilişki içinde olup bu modellerin etkili olarak çalışabilmesine olanak sağlamaktadır.

3. Materyal Yöntem

Ulaşım talebindeki artışın her geçen gün daha da büyümesi ile birlikte, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerdeki orta ve büyük ölçekli şehirlerde trafik sıkışıklığı artmaya devam etmektedir. Kentsel ulaşım sorununa yaklaşım, ilk ortaya çıktığı günden bugüne kadar çeşitli evrelerden geçmiştir. Bunun bir sonucu olarak da, dünya genelinde birçok şehirde konfor ve erişebilirlik beklentilerinin yükselmesi, özel araç kullanımını arttırmış ve toplu taşıma kullanımının azalmasına neden olmuştur. Taşıt arzının artması ve buna karşılık yolların yetersiz kalması nedeniyle trafik sıkışıklığı ortaya çıkmıştır. Bu sıkışıklığa çözüm bulmak amacıyla yolculuk talep tahmin modelleri ile alternatif senaryolar üretilmektedir. Söz konusu senaryolarda arazi kullanım konfigürasyonları ve ulaşım altyapıları kullanılarak, kullanıcı, yolculuk ve zon karakteristiklerine göre geleceğe yönelik tahminler gerçekleştirilmektedir. Karar verme sürecini iyileştirmek için ulaşım ile ilgilenen kuruluşlar sürekli yeni model altyapıları geliştirmektedir.

Bu çalışmada, İstanbul İli için kurulan talep tahmin modelleri yolculuk amaçlarına göre incelenmiştir. İstanbul için uygulanan talep tahmin modeli ve trafik analiz zonlarının yapısı incelenmiş, trafik analiz zonlarının seçim kriterlerine değinilerek bu zonların küçültülerek yolculuk başlangıç ve bitiş noktaları için hassasiyetin arttırılmasının model tahmin kabiliyeti üzerindeki etkileri incelenmiştir.

İstanbul İli için uygulanan 540 trafik analiz zonu daha küçük alanlara bölünerek model tutarlılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. İdari sınırlar dikkate alınarak en küçük idari sınır olan mahalle alanları içerisinde benzer arazi kullanım niteliği gösteren alanlar birbirinden ayrılarak 1788 trafik analiz zonu için talep tahmin modeli altyapısı yeniden oluşturulmuştur. Bu altyapının en önemli üç bileşeni; B-S matrisi, karayolu ve toplu taşıma ağları ve trafik analiz zonları nitelik bilgileri 1788 trafik analiz zonu için revize edilmiştir.

İstanbul için daha küçük zon yapılanması kurulurken yapılan düzenlemelere değinilmiştir ve bu iyileştirmelerin şebeke ataması algoritmaları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bir örnek olarak Kadıköy Kartal Metro Hattı için genel işletme bilgileri verilerek hat boyunca farklı büyüklüklerdeki trafik analiz zonları için talep tahmin modelinin çıktılarının gerçekleşen gerçek değerlere göre tutarlılığı incelenmiş, ortaya çıkan faydalar analiz edilmiştir.

Kadıköy-Kartal Metro Hattı için 540 ve 1788 trafik analiz zonu için yapılan toplu taşıma şebeke atamaları karşılaştırıldığında, her iki modelin de gerçeği temsiliyetinin oldukça iyi olduğu görülmekte birlikte daha küçük zonlar oluşturulması ile model hassasiyetinde önemli ölçüde iyileştirmeler olduğu görülmektedir. Hataların ortalama karekökü (RMSE) yöntemi ile istasyon bazlı bindiler değerlendirilerek karşılaştırma yapılmıştır. 1788 zon için hata oranının %23 oranında azaldığı görülmüştür.

Çalışma alanı için uygun zon yarıçapının belirlenmesi için ise nüfus yoğunluğu ve istihdam yoğunluğu bağımsız değişkenler olarak değerlendirilmiş ve üstselsel model uygulanmıştır.

Zon yarıçap uzunluğunu hesaplarken kullanılabilecek en uygun modelin seçiminde çalışma alanının karakteristik özelliklerine dikkat edilmelidir. 1 km² alan içindeki nüfus yoğunluğu ve istihdam yoğunluğu kullanılarak hesaplanan zon yarıçapları ile modelde kullanılan ortalama yarıçap uzunluklarının birbirine yakınlaştırılması ile R² değerinde %26'lık artış sağlamanın mümkün olduğu gözlemlenmiştir.

4. Sonuçlar

Bir kentte yaşayan insanlar, bütün gün boyunca genel ve özel ihtiyaçları için hareket halindedirler. Çalışmak, alışveriş yapmak, eğlenmek, dinlenmek gibi sosyal ve ekonomik nedenlerle bazı mesafelere gitme zorunluluğu vardır ve bu da hareketliliği doğurur. Teknolojideki ilerleme insanların hareketliliğini de artırmaktadır. Böylece artan ulaşım isteği sonucu oluşan hareketliliğin planlanması gereği ortaya çıkmaktadır. Kentsel gelişme, büyüme ve kent içindeki toplu taşıma sistemlerindeki yenilikler sonucu mevcut toplu taşıma sistemleri ile yeni toplu taşıma sistemleri arasında geçişler olmuştur. Bu yeni ulaşım türlerine geçişler, kentlerdeki yenilenmeden daha hızlı olduğu için kentlerin büyük çoğunluğunda mevcut yapılaşmalar, yeni ulaşım türlerine cevap veremeyecek kapasitesi ile çözümü zor sorunlar doğurmuştur. Bu yüzden insanlar yollardaki artan trafik sıkışıklığı yanında, yeni yol inşası ve bunun da ortaya çıkardığı çevresel tehditlerle uğraşmaktadır. Bu sorunlar zamanla doğru orantılı olarak büyümektedir. Ulaşım taleplerinin belirlenmesinin en önemli amaçlarından birisi, kentsel ve kırsal yaşamdaki hız ve konforla, doğal çevreyi bozmadan hareketliliğin sağlanmasıdır.

Toplu taşıma sistemleri, arzu edilen servis kalitesini sağlayabilmek için arz ve talep arasındaki dengeyi sağlamalıdır. Bu nedenle, bir toplu taşıma sistemi tasarlanırken diğer tüm sistemlere olan talep belirlenmeli ve bu talepler tasarımıda hesaba katılmalıdır.

Ulaşımında ortaya çıkan sorunların çözümü için yüksek maliyetli ve uzun dönemli yatırımların geliştirilmesi alınan kararların önemini arttırmış ve talep tahmin modellerinin gelişmesini tetiklemiştir. 1970'li yılların sonlarından beri gündemde olan yolculuk tabanlı modellemeler günümüzde yerini aktivite tabanlı modellere bırakmıştır. Aktivite tabanlı modellere "Tur Tabanlı Modeller" olarak da adlandırılır. Bu tip modellerle yolculuk tabanlı modellerde test edilmesi güç olan yatırımları da test etmek mümkün olmuştur.

Aktivite bazlı modeller aktivitelerin mekandaki çeşitliliği, lokasyonları, zaman ve aktivitenin kiminle yaptığı gibi sorulara yanıt arar. Veri altyapısı yolculuk tabanlı modellere göre çok daha spesifiklerdir. Özellikle aktivitelerin

mekanda dağılımı hakkında tam bir veritabanının olduğu varsayımına dayanır. Bu nedenle günümüzde CBS altyapısındaki gelişmeler ile doğrudan ilişkili olarak yaygınlığı da artmaktadır. Özellikle günümüzde popüler olan talep tahmin politikaları ile geliştirilen alternatif yöntemlerin test edilmesinde aktivite tabanlı modeller yolculuk tabanlı modellere göre daha hassas analizler yapmamıza olanak sağlamaktadır.

İstanbul için yapılan kapsamlı ilk talep tahmin modeli 1997 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi tarafından yapılmıştır. Çalışma alanı o dönemin İstanbul Büyükşehir Belediye sınırlarını (155bin ha) kapsamaktadır. Kullanılan trafik analiz zonlar sayısı ise 209 olarak alınmış ve yaklaşık 12 bin hane ile hanehalkı anketi gerçekleştirilmiştir. Yapılan literatür çalışmaları incelendiğinde daha çok zonsal etüt niteliğinde yapıldığı görülmüştür.

2006 yılına gelindiğinde ise İstanbul Büyükşehir Belediyesi sınırlarını tüm İstanbul'u kapsamıyla daha kapsamlı bir çalışma yapma ihtiyacı duyulmuş ve tüm il sınırlarını kapsayacak (540bin ha) 90 bin hanede hanehalkı anketi gerçekleştirilmiştir. Trafik analiz zonu sayısı ise 451 olarak belirlenmiştir. 2012 yılında da 2006 yılında toplanan verilerin güncellenmesi ve model tutarlılığının yeniden gözden geçirilmesi için 16 bin hanede hanehalkı çalışması gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada trafik analiz zonu sayısı 540'a (65 tanesi özel zon olmak üzere) çıkarılmıştır. 451 trafik analiz zonunun 540'a çıkarılmasında değişen idari sınırların (ilçe ve mahalle sınırları) yanı sıra büyük trafik üreten ve çeken özel alanların bir zon olarak alınması da etkili olmuştur. Daha önceki çalışmalardan elde edilen tecrübeler ışığında bu çalışma kapsamında İstanbul için uygulanan 540 trafik analiz zonu idari sınırlardan bağımsız olarak arazi kullanım yapısı, topografik koşullar ve erişilebilirlik gibi nitelikler göz önünde bulundurularak daha küçük zonlara ayrılmış ve model tutarlılığı ve uygulanabilirliği üzerindeki etkileri incelenmiştir.

İstanbul için bugüne kadar kurulan modellerin hepsi yolculuk tabanlı modellerdir. Henüz İstanbul için geliştirilen aktivite tabanlı bir model bulunmamaktadır. Ancak CBS verilerinin geliştirilmesinde yaşanan ilerlemeler aktivite bazlı modellerin İstanbul için de kurulmasına olanak sağlayacaktır. Uluslararası alanda yapılan çalışmalar aktivite bazlı modellerin; detay seviyesi, hassasiyet, tutarlılık, davranışsal gerçekçilik, analiz esnekliği gibi alanlarda pek çok avantaj sağladığını göstermektedir. Şu aşamada aktivite tabanlı model yapmak mümkün görünmese de trafik analiz zonlarının büyüklüklerini komşuluk birimi olarak da kabul edilen, mümkün olduğunca yerleşik alanlarda 500 m. yarıçapı geçmeyecek alanlara ayrılarak model hassasiyetini arttırmanın faydalı olup olmayacağı araştırılmıştır.

Bu çalışmada 540 trafik analiz zonu daha küçük alanlara bölünerek model tutarlılığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. İdari sınırlar dikkate alınarak

en küçük idari sınır olan mahalle alanları içerisinde benzer arazi kullanım niteliği gösteren alanlar birbirinden ayrılarak 1788 trafik analiz zonu için talep tahmin modeli altyapısı yeniden oluşturulmuştur. Bu altyapının en önemli üç bileşeni; O-D matrisi, karayolu ve toplu taşıma ağları ve trafik analiz zonları nitelik bilgileri 1788 trafik analiz zonu için revize edilmiştir.

İstanbul için daha küçük zon yapılanması kurulurken yapılan düzenlemelere değinilmiştir ve bu iyileştirmelerin şebeke ataması algoritmaları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bir örnek olarak Kadıköy Kartal Metro Hattı için genel işletme bilgileri verilerek hat boyunca farklı büyüklüklerdeki trafik analiz zonları için talep tahmin modelinin çıktılarının tutarlılığı incelenmiş ortaya çıkan faydalar analiz edilmiştir.

Genel olarak bakıldığında her iki modelin de gerçeği temsiliyetinin oldukça iyi olduğu görülmekte birlikte daha küçük zonlar oluşturulması ile model hassasiyetinde önemli ölçüde iyileştirmeler olduğu görülmektedir. Burada 5dk yürüme mesafesinde kişilerin günlük temel ihtiyaçlarını karşılayabileceği komşuluk birimi dikkate alınarak zonların oluşturulmaya çalışılmıştır. Yürüyüş hızını 4km/saat olarak kabul edersek bu 350m gibi bir yarıçap uzunluğuna denk gelmektedir. Özellikle yerleşik alanda 350m yarıçapının korunmasına dikkat edilmiştir.

CBS verilerinin toplanmasının yaygınlaşması ve altyapının devamlı güncellenmesi ile yapı adası bazında aktivitelere ilişkin verilerin toplanabilir hale gelmesi ve buna bağlı olarak trafik analiz zonlarını parsel bazına kadar indirmek mümkün olabilecektir. Bu çalışma kapsamında komşuluk birimi ölçeğine inilmiş ve yolculuk tabanlı modellerde iyileştirme sağlandığı gözlenmiştir.

KAYNAKLAR

- “Dynamic activity-travel diary data collection using a GPS-enabled personal digital assistant “B. Kochan¹, T. Bellemans¹, D. Janssens¹ and G. Wets^{1*} ¹ Transportation Research Institute (IMOB), Faculty of Applied Economics, Hasselt University
- Acar, Ğ. H., 1994, Kent içi trafik sorunlarının hafifletilmesinde güncel yöntemler ve talep yönetimi, 4. Toplu Tağım Kongresi, Ankara Büyükşehir Belediyesi EGO Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Activity-Based Travel Demand Models. Transportation Research Board of National Academies
- Chandra R. (2002) Bhat, Sivaramakrishnan Srinivasan, Jessica Y. Guo“Activity-Based Travel Demand Modelling for Metropolitan Areas in Texas: Data Sources, Sample Formation and Estimation Results”, 2002
- Elker C., (2002) Ulaşımında Politika ve Pratik, Gölge Yayınları, Ankara, 2002.
- Cüneyt ElkerĖu (2003)Otomobilleri Ne Yapmalı?, II. Ulusal Kentsel Altyapı Sempozyumu, Ankara, 2003.
- Elker, C., 1999, Çağdaş Ulaşım Politikaları, II. Ulaşım ve Trafik Kongresi Bildiriler Kitabı, TMMOB Makine Mühendisleri Odası Yayını, Ankara.
- Fusun ÜÇER, Turgut ÖZDEMİR, Halim CEYLAN, AyĖe TURABĖ, Ulaşım Ağlarında Seyehat Üretimi İçin Model Yaklaşımı ve Seyehat Dağılımı, BAÜ FBE Dergisi, Cilt: 11, Sayı:3-16, 2009.
- http://web.mit.edu/11.951/oldstuff/albacete/Other_Documents/Europe%20Transport%20Conference/activitybased_modellin/comparing_a_conven1554.pdf
- <http://www.princeton.edu/~alaink/Orf467F12/LincolnTravelDemandModel.pdf>
- http://www.virginiadot.org/projects/resources/vtm/what_is_travel_demand_modeling.pdf
- Ėstanbul Metropolitan Alanı Entegre Kentsel Ulaşım Ana Planı Final Rapor, İstanbul Büyükşehir Belediyesi Ulaşım Daire Başkanlığı Ulaşım Planlama Müdürlüğü, İstanbul, 2011.
- KancabaĖ, E. S., 1998, Urban Transportation Planning Applications in Developed and Developing Countries, and Analysis of Transportation System in Ankara on the Basis of Rail Transit, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Mannheim, M. L., (1979), Fundamentals of Transportation System Analysis, Volume 1: Basic Concepts, The MIT Press, 2. ed., Cambridge, Massachusetts and London, England, ISBN 0-262- 13129-3.
- Maryland Department of Transportation, Final Report, „Feasibility and benefits of advanced four-step and activity-based travel demand models for Maryland“, 2011

Michael G. McNally, The Four Step Model, 2007

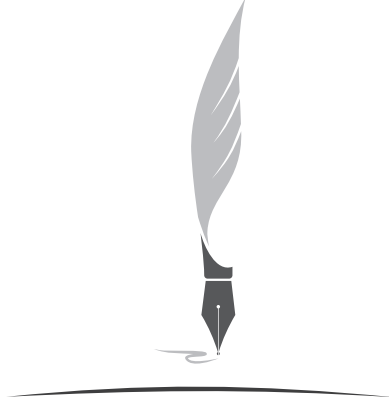
Ming Zhong, Rong Shan, Donglei Du & Chunyu Lu, „A comparative analysis of traditional four-step and activity-based travel demand modeling: a case study of Tampa, Florid“ ,2015

Ortuzar, J. ve Willumsen, L.G., Modelling transport, John Willey ve Sons, London, England,(1990).

Travel demand forecasting, Transportation Planning Handbook published by The Institute of Transportation Engineers,112-114, (1992).

Ulaşım Planlama Çalışmaları ve Ulaşım Ana Planı Hazırlama Kılavuzu, TBB Ulaşım Çalışma Komisyonu -Mayıs 2014.

VitoÇoğlu, Y., Bıçakçı, E. ve Güler, H., Türkiye“de şehirler arası otomobil yolculuklarının çoklu regresyon ve bulanık mantık yöntemleriyle modellenmesi, 7th International Congress on Advances in Civil Engineering, 385 October, (2006).



Bölüm 3

DİKDÖRTGEN KESİTLİ BETONARME KİRİŞİN ÜÇ NOKTALI EĞİLME DAVRANIŞININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Halit Erdem ÇOLAKOĞLU¹

Muhammed ÖZTEMEL²

1 Öğr. Gör. Dr, Giresun Üniversitesi, Keşap Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Giresun,
erdem.colakoglu@giresun.edu.tr, 0000-0002-4498-3569

2 Öğr. Gör, Giresun Üniversitesi, Keşap Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Giresun,
muhammed.oztemel@giresun.edu.tr, 0000-0002-6530-0739

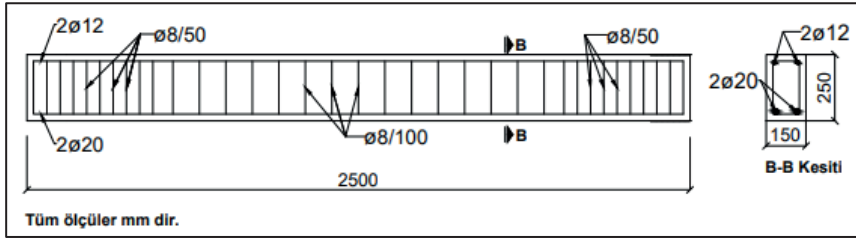
1. Giriş

Betonarme yapı sistemleri, dayanım, güvenilirlik, kolay ve daha az maliyetle imalat gibi faktörler nedeniyle dünya üzerinde en çok tercih edilen yapı sistemleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Bununla birlikte hesap sistemlerindeki karışıklıklar ile yük geçmişine ve zamana bağlı olarak davranışındaki değişimler göz önünde bulundurulduğunda dikkat edilmesi gereken heterojen bir yapıya sahip bir yapı sistemidir.

Betonarme yapı ve elemanlarının uygulanan yük etkileri altındaki doğrusal ve doğrusal olmayan davranışının en güvenilir şekilde belirlenmesi için laboratuvar ortamında deneysel çalışmaların yapılması ve sonuçların nümerik analiz yöntemleri kullanılarak doğrulanması gerekmektedir. Ancak çoğu zaman deneysel çalışmalarda kullanılan elemanın boyutlarının büyüklüğü, yükleme ve mesnetlenme koşulları gibi unsurların varlığı bu çalışmaların zorluğunu ve maliyeti arttırmakta, uzun zaman gerektirmektedir.

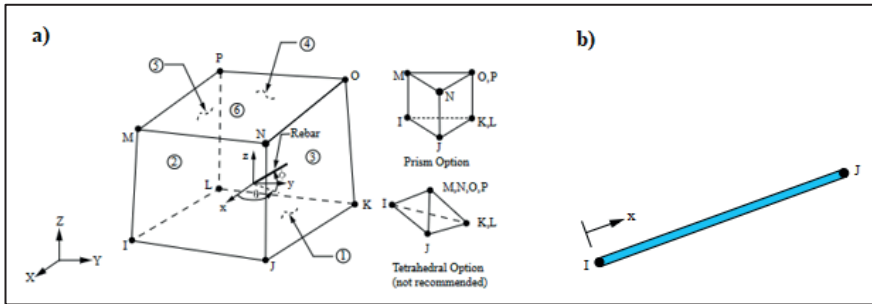
Sonlu eleman metodu, deneysel çalışmalara bir alternatif olarak ortaya çıkmış olmakla birlikte son zamanlarda hızla gelişen ve büyük kitlelerin kullanımına ulaşan nümerik bir yöntemdir (Moaveni, 1999). Bu yöntemde, deneysel çalışmalarda bahsedilen sınırlamalar olmadan istenilen boyut ve özelliklere sahip betonarme yapı ve elemanlarının istenilen yükleme ve mesnetlenme şartlarında çözümlemeleri yapılabilmektedir. Ancak sonlu eleman metodu kullanılarak yapılacak modellemenin güvenilir olmasının, kullanıcının bilgisayara gireceği verilerin doğruluğuna bağlı olduğu hiçbir zaman unutulmamalıdır.

Literatürde farklı paket programlar kullanılarak gerçekleştirilmiş sayısal çalışmaların sayısı oldukça fazladır (Barbosa ve Riberio, 1998; Fanning, 2001; Wolanski, 2004). Bu çalışmalar genellikle farklı malzemelerin, güçlendirme stratejilerinin ve dış güçlendirme tekniklerinin etkilerine odaklanmaktadır (Yeon vd., 2022). Çalışmalar genellikle çelik ve karbon fiberle ile şekil hafızalı alaşımlar gibi çeşitli takviye malzemeleriyle güçlendirilmiş kirişleri simüle ederek bunların bükülme davranışı ve genel yapısal performans üzerindeki etkilerini değerlendirir (Yeon vd., 2022).



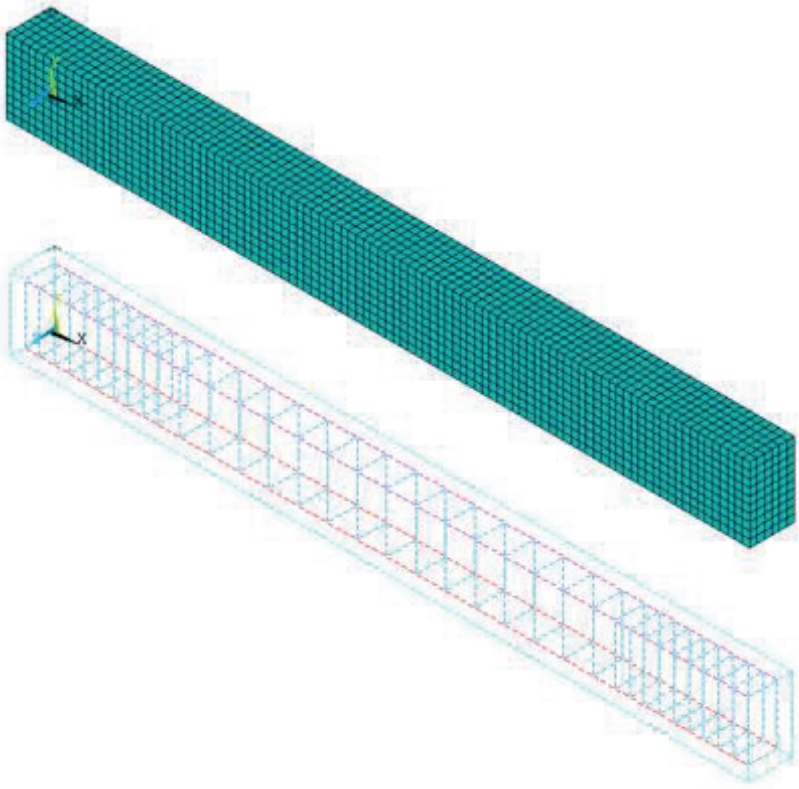
Şekil 2. Betonarme Kiriş Donatı Planı

Enkesit geometrisi dikdörtgen olan betonarme kirişin sonlu eleman modelinde beton kısmın modellenmesinde Solid65 eleman tipi seçilmiştir. Bu eleman tipi 8 düğüm noktalı olup, çekme halinde çatlayıp, basınç halinde ezilen ve plastik deformasyon ile sünme hallerini içeren katı bir elemandır. Düğüm noktalarında x, y ve z doğrultusunda 3 adet yerdeğiştirme serbestlik derecesine sahiptir (Şekil 3a). Betonarme kirişin sonlu eleman modelinde donatı kısmın modellenmesinde ise Link180 çubuk elemanı kullanılmıştır (Şekil 3b).



Şekil 3. Solid65 ve Link180 Eleman Tipleri

Betonarme kirişin sonlu eleman modeli Şekil 4'de gösterilmiştir. Modellemede çelik donatı ayrık modelleme tekniği kullanılarak beton içerisinde ayrıca modellenmiştir. Beton ve çelik donatı arasındaki aderansın tam olduğu kabul edilmiştir.



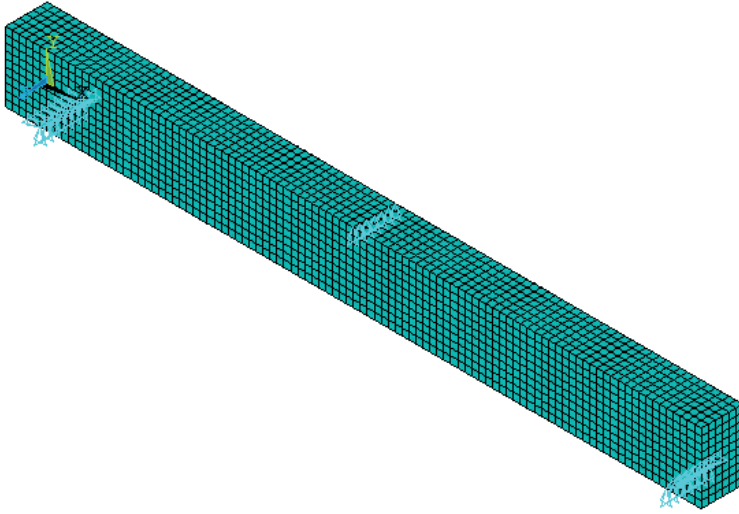
Şekil 4. *Betonarme Kiriş Beton ve Çelik Malzemenin Sonlu Eleman Modeli*

Sonlu eleman modelinde düzenli forma sahip, kare veya dikdörtgen enkesitinde eleman ağının kullanılması gerekmektedir. Bu doğrultuda 2500 mm uzunluğundaki betonarme kiriş 25mm x 25 mm boyutlarında toplam 9000 adet sonlu elemana ayrılmıştır.

Betonarme kirişin sonlu eleman modelinden beton için bir malzeme özelliği tanımlanırken, donatılar için üç farklı malzeme özelliği girilmiştir. Çekme donatısının akma dayanımı 517 MPa, basınç donatısının akma dayanımı 367 MPa ve enine donatının akma dayanımı 277 MPa olarak girilmiştir.

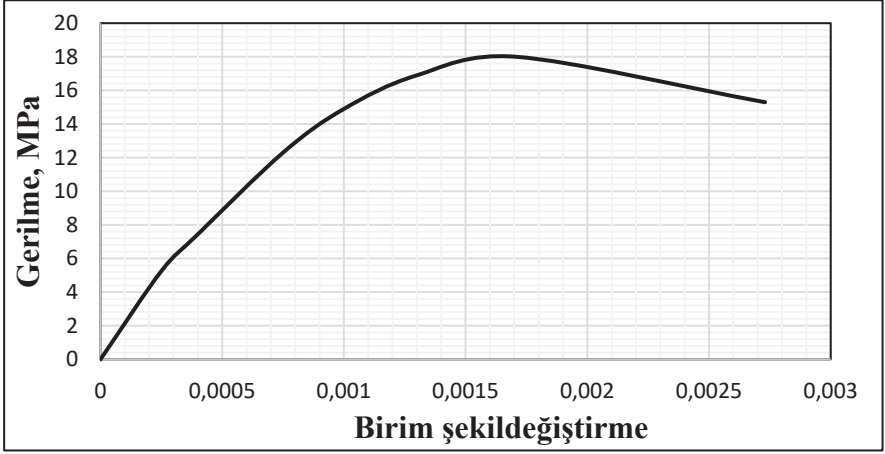
Betonarme kirişin her iki ucundan 150 mm uzaklıkta bulunan mesnetler oluşturulmuş, tekil yük kirişin tam ortasında bulunan düğüm noktası dizisine uygulanmıştır. Şekil 5'de ANSYS paket programı

kullanılarak modellenen betonarme kirişin mesnetleri ile uygulanan yük verilmiştir.



Şekil 5. Betonarme Kirişin Sonlu Eleman Modelinden Yük ve Mesnet Durumu

Sonlu eleman modelinde sargısız betonlar için geliştirilmiş Hognestad beton modeli kullanılmıştır (Ersoy ve Özcebe, 2018). Hognestad modelinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisi betonun doğrusallığının sınırını ve plastik davranışını belirlemekte kullanılacak olan Multilineer İzotropik Pekleşmeli Plastisite (Von Mises) modelinde tanımlanmıştır. Modellemede gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi iki parçalı olarak ele alınmış olup, tepe noktasına kadar olan ilk parçası ikinci derece bir parabol, ikinci parçası ise lineer olarak kabul edilmiştir. Bu kapsamda, gerçek davranışı simule edilecek betonun gerilme-birim şekil değiştirme eğrisi Şekil 6’da görüldüğü gibi belirlenmiştir.



Şekil 6. Sargılı ve Sargısız Betonun Modellenmesinde Kullanılan Malzeme Modeli

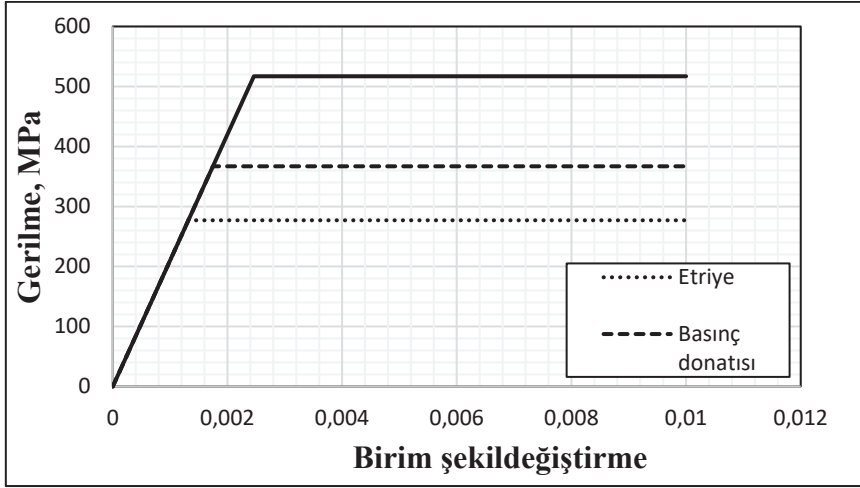
Betonun göçme halini benzetmek amacıyla Willam-Warnke modeli tercih edilmiştir. Betonun üç eksenli gerilme durumundaki göçme yüzeyini temsil etmek için ANSYS Sonlu Elemanlar Programı'nda Willam ve Warnke'nin beton için geliştirdiği model kullanılmaktadır (Willam ve Warnke, 1974).

Betonarme çeliğinin gerilme – şekil değiştirme ilişkisi başlangıçta doğrusal elastik olup, yük uygulanmaya devam edildikçe akmadan sonra plastik deformasyonlar oluşmaya başlar. Bu çalışmada, akmadan sonra meydana gelen dayanım artımı ihmal edilerek, çelik malzemesi için Bilineer izotropik pekleşmeli plastisite malzeme modeli kullanılmıştır (Şekil 7).

Çalışmada kullanılan beton ve çelik malzeme modellerine ait detaylı bilgiler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Sonlu Eleman Modellemede Kullanılan Malzeme Özellikleri

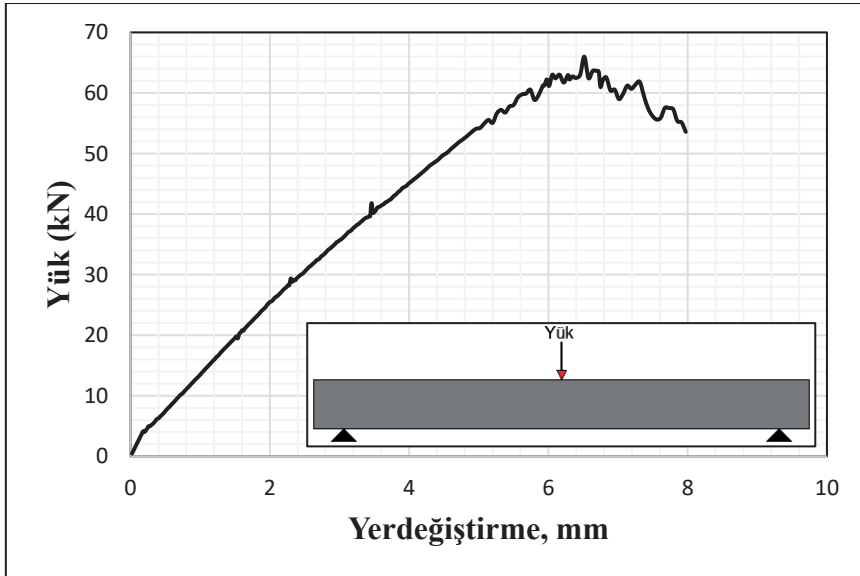
Malzeme Numarası	Eleman Tipi	Malzeme Özellikleri	
1	Solid65	Lineer Isotropik	
		Elastisite Modülü	21000
		Poisson Oranı	0,3
		Multilineer Isotropik	
		Gerilme	Ş.değiştirme
		5,24	0,00025
		7,43	0,0004
		12,2	0,00075
		14,8	0,001
		16,8	0,0013
		18	0,00171
		15,2	0,00273
		Beton	
		ShrCf-Op	1
		ShrCf-Cl	1
		UnTensSt (MPa)	1,48
		UnCompSt (MPa)	-1
		BiCompSt	0
		HydroPrs	0
		BiCompSt	0
		UnTensSt	0
		TenCrFac	0
2	Link180	Lineer Isotropik	
		Elastisite Modülü	210000
		Poisson Oranı	0,2
		Bilinear Isotropik	
		fy(MPa)	517,0
3	Link180	Lineer Isotropik	
		Elastisite Modülü	210000
		Poisson Oranı	0,2
		Bilinear Isotropik	
		fy(MPa)	367,0
4	Link180	Lineer Isotropik	
		Elastisite Modülü	210000
		Poisson Oranı	0,2
		Bilinear Isotropik	
		fy(MPa)	277,0



Şekil 7. Donatı Çeliğinin Modellenmesinde Kullanılan Malzeme Modeli

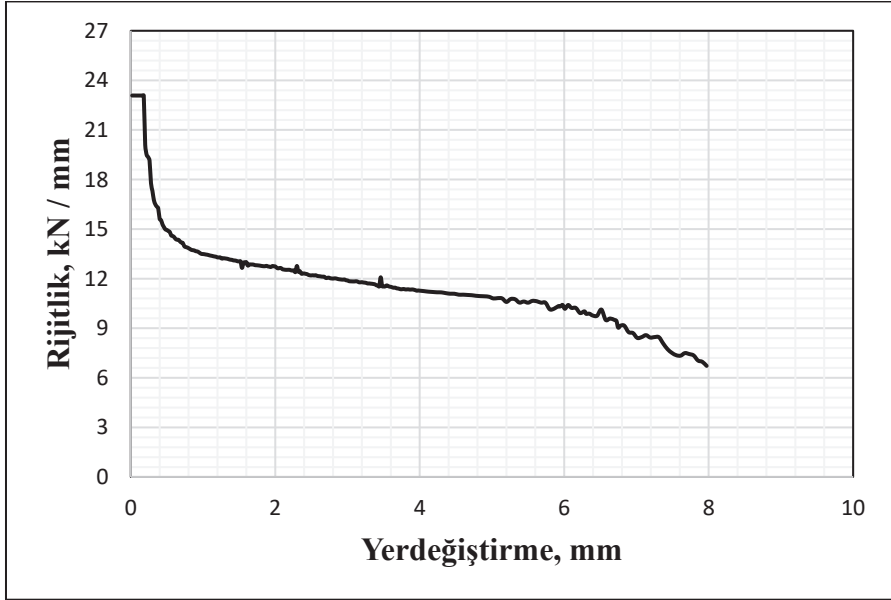
3. Bulgular ve Tartışma

Sonlu eleman modeli yapılan betonarme kirişin doğrusal olmayan sonlu eleman analizi sonrasında elde edilen yük – yerdeğiştirme eğrisi Şekil 8’de verilmiştir. Doğrusal olmayan sonlu eleman analizine göre betonarme kirişin yük taşıma kapasitesi 66 kN olarak belirlenmiştir.



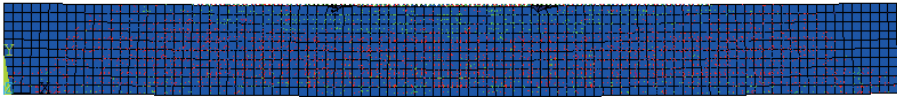
Şekil 8. Betonarme Kirişin Yük – Yerdeğiştirme İlişkisi

Betonarme kirişin doğrusal olmayan analizi boyunca betonda meydana gelen çatlaklar, kiriş rijitliğinin azalmasına neden olmaktadır. Betonarme kirişin rijitlik – yerdeğiştirme ilişkisi Şekil 9’da gösterilmiştir.



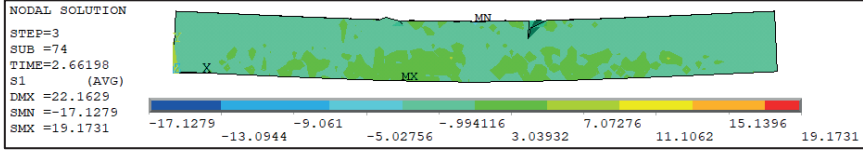
Şekil 9. Betonarme Kirişin Rijitlik – Yerdeğiştirme İlişkisi

Betonarme kirişin yük etkisi altındaki doğrusal olmayan analizlerinden elde edilen verilere göre kiriş rijitliğindeki azalma % 71 seviyesine kadar çıkmıştır (Şekil 9). Betonarme kirişte meydana gelen çatlakları sonlu eleman modelindeki gösterimi Şekil 10’da verilmiştir.

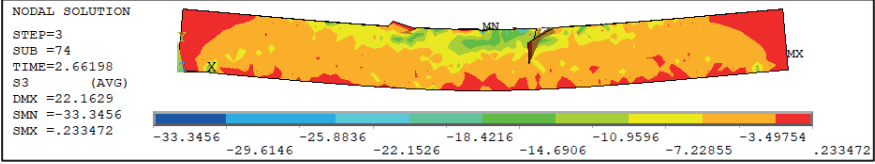


Şekil 10. Betonarme Kirişin Göçme Anında Elde Edilen Çatlak Dağılımı

Betonarme kirişin sonlu eleman analizinden elde edilen 1.asal gerilmeler Şekil 11’de, 3.asal gerilmeler ise Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 11. 1.Asal Gerilmeler



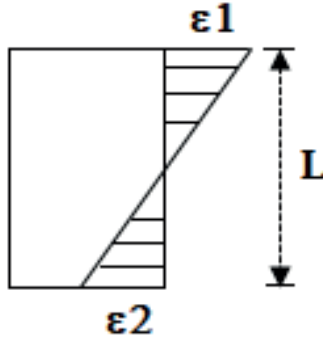
Şekil 12. 3.Asal Gerilmeler

Eğilme momenti ve eksenel kuvvet ya da yalnızca eğilme momenti etkisi altındaki bir betonarme kesitin davranışını belirlemek için gerçek malzeme davranışını temel alarak modellenmiş bir elemanın moment-eğrilik ilişkisi elde edilebilir. Moment-eğrilik ilişkisini oluşturan M_i ve K_i değerlerini iterasyon metoduyla hesaplayabilmek için denge ve uygunluk denklemlerinden faydalanılır (Ersoy ve Özcebe, 2018). Bir kiriş kesitinden faydalanılacak olursa, c (tarafsız eksen derinliği) değeri için varsayımlar yapılır, c değeri kuvvetler dengesi sağlanıncaya kadar değiştirilir. En dış lifteki beton birim kısalması, ε_{ci} için bir değer seçilir. Bilinen ε_{ci} ve c için çelik birim deformasyonları, ε_{si} bulunur. Bulunan ε_{si} değerlerinden donatıdaki gerilmeler ve donatı kuvvetleri tespit edilir. Beton basınç bileşkesi F_c hesaplanır. Dengeye ulaşıldıktan sonra, iç kuvvetlerin ağırlık merkezi etrafındaki momenti hesaplanarak M_i bulunur. Eğrilik ise Denklem (1) de belirtilen şekilde belirlenir (Ersoy ve Özcebe, 2018).

$$K_i = \frac{\varepsilon_{ci}}{c} \quad (1)$$

Betonarme kirişin sonlu eleman modelinde kiriş enkesiti üst yüzeyinden alt yüzeyine kadar aynı doğrultudaki katı eleman sırası için hesaplanan eğrilik Şekil 13'de gösterilen betonarme kirişin her bir lifinin

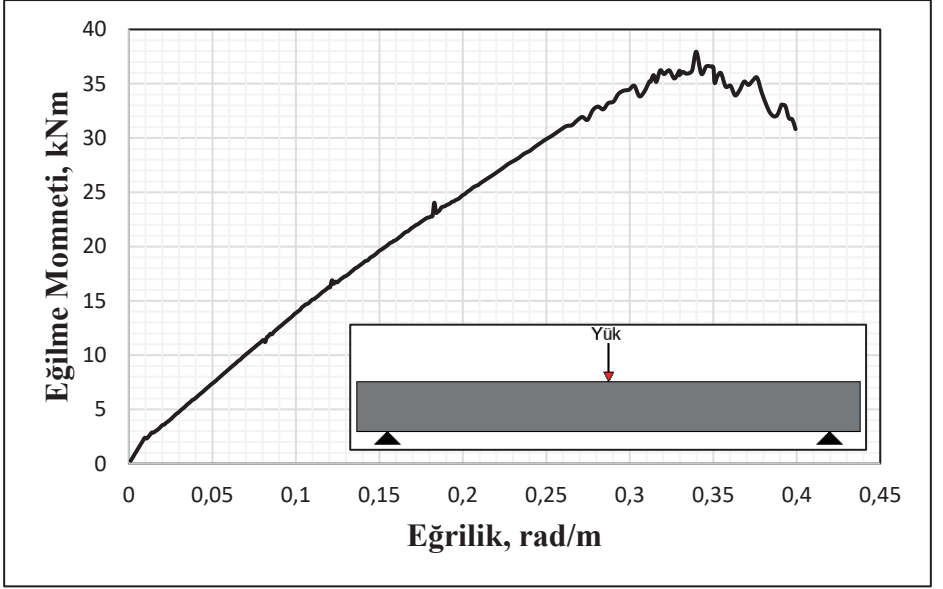
başlangıç ve bitiş düğüm noktalarındaki birim şekil değiştirmelerden faydalanılarak Denklem (2) de gösterilen şekilde hesaplanmıştır.



Şekil 13. Sonlu Eleman Modelinde Tanımlanan Eğriliğin Belirlenmesi

$$\emptyset = (|\varepsilon_1| + |\varepsilon_2|)/L \quad (2)$$

Betonarme kirişin doğrusal olmayan analizinden elde edilen moment – eğrilik ilişkisi Şekil 14’de gösterilmiştir. Doğrusal olmayan sonlu eleman analizine göre betonarme kirişin moment taşıma kapasitesi yaklaşık 38 kNm olarak belirlenmiştir.



Şekil 14. Betonarme Kirişin Eğilme Momenti – Eğrilik İlişkisi

4. Sonuçlar

Bu çalışmada, monotonik yüklü, dikdörtgen kesitli betonarme bir kirişin ANSYS programı kullanılarak doğrusal olmayan sonlu eleman analizi yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir:

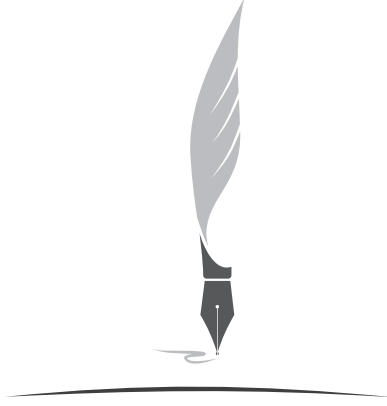
- Doğrusal olmayan sonlu eleman analizinde, analizin süresini kısa tutmak için modelleme kriterlerine dikkat edilmesi gerekir. Modellemede kullanılacak ağ yoğunluğu bu kriterlerin başında gelmektedir. Ağ yoğunluğunun düşük tutulması analizin süresini kısaltabilir ancak hedeflenen yük düzeyine ulaşılmasını engelleyebilir. Bu çalışmada altıgen ağ tipinde 25 mm x 25 mm boyutlarında elemanlar kullanılmıştır.
- Çalışmada donatılar ayırık modelleme yöntemine göre modellenmiştir. Ayırık modelleme yönteminde enine ve boyuna donatıların tamamı tek tek oluşturulmakta olup yayılı modelleme yöntemine göre işlem hacmi daha fazladır. Ayırık

modelleme yönteminin en büyük dezavantajı oluşturulacak modelde donatıların yeri ile sonlu elemanların çakışmasına dikkat edilmesinin gerekliliğidir. Bu çakışma sağlanamaz ise model analizi yapılamamaktadır.

- Sonlu eleman analizinde betonun hem elastik hem de plastik davranışının simüle edilmesi gerekmektedir. Öyleki betonun plastik davranışı hesaba katılmadığında, göçme anına kadar lineer davranış sergileyen beton için doğru bir model analizi gerçekleşmemiş olur. Bu nedenle betonun Multilineer İzotropik pekleşmeli plastisiteli (Von-Mises) davranışının da mutlaka tanımlanması gerekmektedir.
- Beton içerisindeki farklı özellikte malzemelerden oluşan kompozit bir malzemedir. Bu kapsamda heterojen ve anizotrop bir malzeme olan betonun sonlu eleman modelinde homojen ve izotrop olarak belirlenmesi doğrusal olmayan analiz sonuçlarının gerçekle uyumunu etkileyecektir.
- Sonlu eleman analizinde karşılaşılan yakınsama hataları ve bunların düzeltilmesi için kullanıcı tarafından yapılan müdahalenin doğruluğu analiz sonuçlarını da etkilemektedir. Öyleki betonarme kirişin yük – yerdeğiştirme eğrisinde meydana gelen ani artışlar bu hatalardan kaynaklanmaktadır.
- Çalışmada betonarme kirişin eğilme kapasitesi belirlenirken üç noktalı eğilme deney tasarımı modellenmiştir. Ancak üç noktalı eğilme deneyinde eğilme etkisine ilave olarak kesme etkilerinin de meydana gelmesi söz konusudur. Dolayısıyla mevcut çalışma dört noktalı eğilme deney tasarımı modellenerek geliştirilebilir.

KAYNAKÇA

- Moaveni, S. (1999). Finite Element Analysis, Theory and Applications with ANSYS, Bill Stenquist, Prentice Hall Inc., New Jersey.
- Ersoy, U., & Özcebe, G. (2018). Betonarme, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.
- Willam, K. J., & Warnke, E. P. (1974). Constitutive model for the tri-axial behavior of concrete, IABSE, Report No.19, Bergamo, 1-30, 1974.
- Fanning, P. (2001). Nonlinear models of reinforced and post-tensioned concrete beams, Electronic Journal of Structural Engineering, 2, 111-119.
- Wolanski, A. J. (2004). Flexural behavior of reinforced and pre-stressed concrete beams using finite element analysis, Degree of Master of Science, Faculty of Graduate School, Marquette University, Wisconsin, 48.
- Barbosa, A.F., Riberio, G.O., (1998). Analysis of reinforced concrete structures using ANSYS nonlinear concrete model, Computational Mechanics New Trends and Application, S. Idelsohn, E. Onate, and E. Dvorlin (editors), CIMNE, Barcelona, Spain.
- Yeon, Y. M., Lee, W., Hong K. N. (2022). Finite element analysis of reinforced concrete beams prestressed by Fe-Based shape memory alloy bars. *Applied Sciences*. 12(7):3255. <https://doi.org/10.3390/app12073255>



Bölüm 4

PAS SÖKÜCÜ KİMYASALIN DONATI ÇELİĞİ DAYANIMINA ETKİSİ

Said DUSAK¹

1. GİRİŞ:

Demir ve çelik alaşımlar dış hava koşullarına açık bir şekilde uzun süre kaldığı durumlarda oksijen ve su ile etkileşime girerek korozyon veya pas diye isimlendirdiğimiz çeşitli kimyasal bileşikler oluştururlar. Özellikle dünyada yaygın olan betonarme yapıların donatı çelikleri imalat aşamasında açık hava koşullarına uzun süre maruz kalabilmektedir. Donatı çeliğinin beton dökülme kadar geçen süre içerisinde korozyona uğraması, diğer bir ifadeyle paslanması, betonarme yapıları olumsuz etkileyen önemli bir faktördür. Özellikle ileri derecedeki pas oluşumunda, çelik ile beton arasında sağlanması gereken aderansı engellemektedir. Aderansın gerekli ölçüde elde edilemediği durumlarda betonarme elemanlar beklenen davranışı sağlayamayacaktır. Betonarme çeliğinde oluşan bu korozyonun beton dökülmeden önce temizlenmesi gereklidir. Oluşan bu korozyon mekanik ve kimyasal yöntemlerle temizlenebilmektedir. Mekanik yöntemle donatı çeliğinin korozyon temizliği uzun zaman almakta ve uygulama zorluğu bulunmaktadır. Uygulama kolaylığı ve zaman bakımından kimyasal yöntemler daha fazla tercih edilmektedir. Pas sökücü kimyasallar, bu sorunu çözmek için yaygın olarak kullanılır. Ancak bu kimyasalların çelik donatıya etkisi değerlendirilmelidir. Pas sökücü kimyasal ile korozyon giderildikten sonra bu kimyasal maddelerin yüzeylerden uzaklaştırılması gerekmektedir. Pas sökücü kimyasal madde kalıntılarının çelik yüzeyinde kalması durumunda çeliğin akma ve çekme dayanımına ve kimyasal yapısına nasıl etki edeceği ile ilgili çalışma yapılmalıdır. Bu bölümde, korozyonun temizlenmesi amacıyla kullanılan pas sökücü kimyasal maddelerin betonarme çeliğine etkisi detaylı bir şekilde incelenecektir. Pas sökücü kimyasal maddelerin çeliğe etkisini görmek için pas sökücü kimyasal madde uygulanan numuneler hazırlanarak bir seri çekme testi yapılmış ve çekme testlerinin sonuçları bölüm içerisinde verilecektir.

1. Literatür İncelemesi

Çelik üzerindeki korozyonun giderilmesi çok önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu korozyonun farklı metotlarla giderilmesi üzeri yapılmış olan çalışmalar vardır. Pas sökücülerin çelik özellikleri üzerindeki etkileri çeşitli yöntemler ve malzemelerle incelenmiştir. Karboksilik asit bazlı polimerler ve seryum nitrat jel kaplamalar, korozyon direncini ve yüzey özelliklerini iyileştirmiştir [1,2]. Gümüş TiO_2 kaplamaların kullanımı da etkili koruma sağlamıştır [3]. Pasın giderilmesi için lazer temizleme teknolojisi ve çok işlevli pas önleyiciler, karbon çeliği ve beton yapıların mekanik özelliklerini ve korozyon direncini önemli ölçüde artırmıştır [4,5]. Çevre dostu ultrasonik pas temizleme yöntemleri pas giderme oranlarını iyileştirirken, gaz karbürizasyonu çalışmaları pasın çelik üzerinde biriktirilen tabakanın performansını etkilediğini göstermiştir[6,7]. Bu bulgular, pas giderme teknikleri ve çeliği korozyona karşı koruma yöntemlerinin geliştirilmesini sağlamaktadır. Çelik çekme testleri ile pas sökücülerin çelik akma gerilmesine etkilerini

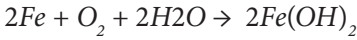
inceleyerek çelik dayanımına zarar vermediği belirtilmiştir[8].

2. Pas Nedir?

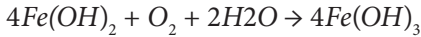
Pas, demirin oksijen ve su ile etkileşime girerek oluşturduğu çeşitli kimyasal bileşiklerin genel adıdır. Kimyasal açıdan, pasın temel bileşenleri arasında hidratlı demir(III)oksit $Fe_2O_3 \cdot H_2O$ ve demir(III) oksit-hidroksit $FeO(OH)$, $Fe(OH)_3$ yer alır. Paslanma, demir ve demirin, çelik gibi alaşımlarının korozyonu için kullanılan bir tanımdır. Diğer metallerin korozyonunda oksitlenme olmasına rağmen pas olarak nitelendirilmez.

Paslanma süreci, demirin oksijen ve suyla tepkimeye girerek oksitlenmesiyle başlar. Bu süreç birkaç aşamada gerçekleşir:

1. Demir (Fe), su (H_2O) ve oksijenle (O_2) reaksiyona girerek demir(II) hidroksit ($Fe(OH)_2$) oluşur:



2. Oluşan demir(II) hidroksit, oksijenin varlığında, oksijenle tepkimeye girerek demir(III) hidroksit ($Fe(OH)_3$) haline gelir:



3. Demir(III) hidroksit, su kaybederek demir(III) oksit (Fe_2O_3) ve hidratlı demir(III) oksit ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$) oluşturur:



Bu kimyasal reaksiyonlar sonucu oluşan demir oksit ve hidroksit formlarındaki bileşikler, genellikle kırmızımsı veya kahverengi bir tabaka oluşturur ve demirin yüzeyinde birikir. Pas denen bu tabakanın oluşumu demirin yapısal bütünlüğünü zayıflatır. Bu nedenle, demir ve çelik yapıların korunması için korozyonu önleyici tedbirler almak önemlidir.

3. Pas Oluşumunun Betonarme Sisteme Etkisi:

Hava ve ortam şartlarına bağlı olarak demirin korozyonu çok hızlı gerçekleşebilmektedir. Bu nedenle betonarme yapılardaki donatıların hazırlanması sürecinde beton dökülene kadar geçen süre içerisinde korozyonun başladığı durumlar oluşabilmektedir. Bunun yanında kolon filizleri de bir sonraki katın betonu hazırlanana kadar daha uzun bir süreç boyunca dış ortam koşullarına maruz kaldığından daha kalın pas tabakası oluşabilmektedir.

Betonarme çeliğinin korozyonu, betonarme yapının davranışını etkileyen çok önemli bir faktördür. Korozyon, çelik yüzeyde oksitlenme ve hidratlanma reaksiyonları sonucunda pas oluşumuna neden olur. Oluşan pas, mevcut koşullar değişmediği sürece artarak devam eder ve zaman içerisinde önlem alınmadığı durumlarda çelik donatıların hacmini artırır. Kendi başına yapı elemanı olarak kullanılan çelik ileri düzeye ulaşan paslanma durumun-

da kesit kaybına uğrayarak çelik elemanın kopmasına sebep olur (Şekil 1). Betonarme çeliğinde ise korozyon, ileri seviyelere ulaştığında hacim artışının etkisiyle betonun içinde hapsolan çelik, hesaba katılmayan ilave gerilmeler oluşmasına, böylece betonun çatlamasına ve parçalanmasına sebep olur. Bu durum, betonarmenin taşıma kapasitesini ve dayanımını azaltır (Şekil 2).



Şekil 1. Çelikte korozyon sebebiyle oluşan kopma Şekil 2. Betonarmede çeliğin korozyonu

4. Pas (Korozyon) Temizleme Yöntemleri:

Betonarme çeliğinin korozyonlu haliyle beton dökülmesi durumunda beton ile çelik arasında oluşması gereken aderans sağlanamayacak ve o yapı elemanından istenen performansı sağlayamayacaktır. Bu nedenle betonarme çeliğinin üzerinde oluşmuş bulunan pas katmanını temizlenmelidir.

Bu temizleme işlemi;

4.1. Mekanik Yöntemler

Mekanik yöntemlerde, tel fırça, zımpara veya aşındırıcı uçlu elektrikli aletler kullanılarak yapılmaktadır. Ancak betonarme donatı imalatlarının arasına el giremeyecek derecede sıkı ve yoğun olduğu durumlarda, ayrıca imalatların fazla olması sebebiyle bu şekilde pas temizliği yapmak uzun zaman alabilmektedir.

4.2. Kimyasal Yöntemler

Mekanik yöntemlerin zorluğu ve uzun zaman alması sebebiyle pas temizliğinin farklı yöntemlerle yapılması yoluna gidilmiş ve çeşitli kimyasal maddeler kullanılarak bu pas katmanını giderilmeye çalışılmıştır. Demir ve çelik üzerinde oluşan pasın çözdürülerek temizlenmesi amacıyla kullanılan maddelerden biri de “Ortofosforik Asit” olarak tanımlanan bir kimyasal maddedir. Bunun dışında da aynı şekilde pas sökücü amaçla kullanılan kimyasal bileşikler bulunmaktadır.

5. Pas Sökücü Kimyasal Maddenin Tanımı, Tarifi ve Özellikleri:

Demir ve çelik alaşımlarında oluşan pasın temizlenmesi amacıyla pas sökücü olarak kullanılan farklı kimyasal maddeler vardır. Ancak bileşiminde etken madde olarak fosforik asit kullanılan pas sökücülerin daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Fosforik asit içerikli pas sökücünün bileşimi ve birleşim oranları Tablo.1’de verilmiştir.

Tablo 1. Pas sökücü sınıfının ihtiva ettiği maddelerin genel tanımı ve konsantrasyonları

Bileşenler	Konsantrasyon
ORTHOPHOSPHORIC ACID	45-55
BUTHYL GLYCOL ETHER	0-5

5.1. Pas Sökücü Kimyasal Maddenin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Görünüş: Berrak akıcı sıvı

Koku: Karakteristik kokulu

Renk: Renksiz

Suda çözünürlük: Çözünür

Ph: 1.00

Parlama Noktası: -

Kaynama noktası: 110 °C

Buhar Basıncı: -

Yoğunluk: 1.100-1.149 g/cm³

Kendiliğinden Patlama Derecesi: -

Erime noktası: 0 °C

Pas sökücü, fosforik asit içerikli kimyasal bileşen, istenmeyen yüzeylere teması halinde su ile temizleme yöntemi uygulanarak bertaraf edilir. Pas sökücü sıvı, içeriğinde bulunan kimyasal maddelerin vücuda değmesi durumunda zarar vereceği için kullanılması durumunda dikkatli olunmalı ve gerekli tedbirlerin alınması sağlanmalıdır. Pas sökücü kimyasal, vücuda temas etmeyecek şekilde kullanılmalıdır, vücuda teması durumunda cilt yanıklarına ve göz hasarına yol açabilir. Kimyasalın demir ve çelik yüzeylere uygulanması sırasında koruyucu eldiven, koruyucu kıyafet, göz koruyucu ve yüz koruyucu kullanılmalıdır. Vücuda, saça ve göze teması halinde su ile birkaç dakika dikkatlice durulanmalıdır. Solumamak için maske kullanılarak uygulanmalıdır.

6. Pas Sökücü Kimyasal Maddenin Donatı Çeliğine Etkisi:

6.1. Pas Sökücü Madde Kullanımının Çelik Mekanik Özelliklerine etkisi:

Pas sökücüler, çelik yüzeydeki pası etkili bir şekilde temizler. Bazı pas sökücüler, çeliğin korozyona karşı direncini artıran inhibitörler içerir. Bu inhibitörler, çeliğin koruyucu bir tabaka ile kaplanıp korozyona karşı daha dirençli olmasını sağlayarak yeniden paslanmasını geciktirir ve ömrünü uzatır.

Pas sökücülerin bileşimi, çelik yüzeyle kimyasal tepkimeye girerek çeliğin yüzey özelliklerini değiştirebilir. Bu tepkimeler, çeliğin mekanik özellikleri, özellikle akma, çekme dayanımı ve sünekliği üzerinde etkili olabilmektedir.

6.2. Pas Sökücülerin Betonarmede Beton ve Çelik Ara Yüzüne Etkisi:

Betonarme yapılarda, beton ve çelik donatı arasındaki aderans, betonarme elemanın yük taşıma özelliği açısından hayati öneme sahiptir. Pas sökücülerin bu ara yüz üzerinde oluşturduğu kimyasal değişimler, çelik ve beton arasındaki aderansı zayıflatabilir. Uygun kimyasal bileşenler ve doğru uygulama teknikleri, bu ara yüzdeki aderansı korumaya yardımcı olabilir.

6.3. Pas Sökücü Kimyasalların Çelik Üzerindeki Etkilerinin Azaltılması:

Pas sökücü kimyasallar, betonarme çeliğinin korozyonunu önlemek ve mevcut pası temizlemek için etkili bir çözüm sunar. Ancak, bu kimyasalların çelik donatıya etkileri dikkatlice değerlendirilmelidir. Doğru ürün seçimi, uygun uygulama teknikleri ve koruyucu önlemler, bu kimyasalların olumsuz etkilerini en aza indirerek betonarme yapıların istenen dayanımda kalmasını sağlar. Yapıların güvenliği ve uzun ömürlülüğü için, pas sökücü kimyasalların bilinçli ve dikkatli kullanımı hayati öneme sahiptir.

Yapılan çeşitli laboratuvar testleri ve araştırmalar, pas sökücü kimyasalların çelik üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu testler, kimyasalın konsantrasyonu, uygulama süresi ve çevresel faktörler gibi değişkenlerin test sonuçları üzerindeki etkileridir.

6.3.1. Doğru Ürün Seçimi:

Uygun pas sökücü kimyasal seçimi, hem çeliğin korozyon direncini artırır hem de beton basınç dayanımına olumsuz etkiyi engeller. Ürün seçerken, kimyasal bileşenlerin beton ve çelik üzerindeki etkilerini göz önünde bulundurmak gereklidir.

6.3.2. Uygulama Öncesi ve Sonrası Yüzey Hazırlığı:

Pas sökücü uygulamadan önce ve sonra yüzeylerin doğru bir şekilde temizlenmesi, yıkanması, kurutulması ve hazırlanması, kimyasalların olumsuz etkilerini azaltır. Ayrıca çelik üzerinde pas dışında bulunan herhangi madde pas sökücünün çelik yüzeyine ulaşmasını engelleyerek bu alanda korozyonun

ilerlemesine sebep olur. Yüzey hazırlığı, kimyasalın etkinliğini artırır. Pas sökücü uygulandıktan sonra çelik yüzeyinden pas sökücü sıvı kalıntılarının uzaklaştırılması ve temizlenmesi ise hem çeliğin kimyasal yapısının etkilenmesinin önüne geçer hem de dökülecek betonun karma suyu karışarak beton basınç dayanımına verebileceği zararın önüne geçilmiş olur.

6.3.3 Çelik Yüzeylere Koruyucu Katman Uygulaması:

Pas sökücü kimyasal uygulandıktan sonra, çelik yüzeylerde aderansı olumsuz yönde etkilemeyen koruyucu kaplamaların kullanılması, yapı elemanlarının uzun ömürlü olmasını sağlar. Bu koruyucu katmanlar, pasın yeniden oluşmasını geciktirir ve yüzeyleri çevresel etkilere karşı korur.

6.3.4. Kimyasal Konsantrasyon ve Uygulama Süresi:

Pas sökücülerin doğru yoğunlukta ve uygun sürelerde kullanılması, istenmeyen kimyasal tepkimeleri önleyerek, çeliğin ve betonun zarar görmesini engeller. Pas sökücü kimyasalların çok yoğun oranda kullanılması çelik kesitini düşürecek oranda aşındıracağı gibi kimyasal tepkimeler yoluyla çeliğin yapısını da bozabilecek etki gösterebilir. Benzer şekilde korozyonun giderilmesi amacıyla kimyasal pas sökücü maddenin kullanılmasından sonra uzun süre yıkamadan bırakmak da hem çelik hem de betona zarar verecektir.

Sonuç olarak betonarme çeliğinde korozyonun giderilmesi amacıyla pas sökücü kimyasal kullanıldığı takdirde uygulamadan hemen sonra demirlerin suyla yıkanarak üzerlerinde kimyasal kalıntısının kalmamasına dikkat edilmesi ve yüzey kuruduktan sonra tekrar korozyona uğramadan hızlı bir şekilde beton dökümünün gerçekleştirilmesi önerilmektedir.

7. Pas Sökücü Kimyasalların Çelik Çekme Dayanımına Etkisini Gösteren Deneysel Çalışmalar:

Betonarme çeliğinde imalat süresince ortam şartlarına maruz kalmadan dolayı oluşan korozyonlar, çeliğin betonla aderansını olumsuz yönde etkilemekte ve betonarme yapıların hem dayanımını hem de ömrünü azaltmaktadır. Bu sebeple betonarme çeliğinin korozyona uğradığı durumlarda beton imalatından önce korozyonun giderilmesi gerekmektedir.

Korozyonun giderilmesi için piyasada çeşitli kimyasallar bulunmaktadır. Çalışmaya konu olan ve yukarıda içeriği verilen fosforik asit içerikli pas sökücü ürünün kullanıldığı betonarme çeliğinin kesit ölçüm ve çekme dayanımları ile ilgili yapılan çalışmalarda ölçülen kayıpların standartlarda belirlenen tolerans aralığında olup olmadığı gösterilmiştir. Gerçekleştirilen çekme testlerinde her bir numuneye uygulanan kuvvetler ve çelik donatı numunesinin çapı üzerinden o numuneye ait akma gerilmesi ve çekme gerilmesi değerleri elde edilmiştir. Ayrıca her bir numunenin farklı miktarlarda korozyona uğramış olması sebebiyle çelik çubuğun çapı hassas bir şekilde ölçülmüştür.

7.1. Betonarme Çeliği Numuneleri Üzerinde Gerçekleştirilen Çalışma

İnşaat sahasından alınmış, yüzeysel korozyona uğramış olan numunelerin fosforik asit içerikli kimyasal pas sökücü kullanılarak korozyon temizleme işlemi yapılmıştır. $\Phi 14$, $\Phi 16$, $\Phi 20$, $\Phi 22$, $\Phi 25$, $\Phi 30$ çaplarındaki 6 adet nervürlü betonarme çeliği numuneleri üzerinde mekanik özelliklerindeki değişim ve korozyon durumunun belirlenebilmesi amacıyla kesit ölçüm çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Çelik numuneleri çekme testlerine tabi tutularak akma ve çekme gerilmesi değerleri belirlenmiş ve kütle ölçümleri yapılmıştır. B500C çelik sınıfı numuneleri üzerinde yapılan çekme testleri sonucu bulunan karakteristik değerler Tablo 2’de verilmiştir. Test sonucu hesaplanan bu değerler, TS 708 ve TS 6892-1 standardında B500C çelik sınıfı için verilen sınır değerler (Tablo 3) ile karşılaştırılmıştır. Bu şekilde, korozyona bağlı kesit ve kütle kayıplarının, çeliğin karakteristik değerlerine etkisinin standartlarda belirlenen sınırların içinde kalıp kalmadığı gösterilmiştir.

Bu karşılaştırma sonucu B500C çelik sınıfı için sağlanması gereken minimum (nominal) değer, 500 N/mm^2 olmalıdır. Çekme testlerinin tamamında elde edilen akma gerilmesi değerleri en düşük 513 N/mm^2 , en yüksek 608 N/mm^2 olarak elde edilmiş olup standartlarda verilen sınır değerinin üstündedir. Standartlarda verilen bir diğer sınır değer olan bulunan akma değerinin minimum akma değeri olan 500 N/mm^2 oranıdır. Çeliğin sünek davranışı için bu $R_e/R_{e(nom)}$ oranı 1,30’dan büyük olmamalıdır. Tablo 2’de bu numuneler için bu oranın en düşük 1,06, en yüksek 1,22 bulunarak sınır değer olan 1,30’un altında kaldığı görülmektedir. Kontrol edilmesi gereken son sınır değer ise yine çeliğin sünek davranışını gösteren bir değer olup çekme gerilmesinin, akma gerilmesine oranının (R_m/R_e) en az 1,15 en fazla 1,35 arasında olmasıdır (Tablo 3). Bu R_m/R_e oranının da Tablo2’de görüldüğü gibi en düşük 1,18, en yüksek 1,24 değerini alarak sınır değerlerin içerisinde kaldığı görülmektedir.

B500C çelik sınıfı numunelerin mekanik özellikleri yönünden yapılan çekme testleri sonucu, numunelerin TS 708 ve TS6892-1 standartlarında verilen akma ve çekme sınır değerlerini sağladığı görülmektedir.

Buradan yola çıkılarak fosforik asit içerikli pas sökücü kimyasalın uygulama süresi, koşulları ve sonrasında yüzeyin yıkanması şartlarına uyularak pas sökücü ile temizlenmiş olan çelik çubukların çekme testleri sonuçları değerlendirildiğinde standartlarda verilen akma, çekme gerilmesi gibi karakteristik sınır değerlerini sağladığı anlaşılmaktadır. Çelik çubuk kesitlerinde pas sökücü ile yapılan temizlik ile meydana gelen aşınma ve kesit kaybı ihmal edilebilecek düzeyde olup çelik çubuğun akma ve çekme değerleri üzerindeki etkisi de standartlarda verilen sınır değerleri karşılayacak ölçüde sınırlı kalmaktadır.

Tablo 2. B500C çelik sınıfı numuneye ait akma ve çekme değerleri

Çap (mm)	Ölçüm Çapı (mm)	Akma Gerilmesi (R_e) (N/mm ²)	Çekme Gerilmesi (R_m) (N/mm ²)	Çekme/Akma Oranı (R_m/R_e)	$R_e/R_{e(nom)}$
14	14,23	529	651	1,23	1,06
16	16,02	539	672	1,24	1,08
20	20,12	586	703	1,20	1,17
22	22,01	561	673	1,20	1,12
25	25,09	513	609	1,19	1,03
30	30,03	608	715	1,18	1,22

Tablo 3. B500C çelik sınıfı TS 708 ve TS6892-1 akma ve çekme sınır değerleri

Akma Gerilmesi ($R_{e(nom)}$) (N/mm ²) (Min)	$R_e/R_{e(nom)}$ (Max)	R_m/R_e (Min-Max)
500	1,30	1,15-1,35

Ayrıca her bir çelik çubuk numunenin pas sökücü ile temizlendikten sonra hassas çap ölçümleri yapılarak TS 708'e göre çubuk çapları ve kütleleri, kütle sınır değerleri ile Tablo 4'te karşılaştırılmıştır. Temizlenmiş numunelerin kütle ve boy indekslerinin TS 708 standardındaki sınırlar içinde kalıp kalmadığının incelenmiştir. Bu şekilde, korozyona bağlı kesit ve kütle kayıplarının, standartlarda belirlenen sınırların içinde kalıp kalmadığı gösterilmiştir. Pas sökücü ile temizlenmiş olan her numunenin ölçülen çap ve kütle değerleri Tablo 4'te görüldüğü üzere sınır değerlerin arasında kalmaktadır.

Paslı çelik çubukların ölçümleri yapıldıktan sonra fosforik asit içerikli pas sökücü ile temizlendikten sonra tekrar ölçüm yapılmıştır. Pas temizliği öncesi ve sonrası kütle değerleri belirlenmiş, buna göre çap ve kütlede oluşan kayıplar hesaplanarak Tablo 5'te verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde pas sökücü kullanılarak yapılan temizliğin kesitlerde oluşturduğu aşınma ve kesit kaybının ihmal edilecek ölçülerde olduğu görülmektedir.

Dolayısıyla uygulama süresi, uygulama koşulları ve uygulama sonrasında yüzeyin yıkanarak temizlenmesi şartlarına uyularak pas sökücü kimyasal madde ile pas temizliği yapılmış olan çelik çubukların standartlarda verilen sınır değerlerin içinde kaldığı ve oluşan kesit kaybının ihmal edilecek oranda olduğu anlaşılmaktadır.

Fosforik asit içerikli pas sökücü ile korozyondan kaynaklanan çap azalması Tablo 5'te görüldüğü gibi %0,00 ile %0,20 arasında olup ortalaması %0,11 olarak ölçülmüştür. Bu kesitlerin çapındaki değişime bağlı olarak kesit alanlarındaki kayıp miktarları ise %0,00 ile %0,39 arasında olup ortalaması %0,18 olarak ölçülmüştür. Bu değerler ihmal edilebilecek düzeyde olup kesit kaybına uğrayan pas sökücü ile temizlenmiş numunelerin kütle değerleri TS 708'de belirtilen (Tablo 4) sınır değerlerinin içinde kalmaktadır.

Tablo 4. Pas sökücü ile temizlenmiş numuneye ait TS 708'e göre kütle sınır değerleri

Çap (mm)	Ölçüm Çapı (mm)	Kütle (Kg/m)	TS708 Kütle Sınırı (Min) (Kg/m)	TS708 Kütle Sınırı (Max) (Kg/m)
14	14,18	1,239	1,155	1,264
16	16,05	1,588	1,508	1,651
20	20,08	2,486	2,358	2,581
22	22,00	2,984	2,850	3,119
25	25,05	3,869	3,676	4,023
30	30,02	5,556	5,300	5,799

Tablo 5. Çelik çubukların pas sökücü ile temizlendiğinde kesit kayıplarının belirlenmesi

No	Çap (mm)	Ölçüm Çapı (mm)		Kütle (kg/m)		Kesit ve Kütle Kaybı	
		Paslı	Temizlenmiş	Paslı	Temizlenmiş	% Çap azalması (mm)	% Kütle azalması (kg)
1	14	14,20	14,18	1,243	1,239	0,14	0,32
2	16	16,05	16,05	1,588	1,588	0,00	0,00
3	20	20,10	20,08	2,491	2,486	0,10	0,20
4	22	22,02	22,00	2,989	2,984	0,09	0,17
5	25	25,10	25,05	3,853	3,869	0,20	0,41
6	30	30,06	30,02	5,571	5,556	0,13	0,27

8. Sonuç:

Betonarme imalatlarda korozyon sebebiyle beton ile donatı arasındaki aderansın azalma riskini ortadan kaldırabilmek amacıyla donatı yüzeylerinin temizlenmesi gerekmektedir. Temizleme işleminde fosforik asit içerikli kimyasal pas sökücü maddeler kullanılıp daha sonra donatı yüzeyinde kalabilecek kimyasal madde kalıntılarının su ile yıkanması şeklinde olmalıdır. Ayrıca yıkama sonrası su-pas sökücü karışımının yeni dökülecek olan betona karışmayacak şekilde uzaklaştırılması önemlidir.

Korozyona uğramış olan betonarme çeliklerinin fosforik asit içerikli pas sökücü kimyasal madde ile temizlenmesi sonucu, fiziksel ve mekanik özellikleri bakımından ilgili standartlara göre gerekli asgari koşulları sağlayıp sağlamadığı incelenmiştir. Bu amaçla 6 adet B500C çelik sınıfı numune, paslı ve pas sökücü ile temizlenmiş hali üzerinde çap ölçümleri yapılarak kesit ve kütle kaybı değerleri TS 708 ve TS6892-1 standartlarında verilen fiziksel sınır değerlerle karşılaştırılmıştır. Çeliğe ait karakteristik özelliklerin belirlenmesi amacıyla bu numunelere çekme testi yapılmış ve yine aynı standart hükümlerine göre akma ve çekme değerleri belirlenmiştir.

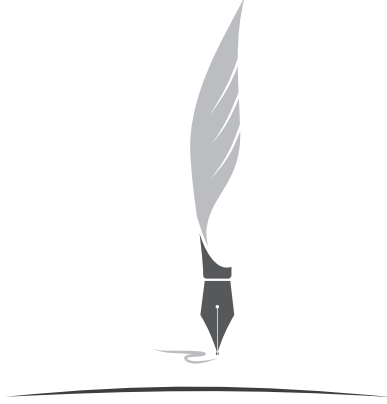
Yapılan çalışmalar sonucunda ilgili standartlar göz önüne alındığında fosforik asit içerikli pas sökücü kimyasal madde ile temizlenmiş olan çelik

numunelerde oluşan aşınma ve kesit kaybının ihmal edilebilecek sınırlar içerisinde kaldığı görülmüştür. Yine aynı şekilde B500C çeliğinin fosforik asit içerikli pas sökücü kimyasal madde ile temizlenmesi sonrası çekme testine tabi tutulması sonucu elde edilen çeliğe ait karakteristik değerlerin ilgili standart sınır şartlarını sağladığı görülmüştür.

Çalışmalardan elde edilen sonuçların standart sınır şartlarını sağlama-
sına rağmen, çelik yüzeylerinde meydana gelen korozyonun, pas sökücü kul-
lanılarak temizlenmesinde uygulamanın süresine, koşullarına ve uygulama
sonrası temizliğine uyulması önemlidir. Aksi halde pas sökücünün uzun süre
çeliğe uygulanması ve sonrasında da su ile yıkanarak temizlenmemesi duru-
munda bu çalışmanın ötesinde şartlara maruz bırakacağından beklenmeyen
sonuçların ortaya çıkmasına sebep olabilir.

Referanslar

1. Guerra-Contreras, A., Villegas, A., Ramírez-Oliva, E., & Cervantes, J. (2017). Evaluation of a rapid and long-effective pickling method for iron rust removal on metallic surfaces using carboxylic acid-based polymers. *Silicon*, 9, 525–533. (<https://doi.org/10.1007/s12633-015-9286-7>).
2. Zheludkevich, M., Serra, R., Montemor, M., Yasakau, K., Salvado, I. M., & Ferreira, M. (2005). Nanostructured sol–gel coatings doped with cerium nitrate as pre-treatments for AA2024-T3: corrosion protection performance. *Electrochimica Acta*, 51(2), 208–217. (<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2005.03.081>).
3. Thukkaram, M., Cools, P., Nikiforov, A., Rigole, P., Coenye, T., Van Der Voort, P., et al. (2019). Antibacterial activity of a porous silver-doped TiO₂ coating on titanium substrates synthesized by plasma electrolytic oxidation. *Applied Surface Science*, 144235. (<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.144235>).
4. Hashim, N. Z. N., Kassim, K., Zaki, H. M., Alharthi, A. I., & Embong, Z. (2019). XPS and DFT investigations of corrosion inhibition of substituted benzylidene Schiff bases on mild steel in hydrochloric acid. *Applied Surface Science*, 476, 861–877. (<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.01.149>).
5. Dey, R. E., Zhong, X., Youle, P. J., Wang, Q. G., Wimpenny, I., Downes, S., Hoyland, J. A., Watts, D. C., Gough, J. E., & Budd, P. M. (2016). Synthesis and Characterization of Poly(vinylphosphonic acid-co-acrylic acid) Copolymers for Application in Bone Tissue Scaffolds. *Macromolecules*, 49, 2656–2662. (<https://doi.org/10.1021/acs.macromol.5b02594>).
6. Niu, Z., Lu, X., & Luo, Y. (2023). The Effects of a Multifunctional Rust Inhibitor on the Rust Resistance Mechanism of Carbon Steel and the Properties of Concrete. *Coatings*, 13(8), 1375. (<https://doi.org/10.3390/coatings13081375>).
7. He, B., Wang, S., Wang, G., & Yuan, X. (2021). Ecofriendly Ultrasonic Rust Removal: An Empirical Optimization Based on Response Surface Methodology. *Coatings*, 11(9), 1127. (<https://doi.org/10.3390/coatings11091127>).



Bölüm 5

FARKLI BETON DAYANIM SINIFININ BETONARME KİRİŞ DAVRANIŞINA ETKİSİNİN SAYISAL OLARAK ARAŞTIRILMASI

Muhammed ÖZTEMEL¹

Halit Erdem ÇOLAKOĞLU²

1 Öğr. Gör, Giresun Üniversitesi, Keşap Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Giresun, muhammed.oztemel@giresun.edu.tr, 0000-0002-6530-0739

2 Öğr. Gör. Dr, Giresun Üniversitesi, Keşap Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Giresun, erdem.colakoglu@giresun.edu.tr, 0000-0002-4498-3569

1.GİRİŞ

Betonarme kiriş, yapıdaki diğer elemanlardan gelen dikey ve yatay yükleri alarak bunları kolonlara aktaran, yapısal dengeyi sağlayan ve eğilme ile kesme kuvvetlerine karşı direnç gösteren önemli bir yapı elemanıdır. Bu nedenle, kirişlerin kapasite değerlerini etkileyen parametrelerin açıkça belirlenmesi önemlidir. Betonarme yapı stoğumuzun önemli bir kısmında, betonun basınç dayanımının proje öngörülerinden aşağıda olması gibi temel sorunlar sık sık karşımıza çıkmaktadır. Bu durumun en yaygın nedenlerinden biri, yönetmeliklerde belirtilen sınır değerlere uygun olmayan beton kalitesidir. Bu durum, yapıların güvenliği ve dayanıklılığı üzerinde ciddi riskler oluşturur. Kiriş elemanlarının tasarımı ve inşasında yönetmeliklere tam uyum sağlanması, yapıların genel performansını artırmak ve olası doğal afetlere karşı dayanıklılığını güçlendirmek için hayati önem taşır. Bu bağlamda, kirişlerin doğru şekilde tasarlanması, kaliteli malzeme kullanımı ve uygun inşaat teknikleri ile yapıların uzun ömürlü ve güvenli olması sağlanabilir. Geleneksel betonun gevrekliği, dinamik yükler altında enerji yutma kapasitesinin zayıf olmasına yol açar. Bu gevrek davranışı iyileştirip sünek bir malzemeye dönüştürmek amacıyla çeşitli çalışmalar sürdürülmektedir (Demirtaş,2019).

Taşıyıcı sistem elemanlarının kapasitesi, bir binanın deprem yüklerine karşı dayanma kapasitesini belirleyen temel faktördür. Doğru bir şekilde yapılan kapasite hesapları, taşıyıcı sistem elemanlarının belirlenmesinde kritik bir rol oynar. Kapasiteyi doğru bir şekilde belirlemek için, kesit boyutları, beton dayanımı, donatı dayanımı ve donatı alanı gibi faktörlerin doğru bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. (Esen vd., 2022). Betonarme yapı elemanlarının davranışı, malzeme türü, kesitin geometrisi ve üzerine gelen yüklemeler gibi etkenlere dayanmaktadır (Yüksel vd., 2020). Betonarme kiriş elemanlarının uygulanan yükler altındaki doğrusal ve doğrusal olmayan davranışlarını güvenilir bir şekilde belirlemek amacıyla, laboratuvar ortamında deneysel çalışmalar yapılmalı ve sonuçlar nümerik analiz yöntemleriyle teyit edilmelidir. Deneysel çalışmalara alternatif olarak ortaya çıkan sonlu eleman metodu, son zamanlarda hızla

gelişmiş ve büyük kitleler tarafından kullanılmaya başlanmıştır (Moaveni, 1999).

Bilindiği üzere, beton ülkemizde ve dünya genelinde yapıların temel malzemelerinden biridir. Betonun etkisi ve kullanımı betonarme yapı elemanlarında son derece hayati bir öneme sahiptir. Bu nedenle bu çalışmada farklı beton basınç dayanımının betonarme kirişlerin eğilme altındaki davranışı üzerindeki etkilerinin nümerik olarak araştırılması hedeflenmektedir.

2. Materyal ve Yöntem

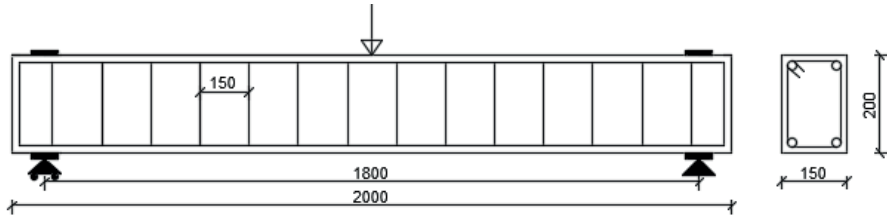
Bu çalışmada betonarme kiriş elemanların davranışı üzerinde beton basınç dayanımının etkisi araştırılmıştır. Bu çalışma kapsamında, kirişlerin sonlu elemanlar programı aracılığıyla modellenmesiyle elde edilen nümerik modelin davranışının doğru bir biçimde temsil edilip edilmediği kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Analizler, beton için BHP modeli ve donatı için klasik metal plastisite modeli kullanılarak, ABAQUS sonlu elemanlar programı ile yapılmıştır.

3. Malzemeler

Betonarme kiriş modellerinde C25/30 ve 30/37 olmak üzere iki farklı beton sınıfı tercih edilmiştir. Çalışma kapsamında kiriş geometrik ölçüleri 150 mm×200 mm kesit boyutuna ve 2000 mm uzunluğunda belirlenmiştir. Kirişlerde 8mm çapında 150mm aralığında çelik etriye tercih edilmiştir. Betonarme kirişlerde boyuna donatıda basınç bölgesinde 2 adet çekme bölgesinde ise 3 adet 12 mm çelik donatı kullanılmıştır. Betonarme kirişlerde kullanılan $\Phi 8$ 'lik etriye donatısının ve $\Phi 10$ 'luk boyuna donatının sırasıyla akma dayanımı 420 MPa ve çekme dayanımı 550 MPa olarak kabul edilmiştir.

4. Betonarme Kiriş Geometrik Ölçüleri

Betonarme kirişler, 150x200 mm kesit ölçülerinde ve 2000 mm uzunluğunda modellenmiştir. Kirişlerin alt ve üst kesitlerinde 2 ϕ 10 boyuna donatı ve kiriş boyunca ϕ 8/150 etriyeler mevcuttur.



Şekil 1. Betonarme kirişin geometrik ölçüleri

5. Betonarme Kirişe Ait Sonlu Eleman Çalışmaları

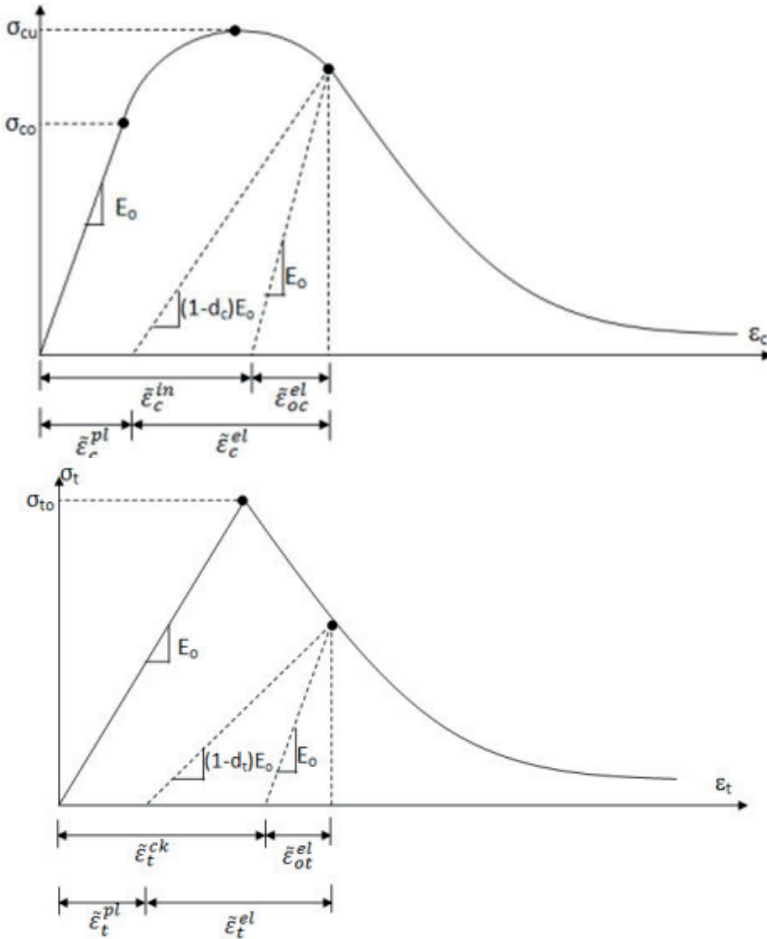
Sonlu elemanlar yöntemiyle elde edilen etkili bir çözüm elde etmek için, malzeme modellerinin doğru bir şekilde tanımlanması ve gerçeğe yakın olması kritik öneme sahiptir. Mühendislikte kritik bir rol oynayan Sonlu Elemanlar Metodu, genellikle karmaşık veya analitik olarak çözülemeyen problemlerin etkin bir şekilde çözümü için tercih edilen bir sayısal yaklaşımdır. Sayısal çalışmaların gerçekleştirilmesinde farklı paket programların kullanımı literatürde oldukça yaygındır. (Barbosa ve Riberio, 1998) Abaqus, hem doğrusal hem de doğrusal olmayan problemlerin geniş kapsamda çözümünde kullanılan bilgisayar programlarından biridir. Bu araştırma kapsamında, ABAQUS (2022) sonlu eleman programı kullanılarak nümerik analizler gerçekleştirilmiştir.

6. Beton Hasar Plastisite

Beton Hasar Plastisite (BHP) yöntemi, betonun sürekli plastisite temelli bir hasar modelidir. BHP yöntemine göre, betonda iki temel yenilme mekanizması vardır. Bu iki temel yenilme mekanizması çekme

çatlama ve basınç kırılmasıdır. Elastik rijitlikteki değişimi ve hasar oluşumunu açıklamak için kullanılan iki birim şekil değiştirme değişkeni ($\tilde{\epsilon}_t^{pl}$ ve $\tilde{\epsilon}_c^{pl}$) şeklinde isimlendirilir. Bu değişkenler, çekme ve basınç altında meydana gelen eşdeğer plastik gerilmeleri ifade eder. Mekanik davranışlarıyla ilgili temel varsayımlar, beton üzerinde tartışılmaktadır. ABAQUS/Standart Kullanıcı Kılavuzu'ndan alınan BHP, betonun tek eksenli basınç ve çekme altında gösterdiği gerilme-şekil değiştirme davranışı Şekil 2 ve Şekil 3'te olduğu gibi belirtilmektedir.

Şekil 2. Basınç altında beton davranışı (Hibbitt ve ark., 2013)

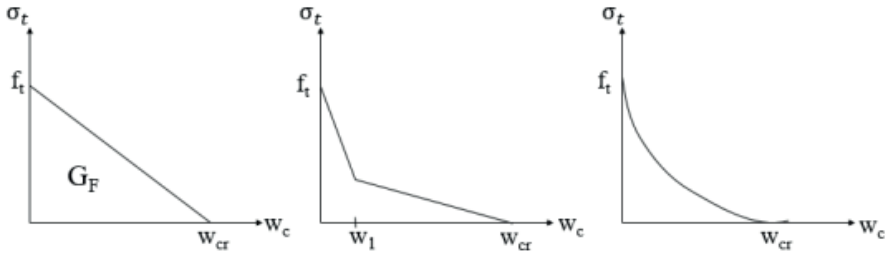


Şekil 3. Çekme altında beton davranışı (Hibbitt ve ark., 2013)

Şekil 2 ve Şekil 3’de verilen grafiklerde E_0 başlangıç elastisite modülünü, $\epsilon_c^{\sim pl}$ basınç plastik şekil değiştirmesini, $\epsilon_t^{\sim pl}$ çekme plastik şekil değiştirmesini, $\epsilon_c^{\sim in}$ basınç inelastik şekil değişimini, $\epsilon_t^{\sim ck}$ çatlama birim şekil değişimi olarak tanımlanmaktadır.

6.1. Çekme rijitliği (Tension Stiffening) tanımlaması

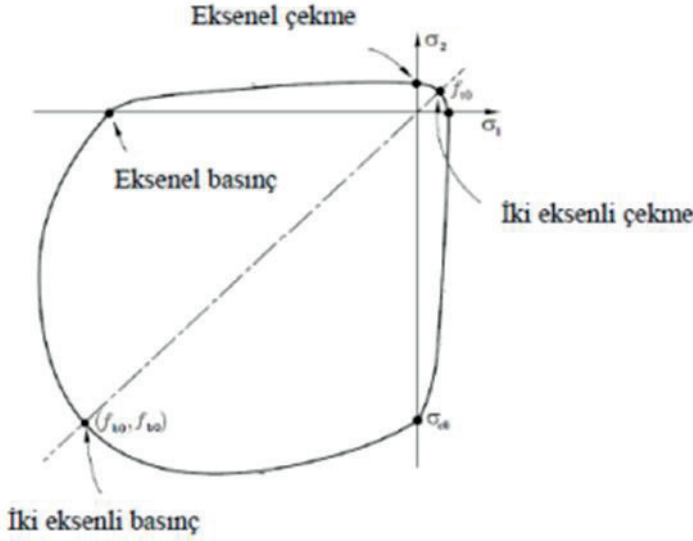
Beton, tek eksenli çekme altında çatladığında, elastik sınırın ötesindeki davranış, beton ve donatı arasındaki gerilme transferini simüle eden ve 'çekme yumuşaması' olarak bilinen 'çekme rijitliği' davranışıyla açıklanır. Betonun çekme gerilmesi altında gösterdiği davranış, gerilme-çatlak genişliği veya gerilme- birim deformasyonu olarak tanımlanabilir. Kırılma enerjisi gerilme-çatlak genişliği eğrisinin altında kalan alan ile belirlenir. Çekme dayanımı-çatlak genişliği eğrisini belirlemek amacıyla literatürde üç farklı model önerilmiştir (Şekil 4). Lineer çekme rijitliği modeli, bu davranışı tanımlamanın en basit yoludur.



Şekil 4. Çekme rijitliğine ait modeller (Earij ve ark., 2017)

6.2. Akma fonksiyonu (Yield function)

Betonda görülebilecek çeşitli gerilme kombinasyonlarının elastik sınırları, bir akma yüzeyi aracılığıyla tanımlanır. Düzlem gerilme altında akma yüzeyi zarfı, BHP modelinde Şekil 5'te yer almaktadır.



Şekil 5. Betonun iki eksenli gerilme-güç tükenme zarfı modeli (Sümer, 2010).

6.3. Viskoplastik düzenleme

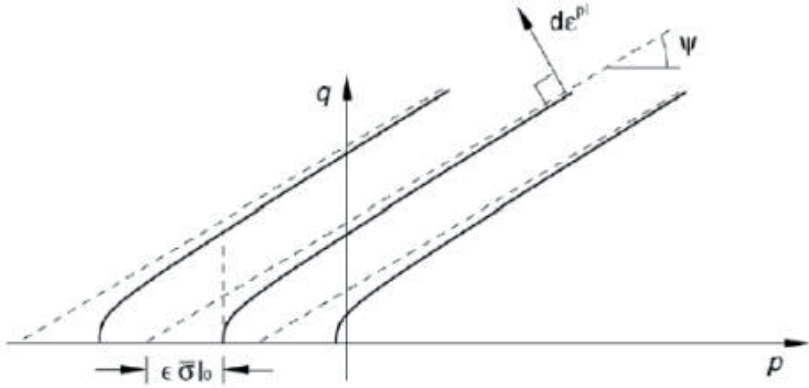
Malzeme modellerinde gerilme ve rijitlik kaybı yaşandığında, analizlerde sıkça yakınsama sorunları meydana gelebilir. ABAQUS, temel denklemlerde viskoplastisite tanımlanmasına olanak sağlayarak bunun üstesinden gelmeyi sağlamıştır (Sümer, 2010). Çalışmada bu parametre 0,001 olarak uygulanmıştır.

6.4. Plastik Akma

Akma potansiyelini belirleyen Drucker-Prager hiperbolik fonksiyonu, BHP modelinde plastik şekil değiştirme ve gerilme arasındaki ilişkiyi tanımlar. Aşağıda verilen denklemde ϵ : Akma yüzeyi eksantrisitesi ψ : p - q düzleminde ölçülen dilasyon açısı $\bar{q}$: Eşdeğer mises etkili gerilmesi

σ_{t0} : Maksimum çekme gerilmesi $\bar{p}$: Hidrostatik basınç gerilmesi olarak tanımlanmaktadır (Sümer, 2010).

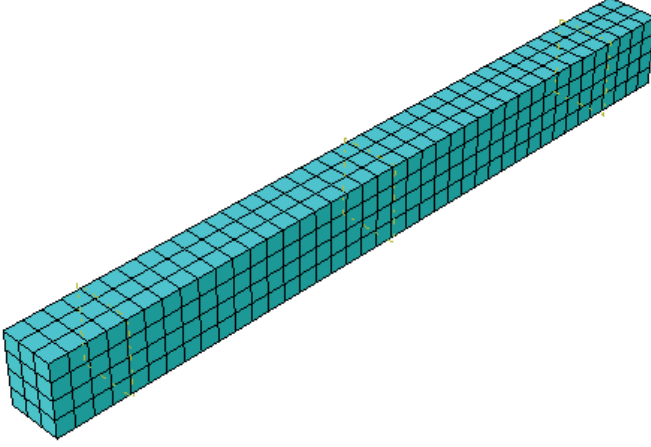
$$G = \sqrt{(\epsilon \cdot \sigma_{t0} \tan \psi)^2 + \bar{q}^2} - \bar{p} \cdot \tan \psi \quad (1)$$



Şekil 6. Drucker-Prager modelindeki hiperbolik fonksiyon (Sümer, 2010)

7. Betonarme Kirişin Sonlu Eleman Modeli

Sonlu eleman programında, beton 3 boyutlu katı eleman olarak (solid) modellemiştir, donatı elemanlar ise (truss) şeklinde modelleme yapılmıştır. Beton, C3D8R tipinde 8-düğümlü ve azaltılmış integrasyonlu lineer sonlu elemanlar şeklinde modellenirken, donatı çubukları T3D2 tipinde 2-düğümlü ve 3 boyutlu lineer doğrusal sonlu eleman parçaları olarak sistemde modellenmiştir. Çalışmada daha doğru sonuçlar elde edebilmek adına mesh ağı 50 mm olarak belirlenmiştir.

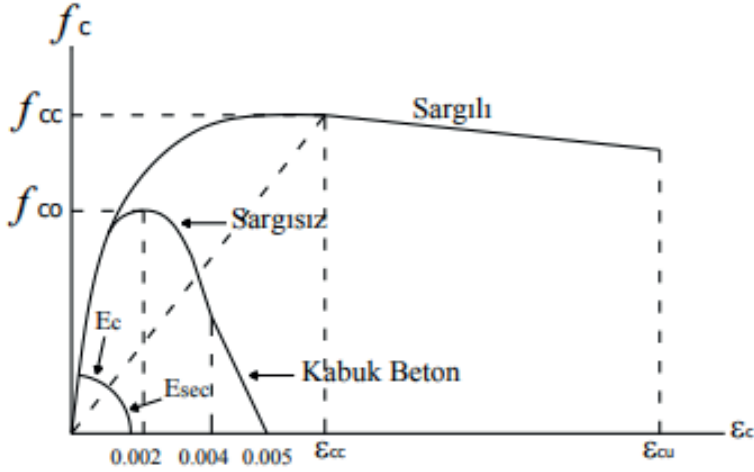


Şekil 7. Betonarme Kirişin Sonlu Eleman Modeli

8. Beton ve Çelik Malzeme Modelleri

8.1. Beton Basınç Modeli

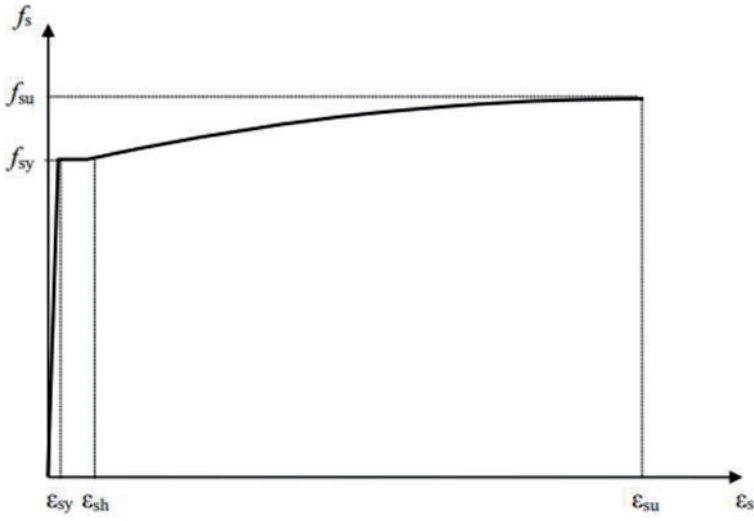
Bu çalışmada Sonlu eleman modelinde gerekli hesaplamalar yapılarak sargısız betonlar için geliştirilmiş Mander beton modeli kullanılmıştır (Mander, 1988). Basınç dayanımına kıyasla, betonun çekme dayanımı oldukça düşüktür. Bu sebeple, taşıma kapasitesi hesaplarında betonun çekme dayanımı genellikle göz ardı edilen bir faktördür (Ersoy ve Özcebe, 1998). Bu çalışmada çekme dayanımı dikkate alınmamıştır.



Şekil 8. Sargısız ve sargılı beton için Mander tarafından önerilen model
(Mander, 1988)

8.2.Çelik Malzeme Modeli

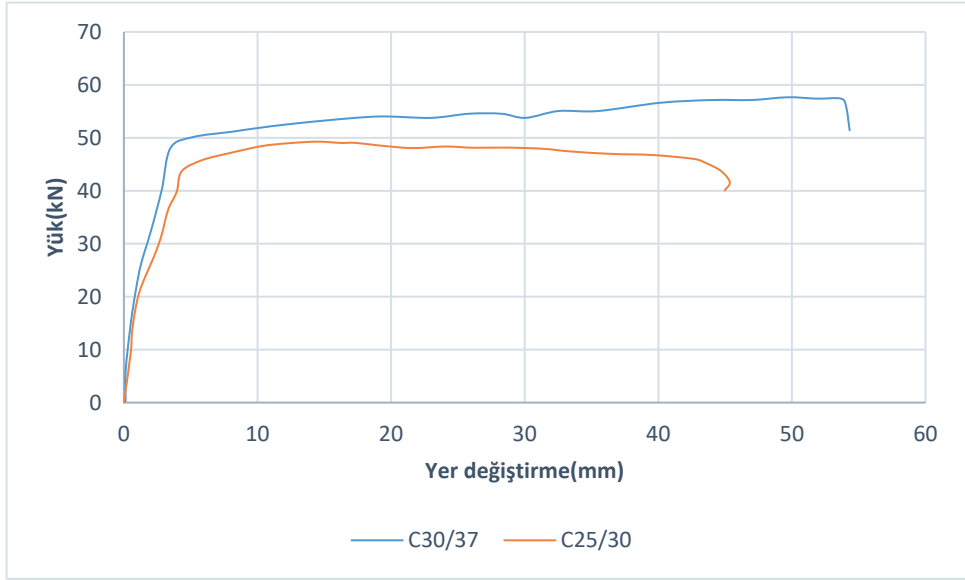
Homojen ve izotropik bir malzeme olarak çelik, betona göre daha kolay ve doğru şekilde tanımlanabilir. Başlangıçta doğrusal elastik olan çelik donatının gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, bu bölgede yük kaldırıldığında deformasyonların geri dönmesiyle karakterizedir. Yönetmelikte belirtilen çeliğin gerilme-birim deformasyon eğrisinde, çekme dayanımına erişildiğinde çeliğin maksimum deformasyonu gerçekleştirdiği kabul edilir. Akma noktasını takiben bir akma plakası oluşur ve bu plakayı sertleşme bölgesi izler. Ancak, araştırmacılar bu karmaşık davranışı modelleme süreçlerinde idealize etmektedirler. Bu araştırmada, lineer elastik-tam plastik davranış, yani bilinear izotropik sertleşme plastisite modeli benimsenmiştir.



Şekil 9. Donatı Çeliğinin Modellenmesinde Kullanılan Malzeme Modeli
(TBDY 2018)

9.Bulgular ve Tartışma

Aşağıda verilen grafiğe göre, C25/30 MPa beton dayanımına sahip numunelerin düşük yük taşıma kapasitesine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Benzer şekilde C30/37 Mpa beton dayanımına sahip betonarme kirişte daha yüksek rijitlik ve daha yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olduğu görülebilir. Beton dayanımının artmasıyla birlikte, betonarme kirişin yük taşıma kapasitesi, sünekliği, enerji tüketme kapasitesinin arttığı görülmektedir.



Şekil 10. Farklı beton sınıfına sahip betonarme kirişte yük yer yer değiştirme grafiği

10.Sonuçlar

Bu çalışmada, ABAQUS programı kullanılarak dikdörtgen kesitli doğrusal olmayan sonlu eleman analizi, bir betonarme kiriş üzerinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar çalışma kapsamında bu bölümde verilmiştir. Beton dayanımının artması, betonarme kirişin yük taşıma kapasitesi, süneklik, enerji tüketme kapasitesi sonuçlarını genel olarak iyileştirir. Yükselen beton sınıfıyla birlikte, kirişlerin eğilme kapasiteside ve yerdeğiştirme sünekliğinde iyileşme daha belirgin hale gelmiştir. Sonuç olarak betonarme kirişlerin yük taşıma kapasitesi, süneklik ve genel performansı üzerinde betonun basınç dayanımının belirleyici bir rol oynadığı, bu dayanımın kirişin eğilme dayanıklılığına ve deformasyon yeteneğine doğrudan etki ederek yapının güvenliği ve servis ömrü açısından kritik öneme sahip olduğu ortaya çıkmıştır.

KAYNAKÇA

ABAQUS/Standart User's Manual, Version 2022

Barbosa, A.F., Riberio, G.O., (1998). Analysis of reinforced concrete structures using ANSYS nonlinear concrete model, Computational Mechanics New Trends and Application, S. Idelsohn, E. Onate, and E. Dvorlin (editors), CIMNE, Barcelona, Spain.

Demirtaş, G. (2019). *Çarpma etkisindeki ultra yüksek performanslı lifli betonarme kirişlerin sonlu elemanlar analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü.

Esen, B., Gündoğay, A., Yaman, S., Tekeli Kabaş, H., vd. (2022). Betonarme Kirişlerin Davranışını Etkileyen Parametrelerin Deneysel İncelenmesi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 27(3), 1043-1060.

Earij, A., Alfano, G., Cashell, K., & Zhou, X. (2017). Nonlinear three-dimensional finite element modelling of reinforced-concrete beams: Computational challenges and experimental validation. Engineering Failure Analysis, 82, 92-115.

Ersoy, U., & Özcebe, G. (2018). Betonarme, Orta Doğu Teknik Üniversitesi.

Hibbitt, H. D., Karlsson, B. I., & Sorensen, E. P. (2013). ABAQUS user's manual. Providence, RI: Dassault Systemes Simulia Corp.

Moaveni, S. (1999). Finite Element Analysis, Theory and Applications with ANSYS, Bill Stenquist, Prentice Hall Inc., New Jersey.

Mander, J. B., Priestley, M. J. N., Park, R. (1988) Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete. Journal of Structural Engineering, 114(8), pp. 1804-1826

Sümer, Y. (2010). FRP elemanlarla güçlendirilmiş hasarlı betonarme kirişlerin doğrusal olmayan sonlu elemanlar yöntemiyle analizi (*Doktora tezi*). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Bölümü.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. (2018).

Yüksel, S., Jamal, R., & Foroughi, S. (2020). Kirişlerde basınç donatısı oranının moment-eğrilik ilişkisine etkisi. Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(1), 1-17.