



T.C.
KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**DOLGU DUVARLARIN İNŞASINDA VE
GÜÇLENDİRİLMESİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR
ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT BETONUN
(ECC) KULLANIMININ ANALİTİK OLARAK
İNCELENMESİ**

ERKAM KÖSEÖMÜR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KIRŞEHİR

2025



T.C.
KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI



**DOLGU DUVARLARIN İNŞASINDA VE
GÜÇLENDİRİLMESİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR
ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT BETONUN
(ECC) KULLANIMININ ANALİTİK OLARAK
İNCELENMESİ**

ERKAM KÖSEÖMÜR

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN

Dr. Öğr. Üyesi Furkan BİRDAL

II. DANIŞMAN

Doç. Dr. Hasan DİLBAS

KIRŞEHİR

2025

KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI
ETİK BEYANI

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesini okuduğumu ve anladığımı ve Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde ve ortaya çıkan sonuçlarda herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Tez olarak sunduğum bu çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda bu konuda hakkımda yapılacak tüm yasal işlemleri ve aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

08/08/2025

Erkam KÖSEÖMÜR

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa No

İÇİNDEKİLER DİZİNİ	I
TEŞEKKÜR.....	III
ÖZET.....	IV
ABSTRACT	V
ŞEKİLLER DİZİNİ	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	X
1. GİRİŞ	1
1.1. Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozit Beton (ECC)	5
1.2. ECC Betonun Yapısal Sistemlerde Kullanımı.....	8
1.3. Dolgu Duvarların Yapısal Sistemlerde Önemi	10
1.3.1. Dolgu duvarların yapı davranışına olumsuz etkileri	13
1.3.2. Dolgu duvarlarda oluşabilecek hasarlar ve göçme biçimleri	15
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	21
2.1. ECC Beton ve Yapısal Tasarımda Kullanımı	21
3. MATERYAL VE METOT.....	29
3.1. Kullanılan Malzemeler	29
3.1.1. Çimento	30
3.1.2. Pomza	31
3.1.3. Mermer atığı.....	32
3.1.4. Beton atığı	33
3.1.5. Polipropilen lif	35
3.1.6. Süper akışkanlaştırıcı	35
3.2. Malzeme Çalışmaları Yöntemi	36
3.2.1. ECC üretimi, kürleme ve testleri	39
3.2.2. Malzeme deney sonuçları	42
3.3. Analitik Çalışmalar Yöntemi	66
3.3.1. Kiriş eğilme deneyleri analitik modeli	66
3.3.2. Dolgu duvarlı betonarme çerçeve analiz modeli	80
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	91
4.1. Sürdürülebilir ECC Karışım Optimizasyonu ve Efektif Karışım Oranları.....	91
4.2. Kürleme Koşullarının ve Deney Numunesi Boyutlarının Sonuçlara Etkisi	97
4.3. ECC ile Geleneksel Betonun Mekanik Açından Farklılıkları	98

4.4. ECC Malzemesinin Analitik Olarak Modellenmesi ve Eğilme Davranışı	101
4.5. Dolgu Duvarların İnşasında ECC Birim Kargir Eleman Kullanımı	105
4.6. Dolgu Duvarların Güçlendirilmesinde ECC Etkisi ve Kalınlık Optimizasyonu	106
4.7. Sürdürülebilir Yapı İnşasında ECC'nin Rolü	107
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	109
5.1. Sürdürülebilir ECC Karışımı	109
5.2. Sürdürülebilir ECC Mekanik, Fiziksel Özellikleri ve Teorik Modeli	111
5.3. Sürdürülebilir ECC'nin Dolgu Duvarların İnşası veya Güçlendirilmesinde Kullanımı	112
KAYNAKLAR.....	115
EKLER.....	125
EK-1 Kongre Kabul Mektubu	125
EK-2 Kongre Katılım Belgesi.....	127
ÖZGEÇMİŞ	129

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans ders sürecinde kendisini tanıdığım günden bu yana gösterdiği sabır ve sabırlı hali ile her zaman bana örnek olmasının yanı sıra bir bilim insanının nasıl çalışması gerektiğini kendisinden öğrendiğim değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Furkan BİRDAL'a ve ikinci danışmanım Doç. Dr. Hasan DİLBAS'a büyük bir içtenlikle teşekkür ederim.

Hayatımın her anında varlıklarıyla yanımda olan ve en büyük destekçilerim olan aileme bana verdikleri güven, sevgi ve sabır için minnettarım. Tezimi, özellikle manevi desteğiyle her zorluğun üstesinden gelmeme yardımcı olan sevgili eşim Zülal Erva Biçer Köseömür'e ithaf ediyorum.

Ağustos, 2025

Erkam KÖSEÖMÜR

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DOLGU DUVARLARIN İNŞASINDA VE GÜÇLENDİRİLMESİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİR ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT BETONUN (ECC) KULLANIMININ ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ

Erkam KÖSEÖMÜR

KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Furkan BİRDAL
İkinci Danışman: Doç. Dr. Hasan DİLBAS
Yıl: 2025, Sayfa:129
Jüri: Prof. Dr. Mehmet Mustafa ÖNAL
Doç. Dr. Oğuzhan ŞAHİN
Dr. Öğr. Üyesi Bilal ÖZASLAN

Beton, çimento, su ve agreganın belirli oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen temel bir yapı malzemesidir. Bilimsel araştırmalar sonucunda çevreci ve sürdürülebilir beton türleri geliştirilebilmektedir. Çimento esaslı kompozit beton (Engineered Cementitious Composite-ECC), yüksek süneklik ve çatlak kontrolü sağlayan yenilikçi bir beton türü olarak bu kapsamda öne çıkmaktadır. Yapısal performans açısından ECC, özellikle yüksek dayanım ve uzun ömürlü kullanım avantajları sunmaktadır. Tez çalışmasında, yeni dolgu duvarların tasarımında yatay kapasitenin ve enerji sönümlenmenin artırılması, mevcut dolgu duvarların ise pratik bir şekilde güçlendirilmesine yönelik ECC malzemesinin kullanımı araştırılmıştır. Yapısal sistemlerde dolgu duvarların taşıyıcılık özelliği genellikle göz ardı edilmekte ve yalnızca düşey yük olarak hesaplara dahil edilmektedir. Ancak bilimsel araştırmalar ve saha gözlemleri dolgu duvarların yatay yükler açısından yapısal sistemde önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Çalışma kapsamında öncelikle sürdürülebilir ECC üzerine detaylı bir literatür araştırması yapılmış, tasarıma yönelik karışım içerikleri belirlenmiştir. Sürdürülebilir bir ECC karışımı için basınç ve eğilme testleri sonucunda mekanik özellikler açısından maksimum değere sahip, birim hacim ağırlığı optimum olan karışım analitik çalışmalara esas olarak seçilmiştir. Analitik çalışmalar kapsamında, mekanik ve fiziksel özellikleri belirlenen sürdürülebilir ECC kullanılarak SAP2000 yazılımı ile çerçeve analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizlerde, yeni inşa edilecek dolgu duvarlarda ECC'den üretilmiş birim eleman kullanımı ve mevcut dolgu duvarlarda ECC ile güçlendirmenin etkisi statik itme analizi ile incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çimento esaslı kompozit (ECC), Sürdürülebilirlik, Karışım içeriği, Optimizasyon, Mekanik özellikler, Dolgu duvarlar, Güçlendirme, Enerji sönümleme kapasitesi, Yapısal analiz

ABSTRACT

MASTER’S THESIS

ANALYTICAL INVESTIGATION OF THE USE OF SUSTAINABLE ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITE (ECC) IN THE CONSTRUCTION AND REINFORCEMENT OF FILLED WALLS

Erkam KÖSEÖMÜR

**KIRŞEHİR AHI EVRAN UNIVERSITY
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING**

Supervisor:

Co-Supervisor:

Jury members:

Asst. Prof. Dr. Furkan BİRDAL

Assoc. Prof. Dr. Hasan DİLBAS

Year: 2025, Pages:129

Prof. Dr. Mehmet Mustafa ÖNAL

Assoc. Prof. Dr. Oğuzhan ŞAHİN

Asst. Prof. Dr. Bilal ÖZASLAN

Concrete is a fundamental construction material obtained by mixing cement, water, and aggregate in specific proportions. Through scientific research, environmentally friendly and sustainable types of concrete can be developed. One such innovative material is Engineered Cementitious Composite (ECC), which stands out for its high ductility and crack control capabilities. In terms of structural performance, ECC offers significant advantages, particularly in terms of high strength and long-term durability. The thesis investigates the use of ECC material to enhance the lateral load capacity and energy dissipation in the design of new infill walls, as well as to provide a practical method for strengthening existing infill walls. In structural systems, the load-bearing capacity of infill walls is often neglected and considered only as vertical load in calculations. However, scientific studies and field observations have demonstrated that infill walls play a significant role in resisting lateral loads within structural systems. As part of this study, a comprehensive literature review on sustainable ECC was conducted, and mix designs were developed accordingly. Based on compressive and flexural tests, the ECC mixture with the highest mechanical performance and optimal unit weight was selected for analytical studies. Using the mechanical and physical properties of the sustainable ECC, frame analyses were performed with SAP2000 software. In the analyses, the use of ECC-produced unit elements in newly constructed infill walls and the effect of ECC retrofitting on existing infill walls were examined using pushover analysis.

Keywords: Engineered cementitious composite (ECC), Sustainability, Mix design, optimization, Mechanical properties, Infill walls, Retrofitting, Energy consumption capacity, Structural analysis

TABLolar DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 3. 1. CEM I 42.5 R çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri.	30
Tablo 3. 2. Pomzanın kimyasal ve fiziksel özellikleri.	32
Tablo 3. 3. Mermer atığının kimyasal ve fiziksel özellikleri.	33
Tablo 3. 4. Beton atığının kimyasal ve fiziksel özellikleri.	34
Tablo 3. 5. Polipropilen lifin kimyasal ve fiziksel özellikleri.	35
Tablo 3. 6. Süper akışkanlaştırıcının kimyasal ve fiziksel özellikleri.	36
Tablo 3. 7. Box–Behnken tabanlı ECC karışım tasarımı (birimler kg/m ³ cinsindendir).	38
Tablo 3. 8. ECC bileşenlerinin miktar aralıkları.	43
Tablo 3. 9. ECC test sonuçları.	44
Tablo 3. 10. ECC numunelerin en iyi serileri.	61
Tablo 3. 11. Betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının etkin kesit rijitliği çarpanları.	70
Tablo 3. 12. 100 adımda uygulanan kiriş analitik modeli.	74
Tablo 3. 13. Tuğla dolgu duvar için eşdeğer basınç çubuğu parametreleri.	83
Tablo 3. 14. 130 mm kalınlıklı ECC birim eleman parametreleri.	85
Tablo 3. 15. 20 mm kalınlıklı ECC eş değer basınç çubuğu parametreleri.	88
Tablo 3. 16. 40 mm kalınlıklı ECC eş değer basınç çubuğu parametreleri.	89
Tablo 3. 17. 80 mm kalınlıklı ECC eş değer basınç çubuğu parametreleri.	89
Tablo 3. 18. 100 mm kalınlıklı ECC eş değer basınç çubuğu parametreleri.	89
Tablo 4. 1. Optimum değerde seçilmiş numunelerin basınç, eğilme dayanımları ve birim hacim ağırlıkları	986
Tablo 4. 2. Numune boyutları ve kütleme koşullarının dayanıma etkisi.	98

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. 1. Lifli beton (ECC) ile geleneksel beton arasındaki farkı gösteren gerilme-şekil değiştirme eğrisi.....	5
Şekil 1. 2. Beton matrisi içerisindeki lifin köprüleme yaparak çatlak kontrolü sağlaması	6
Şekil 1. 3. ECC betonun su kanallarında uygulama şekli.	9
Şekil 1. 4. ECC kirişlerin Glorio-Tower Roppongi binasında kullanımı.....	9
Şekil 1. 5. a) Yatay delikli dolgu tuğlası, b) Harman tuğlası, c) Briket-cüruf briket,.....	10
Şekil 1. 6. Dolgu duvarlı çerçevelerin yatay yük altındaki davranışı	11
Şekil 1. 7. Dolgu duvarlı çerçevenin yatay yükler altındaki davranışa etkisi.	12
Şekil 1. 8. Tekrarlı yük etkisinde sünekliklerin karşılaştırılması.....	13
Şekil 1. 9. Dolgu duvarlarda meydana gelen sıva çatlağı model çizimi.	16
Şekil 1. 10. Dolgu duvarlarda meydana gelen kayma göçmesi modeli	17
Şekil 1. 11. Dolgu duvarlarda meydana gelen ezilme göçmesi modeli.	17
Şekil 1. 12. Dolgu duvarlarda meydana gelen eğilme-çekme kırılması modeli	18
Şekil 1. 13. Dolgu duvarlarda düzlem dışı tek parça halinde göçme modeli.....	18
Şekil 3. 1. CEM I 42.5 R çimento.	31
Şekil 3. 2. a) İnce taneli pomza <0.063 mm, b) İri taneli pomza <2 mm.	31
Şekil 3. 3. Çeşitli boyutlarda mermer atıkları.	33
Şekil 3. 4. a) Beton atıkları, b) Öğütülmüş beton atığı	34
Şekil 3. 5. Polipropilen lif.	35
Şekil 3. 6. Süper akışkanlaştırıcı.	36
Şekil 3. 7. ECC karışım bileşenlerinin dağılımı.....	37
Şekil 3. 8. a) Beton atığı, b-c) Los Angeles cihazında beton atığının öğütülmesi d) Öğütülen beton atığının eleme cihazında istenilen boyutlarda elenmesi.	39
Şekil 3. 9. 40x40x160 mm numunelerin hazırlanması.....	40
Şekil 3. 10. 40x40x160 mm boyutlarında hazırlanmış 49 adet farklı numune.....	41
Şekil 3. 11. 40x40x160 mm boyutlarındaki kiriş numunesinin eğilme testleri sırasında laboratuvar ortamındaki uygulama görüntüsü.....	41
Şekil 3. 12. Silindir numunelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ve kiriş numunelerin yük-deformasyon davranışının test edilmesi.	42
Şekil 3. 13. Çimento- basınç dayanımı ilişkisi grafiği.	46
Şekil 3. 14. Pomza- basınç dayanımı ilişkisi grafiği.	47
Şekil 3. 15. Mermer atığı-basınç dayanımı ilişkisi grafiği.	47
Şekil 3. 16. Beton atığı- basınç dayanımı ilişkisi grafiği.	48
Şekil 3. 17. Fiber içeriği- basınç dayanımı ilişkisi grafiği.	49
Şekil 3. 18. Çimento- eğilme dayanımı ilişkisi grafiği.	51
Şekil 3. 19. Pomza- eğilme dayanımı ilişkisi grafiği	52
Şekil 3. 20. Mermer atığı-eğilme dayanımı ilişkisi grafiği.	53
Şekil 3. 21. Beton atığı-eğilme dayanımı ilişkisi grafiği.	54
Şekil 3. 22. Lif içeriği-eğilme dayanımı ilişkisi grafiği.	55
Şekil 3. 23. Çimento-birim hacim ağırlık ilişkisi grafiği.	56
Şekil 3. 24. Pomza-birim hacim ağırlık ilişkisi grafiği.	57
Şekil 3. 25. Mermer atığı -birim hacim ağırlık ilişkisi grafiği.	58
Şekil 3. 26. Beton atığı -birim hacim ağırlık ilişkisi grafiği.	59

Şekil 3. 27. Lif içeriği -birim hacim ağırlık ilişkisi grafiği.	59
Şekil 3. 28. 7 nolu ECC ve normal beton gerilme-şekil değiştirme eğrileri.	61
Şekil 3. 29. ECC ve geleneksel beton silindir numuneleri.	62
Şekil 3. 30. a)C25 normal beton silindir numune, b)Normal betonun basınç deneyi sonrası görüntüsü, c) ECC beton silindir numune, d) ECC betonun basınç deneyi sonrası görüntüsü.	63
Şekil 3. 31. a-b) Şahit kiriş kiriş eğilme deneyi, c-d) ECC kiriş eğilme deneyi.	64
Şekil 3. 32. Normal kiriş yük-deformasyon eğrisi.	65
Şekil 3. 33. ECC kiriş yük-deformasyon eğrisi.	65
Şekil 3. 34. 7 nolu karışımın ECC ve normal beton arasındaki gerilme- birim şekil değiştirme eğrisi	67
Şekil 3. 35. ECC kiriş ve normal kiriş yük- deformasyon eğrileri.	67
Şekil 3. 36. Kiriş numuneleri analitik modeli.	68
Şekil 3. 37. a) Normal beton deneysel, b) Normal beton analitik değerleri.	69
Şekil 3. 38. Zaman tanım alanı yük fonksiyonu.	69
Şekil 3. 41. Normal kiriş moment eğrilik kapasitesi.	72
Şekil 3. 43. Normal kiriş analitik ve deneysel sonuçları.	75
Şekil 3. 44. Kiriş orta noktası fiber mafsallık gerilme durumu.	75
Şekil 3. 45. ECC beton gerilme- şekil değiştirme eğrileri.	76
Şekil 3. 46. Moment- eğrilik diyagramı.	77
Şekil 3. 47. ECC deneysel + parametrik gerilme-şekil değiştirme eğrisi.	78
Şekil 3. 48. Kiriş orta noktası fiber sonuçları.	78
Şekil 3. 49. ECC kirişin deneysel ve analitik yönden yük-deformasyon eğrisi.	79
Şekil 3. 50. ECC ve Normal beton kiriş deneysel ve analitik kıyaslama.	79
Şekil 3. 51. Referans çerçeve modeli.	81
Şekil 3. 52. Referans çerçeve plastik mafsallık tanımı.	81
Şekil 3. 53. Referans çerçeve taban kesme kuvveti-yatay deplasman eğrisi.	82
Şekil 3. 54. Dolgu duvarsız çerçeve pushover analizi.	82
Şekil 3. 55. TBDY-2018 eşdeğer basınç çubuğu modelleme formülleri.	83
Şekil 3. 56. Dolgu duvarlı çerçeve modeli ve analizi.	84
Şekil 3. 57. Dolgu duvarsız ve tuğla duvarlı kapasite eğrisi karşılaştırılması.	84
Şekil 3. 58. Tuğla dolgu duvarlı çerçeve plastik mafsallık dağılımı.	85
Şekil 3. 59. ECC birim eleman gerilme-şekil değiştirme eğrisi ve kesit genişliği.	86
Şekil 3. 60. ECC birim elemandan oluşan çerçeve statik itme analizi.	86
Şekil 3. 61. Dolgu duvarsız çerçeve, tuğla duvarlı çerçeve ve ECC çerçeve kapasite karşılaştırması.	87
Şekil 3. 62. ECC dolgu duvarlı çerçeve plastik mafsallık dağılımı.	87
Şekil 3. 63. ECC kaplamalı tuğla duvar çerçeve analitik modeli.	88
Şekil 3. 64. ECC ile güçlendirmenin çerçeve kapasitesine etkisi.	89
Şekil 4. 1. Ön deneylerde ECC tasarımı.	92
Şekil 4. 2. ECC karışımında işlenebilirlik ve kalıba yerleştirme.	93
Şekil 4. 3. Yüksek akışkanlaştırıcı etkisi ve yüksek lif oranlı tasarım.	94
Şekil 4. 4. İşlenebilir ECC karışımı ve ECC'de mermerimsi yüzey.	94
Şekil 4. 5. Deney numuneleri eğilme ve basınç testleri.	95
Şekil 4. 6. ECC ve normal betonun gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.	99
Şekil 4. 7. Normal beton gerilme-şekil değiştirme grafiği.	99
Şekil 4. 8. ECC beton gerilme- şekil değiştirme grafiği.	100

Şekil 4. 9. ECC ve gelenksel beton silindir numune çatlak gelişimi.	100
Şekil 4. 10. 100x180x1200 mm ebatlarındaki kirişe uygulanan eğilme deneyi.	101
Şekil 4. 11. ECC ve normal kiriş deneysel kıyaslaması.....	102
Şekil 4. 12. Normal kirişte analitik ve deneysel kıyaslaması.....	103
Şekil 4. 13. ECC kirişin deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.	104
Şekil 4. 14. ECC deneysel ve parametrik malzeme modeli.	104
Şekil 4. 15. Dolgu duvarsız ve tuğla dolgu duvarlı çerçeve karşılaştırması.	105
Şekil 4. 16. Dolgu duvarsız, tuğla duvarlı ve ECC duvarlı çerçeve performansı.	106
Şekil 4. 17. Dolgu duvarsız, tuğla dolgu duvarlı ve güçlendirilmiş dolgu duvarlı çerçevelerin taban kesme kuvveti-yatay deplasman eğrileri.	106



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
E_c	: Çerçeve Betonun Elastisite Modülünü
E_d	: Dolgu Duvarın Elastisite Modülü
t_d	: Dolgu Duvarın Kalınlığı
r_d	: Dolgu Duvarın Köşegen Uzunluğu
h_d	: Dolgu Duvarın Yüksekliği
E	: Elastisite Modülü
λ_d	: Eşdeğer Basınç Çubuğu Katsayısı
a_d	: Eşdeğer Basınç Çubuğunun Genişli
θ	: Eşdeğer Basınç Çubuğunun Yatayla Olan Açısı
h_k	: Kolon Boyu
I_k	: Kolonun Atalet Momenti
R^2	: Korelasyon Katsayısı
y	: Mm Cinsinden Kiriş Numunesinin Yüksekliğinin Yarıısı
A	: Mm ² Cinsinden Kuvvetin Uygulandığı Kesit Alanı
I	: Mm ⁴ Cinsinden Atalet Momenti
f_c	: MPa Cinsinden Basınç Dayanımı
f_b	: MPa Cinsinden Eğilme Dayanımı
P_c	: Newton Cinsinden Maksimum Basınç Kuvveti
M_c	: Newton.mm Cinsinden Maksimum Eğilme Momenti
η_{ki}	: Rijitlik Düzensizliği Katsayısı

Kısaltmalar	Açıklama
ECC	: Çimento Esaslı Kompozit
g	: Gram
Kg	: Kilogram
kN	: Kilonewton
kNm	: Kilonewton Metre
m	: Metre
mm	: Milimetre
MPa	: Megapascal
N/A	: Mevcut Değil
cm	: Santimetre

1. GİRİŞ

Günümüzde betonarme yapı sistemleri en yaygın kullanılan taşıyıcı sistem olma özelliğini devam ettirmektedir. Betonarme taşıyıcı sistemlerin en önemli yapısal bileşeni betondur. Ülkemizde 2022 yılı itibarıyla yıllık beton üretimi 105 milyon m³ seviyesindedir (Türkiye Hazır Beton Birliği, 2025). Bu üretim hızlı yapılaşma ihtiyacı ile birlikte her geçen yıl artmaktadır. Ülke olarak derin bir üzüntü yaşadığımız ve asrın felaketi olarak tanımlanan 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinden sonra depremden etkilenen illerde birçok yeni yapının inşa edildiği düşünüldüğünde bu tüketimin 2025 yılında daha da arttığı ön görülebilecektir. Dolayısıyla yapı inşa sektöründe en fazla tüketilen yapı malzemesi betondur. Hatta dünyada sudan sonra en çok kullanılan akışkanın beton olduğu ifade edilmektedir (Akoğuz, 2023). Bu durum geçmişten günümüze beton malzemesinin önemini göstermektedir. Bu kapsamda yapı malzemesi alanında araştırmalar beton malzemesine yeni özellikler kazandırma alanına yoğunlaşmıştır. Betona yeni özellikler kazandırmak ve fiziksel, mekanik, durabilite parametrelerini iyileştirmek için birçok akademik çalışma yapılmaktadır. Beton malzemesi genel olarak çimento, su, agrega ve/veya kimyasal-mineral katkıların belirli oranlarda karışmasından elde edilen bir yapı malzemesidir. Bilimsel araştırmalarda farklı bağlayıcılık özelliği bulunan malzemelerin, agregaların ve kimyasal-mineral katkıların kullanımı ile birçok farklı beton türü elde edilebilmektedir. Bu kapsamda çimentosuz, sürdürülebilir, geri dönüştürülmüş, geopolimer, çevreci beton türleri üretilebilmektedir. Bu beton türlerinden biri de tasarlanmış çimento esaslı kompozit (ECC: Engineered Cementitious Composites) olarak literatürde yer alan beton türüdür. Ancak bu beton türlerinin betonarme yapı tasarımı ve inşasında kullanımları oldukça sınırlıdır. Bu tez çalışması kapsamında literatürde farklı parametreleri araştırılan ve içerik optimizasyonu yapılan çimento esaslı kompozitlerin yapısal tasarımda kullanılabilmesi motivasyon olarak belirlenmiştir.

Betonun en önemli mekanik özellik parametreleri basınç, çekme, eğilme dayanımı ve elastisite modülü olarak ifade edilebilir. Bununla birlikte betonun birim hacim ağırlığı ve gerilme- birim şekil değiştirme eğrisinden elde edilen enerji tüketme kapasitesi yapısal sistemler açısından önemli bir özellik olarak karşımıza çıkmaktadır. Araştırmalarda betonun basınç dayanımı parametresi farklı yöntemlerle artırılabilir (Demir ve ark., 2022). Ancak her durumda malzemenin enerji yutma kapasitesinde beklenen iyileşme oluşmamaktadır. Betonun çekme dayanımı ise basınç dayanımına göre oldukça

düşüktür. Betonun düşük çekme dayanımı parametresinden dolayı betonarme kesitlerde inşaat donatısı kullanılmaktadır. Literatürde betonun çekme ve eğilme dayanımını arttırmaya yönelik çalışmalar yapılmaktadır (Arslantürk, 2021; Avcıalp, 2024). Betonun her açıdan mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi yapısal tasarımlarda kullanılabilirliğinin arttırılmasına da katkı sunacaktır. Çünkü yapılan çalışmaların bir kısmı betonun bir özelliğini iyileştirirken diğer bir özelliğine olumsuz etki olarak ortaya çıkabilmektedir. Örneğin hafif beton çalışmalarında yapısal ağırlığın azaltılması için beton birim hacim ağırlığının azalması olumlu bir etki iken, betonun mekanik parametrelerinin istenilen seviyelere ulaşamaması bir dezavantaj olarak ortaya çıkmaktadır (Anadut ve Köksal, 2023). Bu tez çalışmasında esas alınan inovatif bir beton türünün seçilmesinde tüm mekanik özelliklerin iyileştirildiği bir opsiyon araştırılmıştır. Bununla birlikte günümüzde sürdürülebilirlik ve çevreci yaklaşımlar önemli bir kavramdır. Beton içeriğinde bulunan çimentonun üretiminde doğaya karbondioksit salınımı yapılmaktadır. Günümüz araştırmalarında atık betonların değerlendirilmesi ön plana çıkmıştır. Tüm bu sebepler çerçevesinde yapısal tasarımda kullanılabilirliği bu tez çalışmasında incelenecek beton türü olarak ECC beton tercih edilmiştir.

Çimento esaslı kompozit beton (ECC) geleneksel betona göre mekanik parametreler açısından yüksek performanslı olarak tanımlanabilmektedir. Bu tez çalışması kapsamında öncelikle ECC betonun karışım içeriği araştırılmıştır. Bu doğrultuda birçok akademik yayın ve patent çalışması irdelenmiştir. Bu araştırmalarda ECC beton için farklı karışım oranlarına sahip birçok detay bulunmaktadır. ECC betonun geleneksel betona göre en önemli avantajı yüksek süneklik kapasitesine sahip olmasıdır. Bununla birlikte bu beton türü ile yıkıntı atıklarının dönüşümüne ve çevreci betonlar elde edilmesine imkan sağlanabilmektedir. Dolayısıyla yüksek süneklik kapasitesine sahip ECC beton ile yüksek dayanım yanında yüksek enerji yutmak kapasitesine sahip yapısal elemanların üretilebileceği literatürde rapor edilmiştir (Ji ve ark., 2023). ECC içeriğinde geleneksel betondan farklı olarak çimento oranı farklı bağlayıcılar kullanılarak azaltılabilmekte, farklı türde lifler beton karışımında kullanılabilmektedir (Sarı ve ark., 2013). Ayrıca normal betona kıyasla daha az iri agrega ile daha yüksek basınç dayanımına sahip betonlar üretilebilmektedir (Kılınç, 2012). Beton içeriğinde iri agreganın azaltılması işlenebilirlik açısından da avantajlar sunmaktadır (Erdoğan, 2007). Bu tez çalışmasında beton atıklarının değerlendirildiği, doğal malzemelerin içerikte yer aldığı ve liflerden oluşan bir kompozit türü esas alınmıştır. Ancak birçok bileşenden oluşan bu karışım içeriklerinin oranlarının betonunun özelliklerini oldukça değiştirmesi

durumundan dolayı çalışmada karışım içeriği optimizasyonu yapılmıştır. Bu kapsamda bilimsel yöntemler ile bilgisayar ortamından farklı birçok karışım varyasyonu oluşturulmuş, bu varyasyonlar laboratuvar ortamında ilgili standartlarda belirtilen boyutlarda üretilerek test edilmiştir. Çalışmada ECC betondan beklenen en önemli özellik basınç dayanımında artış ile birlikte malzemenin sünek bir davranış sergilemesi olarak beklenmektedir. Çalışma amacı ECC betonun yapısal tasarımda veya güçlendirmede kullanılabilirliği olarak belirlenmiştir. Literatürde ECC betonun yapısal tasarımda kolon ve kiriş taşıyıcı eleman olarak kullanımına yönelik araştırmalar mevcuttur (Ding ve ark., 2023). Ancak bu çalışmaların büyük bir kısmı sadece bir yapısal eleman için analitik veya deneysel detayları içermektedir. Çalışmada öncelikle optimum karışım içeriği belirlenen ve sürdürülebilir olarak nitelendirilebilen ECC karışımının mekanik parametrelerinin belirlenmesine yönelik deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Malzemenin davranış parametreleri belirlendikten sonra 1/2.5 ölçekli yapısal kirişler üretilerek normal beton ve ECC beton arasında yük-deplasman ve enerji yutma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Bu deneylerin gerçekleştirilmesindeki amaç ECC betonun en doğru parametreler ile bilgisayar ortamında modellenerek gerçek davranışı en iyi yansıtan analitik modelin elde edilmesi olarak belirlenmiştir. Deneysel olarak elde edilen veriler analitik modelin kalibrasyonunda kullanılmıştır. Tez çalışmasında ECC betonun yapısal sistemlerde dolgu duvarların güçlendirilmesinde kullanımı üzerinde araştırma yapılmıştır. Malzeme ve ölçekli eleman bazında laboratuvar deneylerinden elde edilen verilerle doğrulanmış ECC beton yapısal davranış modellemesi kullanılarak bilgisayar ortamında bu beton türünün betonarme çerçevelerin yatay yük kapasitesindeki artışa etkileri ortaya konulmuştur. Tez çalışmasında ECC betonun davranış modellemesine yönelik analitik ve deneysel çalışmalar tamamlandıktan sonra 1/1 ölçekli çerçevelerde bu beton türünün dolgu duvarların güçlendirilmesinde etkisi analitik olarak incelenmiştir. Bu aşamaya kadar gerçekleştirilen çalışmalar ECC betondan üretilmiş farklı yapısal sistemlerin (köprüler, prefabrik yapılar, altyapı sistemleri, depreme dayanıklı yapılar) davranışlarının analitik olarak incelenebilmesine de imkan sağlamıştır. Dolayısıyla uzun süreler alan ve maliyetli yapısal deneyler yerine doğrulanmış analitik modeller ile ECC'den üretilmiş yapıların veya yapısal sistem detaylarının yatay ve düşey yükler etkisinde davranışlarının daha hızlı incelenebilmesine yönelik ön çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Ancak bu tez kapsamında sadece dolgu duvarların güçlendirilmesi ve yeni dolgu duvarların tasarımında ECC'nin kullanımı konusu detaylandırılmıştır.

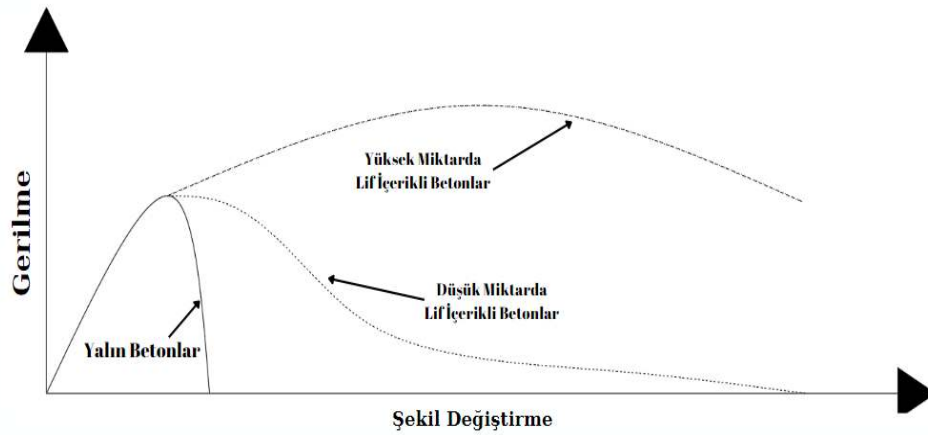
6 Şubat 2023 Kahramanmaraş merkezli depremler dolgu duvarların yapısal çerçeveler içerisindeki önemini bir kez daha göstermiştir. Yapısal tasarımda dolgu duvarlar yapı taşıyıcı sistemi içerisinde yer almamaktadır (Özyurt ve Kadioğlu, 2023). Analitik modellerde dolgu duvarlar yapısal sistem üzerine düşey yük olarak etkimektedir. Ancak yapısal sistemlerin yanal yükler etkisinde dolgu duvarların etkisi önemli bir araştırma konusudur. Bununla birlikte dolgu duvarların güçlendirilmesini esas alan çalışmalar literatürde mevcuttur (Kazem Sharbatdar ve Tajari, 2021). Asrın felaketi depremlerde dolgu duvarlarda oluşan çatlaklar bu yapısal olmayan elemanların belirli seviyelerde yatay yük aldığını göstermektedir. Bununla birlikte taşıyıcı sisteminde hasar bulunmayan bir yapı dolgu duvarlarında meydana gelen çatlaklar yapı sahipleri tarafından binada ağır hasar şeklinde yorumlanabilmektedir. Bu sebeple günümüz dolgu duvarı tasarımında bu elemanların deprem etkisinde bina yatay yük kapasitesi açısından incelenmesi ve bu elemanların yeterli bir kapasite ile onarılabilecek düzeyde çatlaklar ile depremi karşılaması önemli bir araştırma alanıdır. Bu tez çalışmasında ECC betonun mevcut dolgu duvarların güçlendirilmesinde kullanılabilirliği ve duvar kapasitesindeki artışa etkisi analitik olarak incelenmiştir. Malzeme ve eleman bazında deneysel sonuçlarla karşılaştırmalı şekilde doğrulanmış analiz parametreleri kullanılarak 1/1 ölçekli ECC beton uygulanmış ve uygulanmamış çerçevelere statik-itme analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda ECC malzemesinin çerçeve yatay yük kapasitesindeki artışı irdelenmiştir. Bununla birlikte dolgu duvarların güçlendirilmesinde en efektif ECC katmanı kalınlığı da araştırılmıştır. Yapılan analitik çalışmalar ile ECC betonun teorik olarak modellenmesi çalışmalarına da katkı sunulabilmesi hedeflenmiştir.

Tez kapsamında literatürde var olan ECC karışımlarından farklı olarak atık betonun ve doğal malzemelerin değerlendirilmesi, bu malzemelerin içerikte yer aldığı ECC betonunun mekanik dayanım açısından en optimum karışım oranlarının belirlenmesi, ECC betonun analitik çalışmalarda modellenmesine yönelik parametrelerin elde edilmesi ve ECC betonun doğrulanmış analiz modelleri üzerinden dolgu duvarların güçlendirilmesinde efektifliğinin araştırılması konuları çalışmamızın özgün yönünü ortaya koymaktadır. İlerleyen çalışmalarımızda analitik olarak incelenen 1/1 ölçekli çerçevelerde ECC ile dolgu duvar güçlendirmesinin deneysel olarak da incelenebilmesi hedeflenmiştir. Bu tez çalışması ile ECC betonun içerik optimizasyonunun önemi, ECC betonun geleneksel betona kıyasla mekanik davranışının anlaşılabilmesi ve gerçek yapısal tasarımda ve güçlendirmede bu beton türünün kullanılabilmesi çalışmalarına katkı sunulması amaçlanmıştır.

1.1. Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozit Beton (ECC)

Özel bir beton türü olarak Tasarlanmış Çimento Esaslı Kompozitler ilk olarak 1990'lı yıllarda ABD'nin Michigan Üniversitesi'nde Prof. Dr. Victor Li tarafından betonda daha yüksek süneklik, kılcal çatlak kontrolü, fiber-matris ara yüzü, enerji yutma kapasitesi gibi özellikleri araştırmak için tasarlanmıştır ve geliştirilmiştir (Li ve Leung, 1992). Bu mekanik özelliklerin geliştirilmesindeki en büyük etken matris içerisindeki liflerin homojen dağılımıdır.

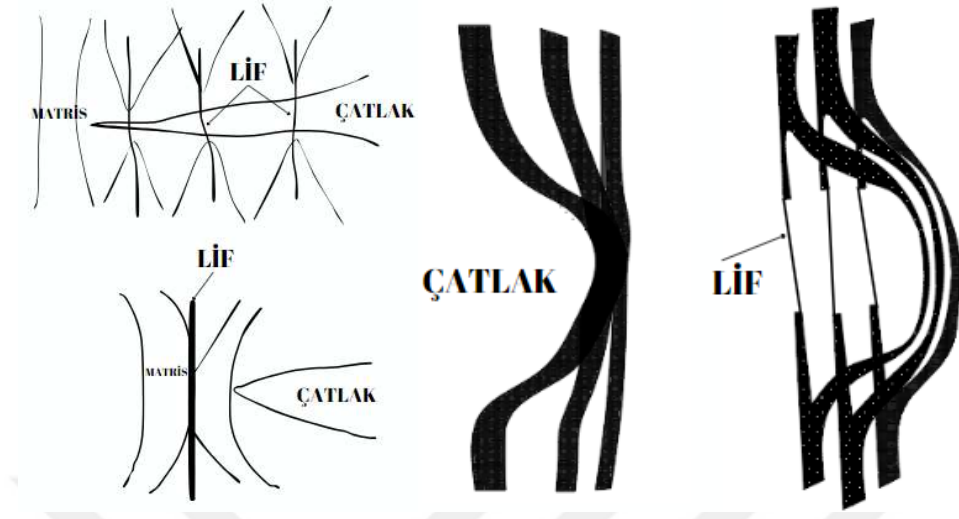
Lifler, betonun fiziksel, mekanik ve durabilite performansını artıran, betona farklı mekanik özellikler katan bir takviye malzemesidir. Özellikle geleneksel betonun yetersiz kaldığı çekme dayanımı, kontrolsüz çatlak oluşumu, yorulma direncinin zayıflığı gibi parametreleri iyileştirmek için kullanılmaktadır. Genel olarak harç içerisinde hacimce %2 oranında lif kullanılmasıyla yüksek çekme ve deformasyon kapasitesi elde edilmektedir (Ling ve ark., 2019). Yük altında sünekliği artan lifli beton, geleneksel betona kıyasla bir metal gibi davranış göstererek ilk çatlamadan sonra deformasyon sertleşmesi gösterir ve normal betondan ortalama 400 kat fazla birim şekil değiştirme kapasitesine ulaşabilmektedir (Şahmaran ve Li, 2008). Bilindiği üzere geleneksel betonun çekme-birim şekil değiştirme kapasitesi yaklaşık 0,003 seviyelerindedir, fakat ECC çekme birim şekil değiştirme kapasitesi istenilen sünekliğe bağlı olarak ortalama yaklaşık 0,3 seviyelerine kadar çıkabilmektedir (V. C. Li ve Kanda, 1998).



Şekil 1. 1. Lifli beton (ECC) ile geleneksel beton arasındaki farkı gösteren gerilme-şekil değiştirme eğrisi (Sarı, 2013).

ECC betonun içerisindeki lifler beton matrisine homojen bir şekilde dağılarak ECC'nin en belirgin özelliği olan çatlak kontrolünü sağlarlar. Lifler, betondaki çatlakları köprüler, bununla birlikte çatlak oluşumunu azaltırlar. Mikro-mekanik tasarım konsepti ile genişliği 30 µm'ye kadar azalabilen kontrollü mikro çatlaklar oluştururlar (Şahmaran

ve ark., 2012). Çatlakların ilerlemesini ve mikro çatlakların birleşerek makro çatlaklara dönüşmesini engelleyerek, betonun sünekliğini artırırılar.



Şekil 1. 2. Beton matrisi içerisindeki lifin köprüleme yaparak çatlak kontrolü sağlaması (Fırat, 1996).

ECC betonun kimyasal etkilere dayanıklı olması için bazı farklı lif türleri de (bazalt ve polipropilen lifler) kullanılmaktadır (Sim ve ark., 2005). Ayrıca bu liflerin betonun çatlak direncini iyileştirmesi ile birlikte su, klorür iyonları ve diğer zararlı maddelerin beton içine girmesi ve matris içerisinde ilerleyişine karşı direnç elde edilir. Bu da betonun korozyon ve diğer çevresel etkilerden korunmasına yardımcı olur. Bununla birlikte düşük geçirgenlik ile beton çevresel etkilere karşı daha dayanıklı olur ve dolaylı olarak betonun ömrü daha uzun olur. Erime özelliği olan bazı lifler (polipropilen) yangın esnasında erir ve beton içerisinde mikro kanallar oluştururlar. Bu kanallar sayesinde beton içerisindeki buhar basıncı dışarı atılır ve betonda oluşabilecek patlamalar önlenir. Lifler bu sayede betonu yangına karşı daha dayanıklı ve güvenli hale gelmesini sağlarlar. Ayrıca başta çelik lifler olmak üzere lifler betonun yük etkilerine karşı dayanımını artırır, çeşitli dış ve iç mekan koşullarında aşınmaya karşı dayanıklılık gösterebilirler (Song ve Hwang, 2004). ECC beton, içerisindeki liflerin özelliklerine göre çeşitli alanlarda kullanılmaktadır:

Çelik lifin yüksek elastisite modülü, yoğunluk, sertlik ve çekme dayanımı gibi özelliklerinden faydalanan ECC betonlar; çatlakları kontrol edebilmek, yüksek dayanıklılık ve uzun servis ömrü sağlayabilmek için köprüler, köprü ayakları, barajlar, tüneller, otoyollar, hidrolik yapılar, beton borular ve altyapı malzemeleri, havaalanı kaplamaları, liman kaplamaları gibi alanlarda kullanılabilmektedir (Banthia ve Gupta,

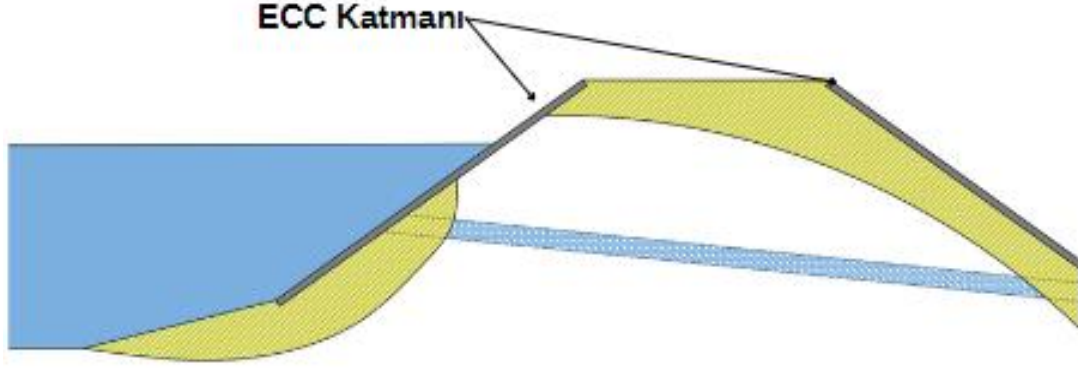
2004). Ayrıca sürekli olarak yüke maruz kalan sanayi yapılarının zeminleri, fabrika ve hangar döşemeleri gibi alanlarda da çelik lifli ECC betonlar kullanılarak aşınma ve yorulma dayanımı özelliği sağlanabilmektedir (Bentur ve Mindess, 2006). Yüksek nemli ortamlarda, tuzlu su içeren deniz yapılarında ve betonun kimyasallara maruz kaldığı laboratuvar, fabrika gibi ortamlarda korozyona karşı dayanıklılığı arttırmak ve bu faktörlerin betonu aşındırıcı etkisini azaltmak amacıyla betonda doğal kayalardan elde edilen bazalt lifleri kullanılmaktadır (Sim ve ark., 2005). Bir başka lif türü olan, tipik olarak yaklaşık %16-20 zirkonya içeren alkaliye dayanıklı cam lif kullanılan ECC betonlar ise yüksek çekme mukavemetinin yanı sıra mekanik dayanım, çatlak kontrolü, ısı ve ses izolasyonu özellikleri ile cephe panelleri, dekoratif elemanlar ve duvar panelleri gibi hafif ve dayanıklı prefabrik kompozitlerde; kanalizasyon kapakları, drenaj kanalları gibi altyapı elemanlarında; ince ve karmaşık mimari detaylar ve dış cephe kaplamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Balaguru ve Shah, 1992). Tüm bunlara ek olarak bu tez çalışmasında kullanılan polipropilen lifler ise korozyona karşı mükemmel direnci sayesinde çelik liflere alternatif olmaktadır. Polipropilen lifler, başta kılcal çatlakların oluşumunu önlemesi ve çatlakları kontrol altına alabilmesi özelliği olmak üzere düşük yoğunlukları (0.905 g/cm^3), yüksek mukavemet-ağırlık oranları, dayanıklılıkları, yüksek çekme dayanımları, yük ve aşınmaya karşı dayanımları, süneklik ve kırılma sonrası dayanımları, yangına karşı pasif dayanımları gibi özellikleri nedeniyle beton sektöründe son dönemlerde sıkça tercih edilmektedir. Polipropilen lifler bu olumlu özelliklerinin yararlanılabileceği fabrikalarda, depolarda, endüstriyel zeminlerde, köprü ayaklarında, dalgakıranlarda, kıyı yapılarında, su ve kanalizasyon borularında, otoyollarda, öngermeli betonlarda, tamir-onarım-güçlendirme amaçlı yapısal elemanlarda, kimyasal ortam betonlarında vb. örnekleri arttırılarak devam edilebilecek birçok alanda kullanılmaktadır (Altalabani ve ark., 2020).

Bu çalışmada, farklı lif türleri üzerine kapsamlı bir literatür araştırması yapılmış ve dolgu duvarların güçlendirilmesi açısından en uygun lif türünün belirlenmesi amaçlanmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda, polipropilen liflerin mekanik ve dayanım özellikleri açısından dolgu duvarların güçlendirilmesinde önemli avantajlar sağlayabileceği öngörülmüştür. Ayrıca, literatür taraması sırasında polipropilen liflerin dolgu duvar güçlendirme uygulamalarında yeterince araştırılmadığı tespit edilmiştir. Bu eksiklik, polipropilen liflerin yapısal performansa etkisinin detaylı olarak incelenmesi gerekliliğini ortaya koymuştur. Bu doğrultuda, tez çalışmasında polipropilen liflerin dolgu duvarların güçlendirilmesi ve yapısal sistemlerin yatay yük kapasitesine katkısı

açısından uygun bir alternatif olup olmadığı analitik ve deneysel yöntemlerle değerlendirilmiştir.

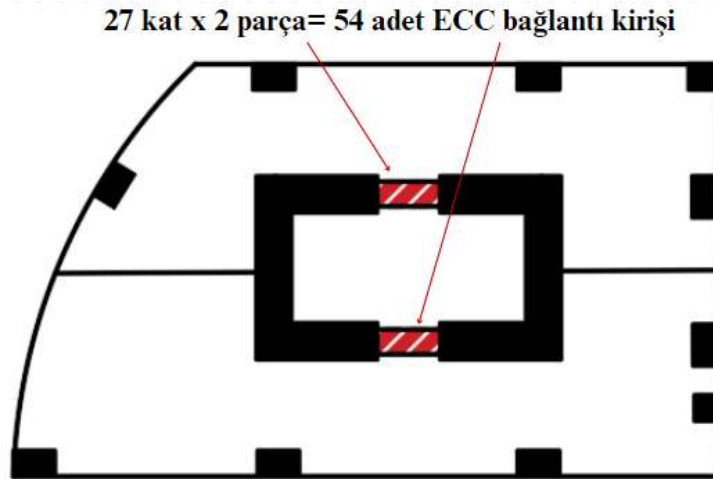
1.2. ECC Betonun Yapısal Sistemlerde Kullanımı

ECC, yol, bina, köprü, barajlar, tüneller, sanat yapıları ve benzer uygulamaların yapımında, onarımında ve bakımında kullanılabilir. 2002 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde bozulan köprü tabliyesinin bir kısmında ticari bir harç ile onarılmış, diğer kısmında ise ECC kullanılmıştır. 5 yıl süren gözlemlerin ardından ECC olan kısımdaki çatlakların 50 μm 'den küçük, diğer kısımdaki çatlakların ise 3,7 mm'yi aşan çatlaklar olduğu görülmüş ve ticari onarım harcının kullanıldığı kısım tekrar onarılmak zorunda kalınmıştır (Şahmaran ve Li, 2003). 2003 yılında yine Japonya'da 60 yıllık Mikata Barajı'nın yüzeyine 20 mm kalınlığında ECC püskürtülerek uygulanmış ve çatlakların, su geçişlerinin ve kabuk atmaların önüne geçilmiştir (Kojima ve ark., 2004). Aynı yıl Japonya'nın Gifu kentinde, yaklaşık 30 yıllık bir istinat duvarının yüzeyindeki şiddetli çatlakların onarımı için ECC kullanılmaya karar verilmiş ve 90 m²'lik alan ECC ile onarılmıştır, onarılan yüzey 12 ay sonra incelenmiş ve mikro çatlaklar oluştuğu görülmüş, 24'üncü ayda incelendiğinde ise 12'nci aya göre çatlakların daha da küçüldüğü, gözle görmenin bile zorlaştığı raporlanmıştır (Rokugo ve ark., 2005). Japonya'da 2004 yılında Mihara Köprüsü'nde tabliyenin yarısında 40 mm'lik kalınlık 800 m³ ECC ile değiştirilerek köprünün sünekliği ve yük taşıma kapasitesi artırılmış, yapıda oluşan gerilmeler ve kullanılan malzeme miktarı yaklaşık %40 azaltılmıştır (Mitamura ve ark., 2005). 2005 Yılında ABD'de Grove Street Köprüsünde genişleme derzlerinde bakım ihtiyacını ortadan kaldırmak için bağlantı döşemesine 32 m³ ECC beton dökülmüş ve gözlemler sonucunda, kullanılan ECC betonun genişleme ekipmanlarının yerine kullanılabilirliği ve termal deformasyonları karşılayabildiği ortaya çıkmıştır (Lepech ve Li, 2009). Tüm bunlara ek olarak ECC beton, Japonya'nın Tottori kentinde toprak dolgudan bir barajın iç ve dış yüzüne uygulanmıştır. Yine ECC, su izolasyonu için Çin ve Japonya' da su kanallarının yüzeylerine püskürtme yoluyla uygulanmıştır (Şekil 1.3.).



Şekil 1. 3. ECC betonun su kanallarında uygulama şekli.

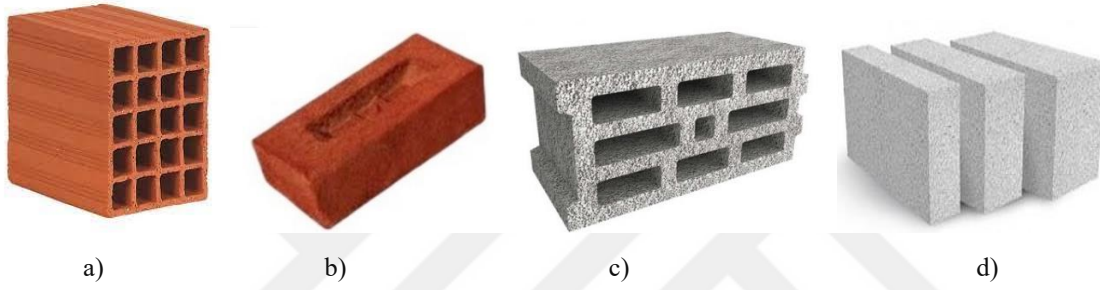
Binalarda ise genelde kirişlerde uygulanmıştır. İlk örnek; Japonya'nın Osaka kentindeki 60 katlı Kitahama Binasında uygulanan ECC, prekast olarak üretilip sahada montajı yapılmıştır. Kapsamlı deneyler sonucunda kayma açıları fazla olsa bile yük kapasitesi stabil kalmış ve hasara karşı dayanıklı sonuçlar vermiştir ve ayrıca ECC betonun beklenen süneklik özelliğinin ön plana çıkmasıyla beraber kirişler istenilen davranışı sergilemiştir (Li, 2018). ECC beton kirişlerin kullanıldığı bir diğer örnek ise Tokyo'nun merkezinde bulunan 95 metre yüksekliğindeki 27 katlı Glorio-Tower Roppongi binasıdır. Her katta karşılıklı olacak şekilde tasarlanan kirişlerde ECC'nin mekanik özelliklerinden faydalanılmıştır (Li, 2018).



Şekil 1. 4. ECC kirişlerin Glorio-Tower Roppongi binasında kullanımı (Li, 2018).

1.3. Dolgu Duvarların Yapısal Sistemlerde Önemi

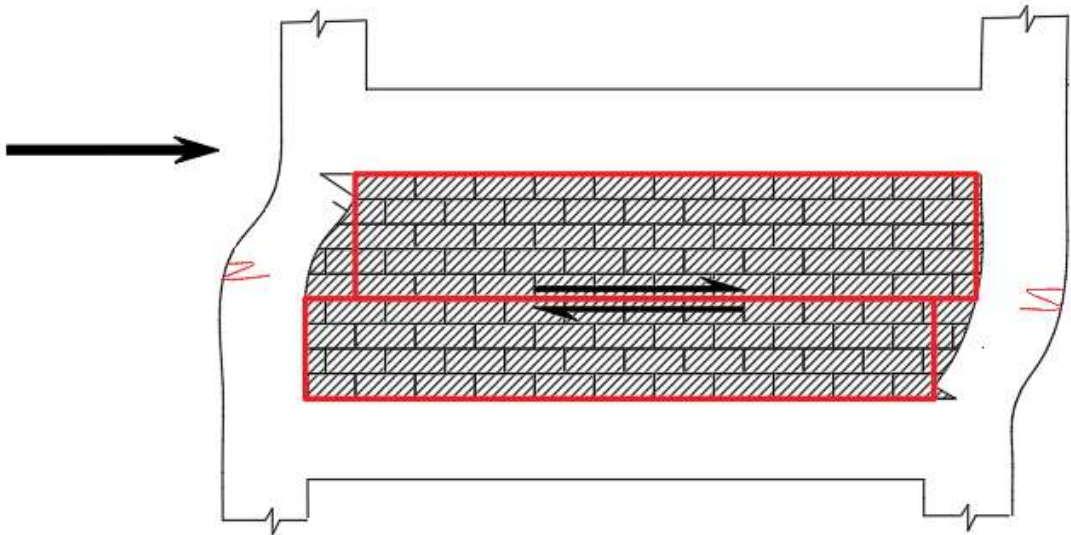
Dolgu duvarlar betonarme yapıların iskeletindeki boşlukları doldurmak için tuğla, briket, gazbeton gibi malzemeler kullanılarak imal edilen, dünya çapında yaygın bir şekilde kullanılan ve taşıyıcı olarak kabul edilmeyen yapı elemanlarıdır. Taşıyıcı olarak kabul edilmemesinde belirsiz malzeme davranışı, taşıyıcı eleman-duvar arasında farklı malzeme geçişi, yetersiz tasarım standartları, deprem yüküne karşı karmaşık tepkileri, ileri düzey tasarım ve analiz gerektirmesi gibi sebepleri etkilidir. Yapının tasarım analizlerinde dolgu duvarlar sadece çerçeveye düşey yük olarak girilmekte ve yapısal kapasite açısından dikkate alınmamaktadır (Bikçe ve Bayrak, 2019).



Şekil 1. 5. a) Yatay delikli dolgu tuğlası, b) Harman tuğlası, c) Briket-cüruf briket, d) Gazbeton.

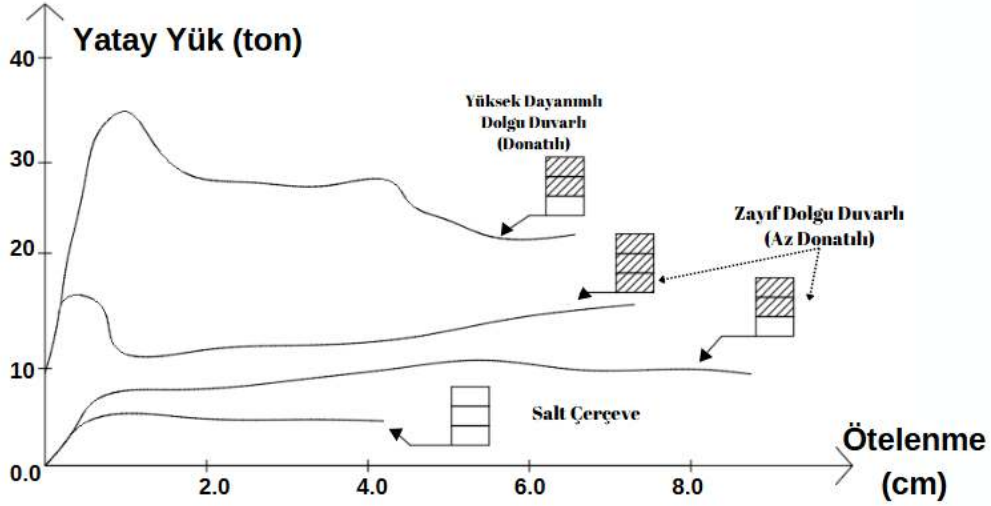
Yapının iç ve dış kısımlarında kullanılan dolgu duvarların asıl görevleri yapı içerisindeki mekanları ayırmaktır. Dolgu duvarlar özellikle yangın, nem, ses, ısı gibi yapıyı ve içerisindeki canlıları olumsuz etkileyebilecek unsurlara karşı yalıtım sağlamaktadır. Yatay delikli tuğlalar boşluk oranlarının çok olması nedeni ile basınç dayanımları düşük olmasından dolayı (Ülkemizde TS EN 771-1 standardına göre, taşıyıcı duvarlarda kullanılan delikli tuğlaların minimum basınç dayanımı 5 MPa olmalıdır) yatay deprem kuvvetlerine karşı dayanıma katkısı az olmasına karşın duvarlardan ısı transferini azaltarak enerji verimliliği sağlamaktadır (Santos ve ark., 2015). Gazbeton ve briket ise gözenekli yapıya sahip olmalarından dolayı hafiftirler ve bu yüzden yapı ağırlığına olumlu katkıları vardır. Bu gözenekli yapıları sayesinde ısı ve ses yalıtımı özellikleri yüksek malzemelerdir. Ayrıca yanmaz ve yüksek sıcaklıklara karşı dayanıklıdır (Yüksel, 2010). Bu özellik, yangın güvenliği açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Tüm bu olumlu etkilerin yanı sıra dolgu duvarlar yapısal sistemlerde gevrek davranmaları nedeni ile büyük hasar alabilmektedir. Özellikle 6 Şubat Kahramanmaraş depremlerinden sonra saha araştırmalarında dolgu duvarların taşıyıcı sistemi az hasarlı yapılarda dahi ciddi hasarlar alabildiği, bu durumun can güvenliği açısından da olumsuz etkileri ortaya

çıkardığı görülmüştür. Yapının taşıyıcı bir parçası olarak analiz edilmeyen bu yapı elemanları deprem gibi yatay yükler esnasında yapının taşıyıcı sistemlerine (kolon, kiriş, döşeme) ilave kütle olarak dikkate alınmaktadır. Özellikle dolgu duvarlar kiriş deformasyonları açısından kritik öneme sahip olabilmektedir. Dolgu duvarlar dikkate alınmadan yapılan analizlerde düşey yük etkilerinde dahi statik açıdan problemler ortaya çıkabilmektedir. Bu durum taşıyıcı elemanlarda ve taşıyıcı elemanların birleşim noktalarında çatlamlar, ilave deformasyonlar gibi istenmeyen sonuçlar meydana getirebilmektedir. Ayrıca dolgu duvarların da taşıyıcı sistemler arasında sıkışması ile enerjiyi sönümleyemeyerek ani kırılması veya yapısal çerçeveden ayrılması-kopması durumunda da hem yapısal hasara hem de can ve mal kaybına sebep olabilmektedir (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2018). Yapıdaki mevcut duvarların tamamı deprem esnasında birer perde duvar gibi çalışabilmektedir ve perde duvarlar gibi taşıma güçlerine ulaşana kadar yatay yük taşıyabilmektedir (Kızıloğlu, 2006).



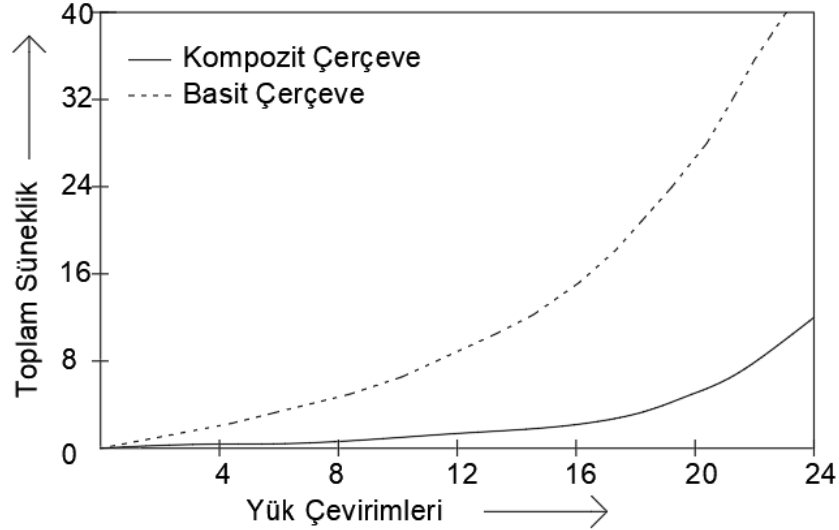
Şekil 1. 6. Dolgu duvarlı çerçevelerin yatay yük altındaki davranışı (Kızıloğlu, 2006).

Govindan ve ark. (1986) tek açıklıklı, yedi katlı numuneler üzerinde yapmış oldukları deneylerde, dolgu duvarlı çerçevelerin salt çerçeveye oranla iki kat daha fazla yük taşıma kapasitesinin olduğunu görmüşlerdir (Govindan ve ark., 1986). Şekilde 1.7’de yüksek dayanımlı bir dolgu duvarın salt bir çerçeveye göre aynı ötelenme mesafesinde daha fazla yatay yük taşıdığı gösterilmiştir. Bu da dayanım açısından ECC ile güçlendirilmiş bir dolgu duvarın yatay yükler altında yük taşıma kapasitesinde olumlu sonuçlar ortaya çıkaracağını göstermektedir.



Şekil 1. 7. Dolgu duvarlı çerçevenin yatay yükler altındaki davranışa etkisi (Bayülke, 2003).

Rijitlik, yapıların kuvvetler altında stabil kalmaya çalışma ve direnç gösterme yeteneğini ifade eder. Negro ve Verzeletti yaptıkları çalışmada dolgu duvarlı çerçevelerin deprem kuvveti altında salt çerçeveye göre 2,6 kat daha az yer değiştirme yaptıkları sonucuna ulaşmışlardır (Negro ve Verzeletti, 1996). Bu da çerçevenin rijitliğinin arttığını ve taşıyıcı elamanların ani kırılmalarına yol açabileceğinin göstergesidir. Süneklik, herhangi bir kopma, kırılma ve dayanımda belirgin bir azalma olmadan plastik şekil değiştirme kapasitesini ifade eder. Govindan ve Santhakumar tarafından yapılan bir diğer çalışmada salt çerçeve ile dolgu duvarlı çerçevenin süneklik özellikleri incelenmiş, salt çerçevenin sünekliğinin, dolgu duvarlı çerçevenin sünekliğine oranla 3,29 katı kadar daha fazla olduğu saptanmıştır (Govindan ve Santhakumar, 1986). Bu araştırmalar dolgu duvarlarda yapısal çerçeve ile uyumlu sünek bir malzemenin kullanımının önemini göstermektedir.



Şekil 1. 8. Tekrarlı yük etkisinde sünekliklerin karşılaştırılması (Govindan ve Santhakumar, 1986).

Enerji yutma özelliği, bir malzemenin veya yapının, uygulanan yükler altında deformasyona uğrarken enerjiyi absorbe etme kapasitesini ifade eder. Lifli betonlar, enerji yutma kapasitesini artırmak için yaygın olarak kullanılır. Lifler, betonun elastikiyetini ve enerji yutma yeteneğini artırır. Maksimum yükten sonra artan deformasyon sonucunda, yükün azalma hızı normal betonlara göre daha yavaştır, bu da lifli betonların daha yüksek enerji yutma kapasitesine sahip olduğunu gösterir (Koç ve Birinci, 2012). Bu kapsamda ECC ile güçlendirilmiş dolgu duvarların ECC'nin yüksek süneklik özelliğinden dolayı enerji yutma kapasitesi açısından efektif bir çözüm olabileceği değerlendirilmiştir.

1.3.1. Dolgu duvarların yapı davranışına olumsuz etkileri

Dolgu duvarlar, betonarme çerçeve sistemlerinde yapısal olmayan elemanlar olarak kabul edilse de özellikle deprem gibi yatay yükler altında yapının davranışını önemli ölçüde etkileyebilirler. Dolgu duvarların yapısal analizlerde dikkate alınmaması durumunda yapıda; yumuşak kat ve zayıf kat düzensizlikleri, burulma etkileri, kısa kolon etkileri, yapı periyodunun azalması gibi beklenmedik olumsuz sonuçlara yol açabilir. Ayrıca hafif bir malzemedan dolgu duvar üretimi yapı ağırlığını azaltacağından deprem yükleri açısından olumlu bir katkı ortaya çıkarmaktadır.

1.3.1.1. Yumuşak Kat ve Zayıf Kat Düzensizlikleri

Yumuşak kat düzensizliği, bir katın rijitliğinin üst veya alt katlara göre belirgin şekilde düşük olması durumunda ortaya çıkar. Matematiksel olarak, birbirine dik iki deprem doğrultusunun herhangi biri için, herhangi bir i'inci kattaki ortalama görelî kat

ötelemesinin bir üst kattaki ortalama görelî kat ötelemesine oranı olarak tanımlanan Rijitlik Düzensizliği Katsayısı (η_{ki})'nın 2.00'den büyük olma durumu olarak açıklanmaktadır (Başlı ve Çağatay, 2011). Bu durum genellikle zemin katlarda dolgu duvarların bulunmaması veya az sayıda olması nedeniyle meydana gelir. Özellikle ticari amaçlı kullanılan zemin katlarda geniş açıklıklar elde etmek için dolgu duvarların ihmal edilmesi, bu katların diğer katlara göre daha esnek davranmasına yol açar. Deprem etkisi altında, yumuşak katlar aşırı yer değiştirmelere maruz kalarak ciddi hasarlara veya göçmelere neden olabilir (Başlı ve Çağatay, 2011). Zayıf kat düzensizliği ise bir katın dayanımının üst veya alt katlara göre belirgin şekilde düşük olması durumunda ortaya çıkar. Bu durum, dolgu duvarların eksikliği veya zayıflığı, mimari tasarım gereği geniş açıklıkların bulunması, yetersiz kolan ebatları ve tasarımı gibi nedenlerden dolayı meydana gelir. Zayıf katlar, deprem sırasında diğer katlara göre daha fazla hasar görme eğilimindedir ve bu da yapının genel stabilitesini tehlikeye atar. Katlar arasında dolgu duvarların düzenli, sürekli ve sağlam bir şekilde yerleştirilmesi rijitlik ve dayanımın dengeli dağılımını sağlar.

1.3.1.2. Burulma Etkisi

Yapılarda burulma etkisi, kütle ve rijitlik merkezlerinin çakışmaması durumunda, deprem gibi yatay yükler altında yapının dönme hareketine maruz kalmasıdır. Bu durum, yapı elemanlarında beklenmedik gerilmelere ve hasarlara yol açabilir. Dolgu duvarların yapıda düzensiz dağılımı, zayıf yapıları ve kötü işçilik ile birlikte rijitlik merkezinin kaymasına neden olarak burulma etkilerini artırabilir. Özellikle, bir cephesi dolgu duvar ile kapalı olan yapılar üzerinde yapılan çalışmalar, dolgu duvarların rijitlik ve periyot gibi yapısal davranışları etkilediğini göstermiştir. Dolgu duvarların dikkate alınmadığı durumlarda analiz sonuçlarının gerçek değerleri temsil etmediği deneysel çalışmalar sonucunda belirlenmiştir (Bal, 2018) . Burulma etkilerini azaltmak için katlar arasında dolgu duvarların düzenli, sürekli ve sağlam bir şekilde imal edilmesi gerekmektedir.

1.3.1.3 Kısa Kolon Etkisi

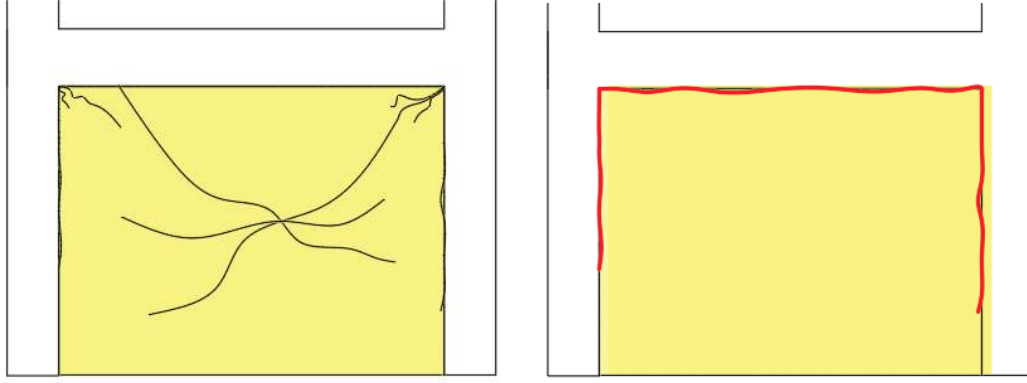
Kısa kolon etkisi, kolonların yüksekliğinin az olması veya mevcut yüksekliğinin kısmen sınırlandırılması durumunda ortaya çıkan bir olumsuzluktur. Bu durum yük faktörünü ve deplasman kapasitesini azaltarak kolonlarda daha büyük kesme kuvvetlerine yol açar ve kolonun beklenenden daha erken hasar almasına ve göçmesine neden olabilir (Caglar ve Mutlu, 2009). Dolgu duvarlar kısa kolon etkisine sebep olan başlıca

nedenlerden biridir. Dolgu duvarlar kolonların duvar yüksekliğine kadar olan kısmını sınırlayarak (kolona bitişik pencere boşlukları, havalandırmalar, görsel amaçlı boşluklar vs.) üst kısımda kalan serbest bölgenin daha erken ve hızlı hasar almasına neden olur. Bu durum, kolonun kısa kolon etkisine maruz kaldığı anlamına gelir (Yadollahi ve ark., 2016) . Dolgu duvar kaynaklı kısa kolon etkisinin en aza indirilmesi için katlar arasında dolgu duvarların düzenli ve sürekli bir şekilde yerleştirilmesi, rijitlik ve dayanımın dengeli dağılımını sağlar. Tüm olumsuzluklara karşı güçlendirilmiş bir dolgu duvarda kısa kolon etkisi minimize edilebilir.

1.3.2. Dolgu duvarlarda oluşabilecek hasarlar ve göçme biçimleri

Dolgu duvarlarda meydana gelebilecek hasar ve göçmeler birçok nedene bağlıdır, bunlar; çerçevenin veya duvarın yanal rijitliği, bunların bileşenleri ve boyutları, kullanılan malzemenin dayanımı, duvarın örülme şekli, duvarın çerçeve ile etkileşimi, deprem gibi dış etkenlerdir.

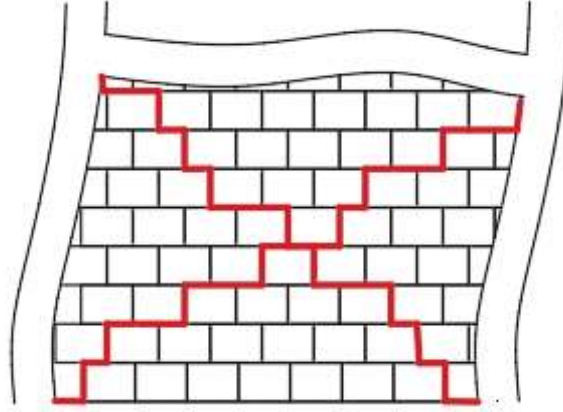
Betonarme yapılarda hasarlar öncelikle sıva çatlaklarıyla başlamaktadır. Yapının temelde veya taşıyıcı elemanlarda farklı oturma yapması durumunda, deprem, rüzgar veya titreşim gibi dinamik yükler altında duvarlarda gerilmeler oluşur ve bunlar sıva çatlaklarına yol açabilmektedir (Şekil 1.9.) (Döndüren, 2008). Farklı genleşme katsayılarından dolayı özellikle yapısal eleman ve duvar birleşim bölgelerinde sıva çatlakları oluşabilmektedir. Yine malzeme uyumsuzluğundan kaynaklanan aderansın yetersizliği durumunda da sıva çatlakları görülebilmektedir. Ayrıca işçilikten kaynaklanan; çok ince sıva tabakası kururken hızlı su kaybedeceği için büzülme çatlakları oluşabilmekte, tam tersi tek seferde çok kalın sıva uygulanması yapmak ise iç kısmın yavaş, dış kısmın hızlı kurumasına neden olmakta ve bu durumda çatlamalara yol açabilmektedir. (Türk Standartları Enstitüsü, 2007; Tayanç ve Erdil, 2020)



Şekil 1. 9. Dolgu duvarlarda meydana gelen sıva çatlağı model çizimi.

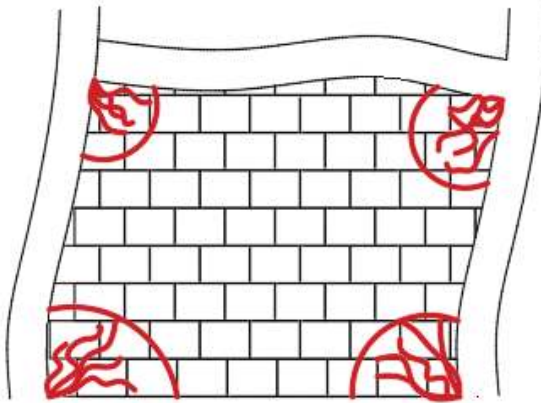
Diyagonal çatlaklar dolgu duvarlarda görülen ve özellikle köşelerden başlayıp çapraz şekilde oluşan çatlak biçimidir. Genellikle rüzgar veya çok şiddetli olmayan deprem gibi yatay yükler dolgu duvarlarda diyagonal basınç gerilmelerine neden olur, bu gerilmeler duvarın diyagonalı boyunca yüksek basınç kuvvetleri oluşturur ve bu kuvvetler duvarda çekme çatlaklarının meydana gelmesine yol açar. Bu durum, dolgu duvarların düzlemi içinde yatay yük altında diyagonal doğrultuda yüksek basınç gerilmelerinin artarak transfer olmasına ve duvarda çekme çatlaklarının oluşmasına neden olmaktadır (Kaplan, 2008). Bu çatlaklar, duvarın kesme dayanımının yetersiz olması veya yapı elemanlarıyla bağlantısının zayıflaması sonucunda da meydana gelebilmektedir. Dolgu duvarların rijitliğe olan katkısı da dikkate alınmalıdır. Deprem kuvvetlerinin genliğinin büyümesi ve dolgu duvarda çatlak oluşması ile birlikte yapıların titreşim periyotları uzamakta ve yapının salt taşıyıcı çerçeve sistemi dikkate alınarak hesaplanmış periyoduna yaklaşabilmektedir (Bayülke, 2003) .

Kayma göçmesi, dolgu duvarların deprem etkisiyle birlikte çerçeve elemanları arasında sıkışarak çapraz yönlü kesme gerilmelerine maruz kalması sonucu oluşan kırılma türüdür. Bu durumda, dolgu duvar üzerinde genellikle karşılıklı köşelerden başlayan çatlaklar meydana gelir. Özellikle kuvvetli çerçeve ve zayıf harç tabakasının kullanıldığı dolgu duvarlı sistemlerde gerilme transferi daha ani ve düzensiz olur; bu da kırılma bir hasar mekanizmasına yol açar. Harç derzleri boyunca çatlama, tuğlaların yer değiştirmesi ya da düşmesiyle sonuçlanan yerel göçmeler gözlemlenebilir. Bu tür hasarlar kolonlardaki kesme kuvveti ve eğilme momenti değerlerini büyütür, yapının yatay rijitliğini zayıflatır ve ilerleyen deprem yüklemelerinde daha büyük yapısal hasarlara zemin hazırlar (Toker, 2007).



Şekil 1. 10. Dolgu duvarlarda meydana gelen kayma göçmesi modeli (Toker, 2007).

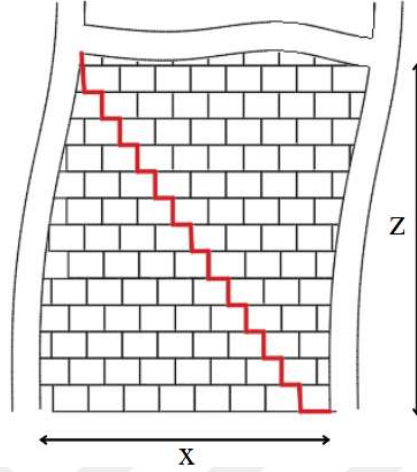
Ezilme göçmesi, deprem sırasında diyagonal gerilmelerin belirli bölgelerde (özellikle dolgu duvar köşelerinde) yüksek değerler alması ile birlikte aşırı sıkışarak ezilmesiyle ortaya çıkar. Bu durumda, rijit kolonların ve kirişlerin birleşim bölgelerinin zayıf olması sebebiyle genellikle duvarın köşe bölgelerinde tuğla, briket veya gazbeton gibi gevrek malzemeler ufalanır ve ezilme izleri bırakır. Özellikle rijit çerçevelerle birlikte çalışan dolgularda, yüklerin küçük alanlara odaklanması bu kırılma ezilme mekanizmasını hızlandırır, eğer çerçeve elemanları da zayıf ise çatlaklar bu elemanlarda da oluşabilmektedir. Ezilen bölgelerde çekme çatlakları da eşlik edebilir; bu durum duvarın enerjiyi emme kapasitesini büyük ölçüde düşürür ve beklenen göçmeler daha hızlı gerçekleşebilir (Toker, 2007).



Şekil 1. 11. Dolgu duvarlarda meydana gelen ezilme göçmesi modeli (Toker, 2007).

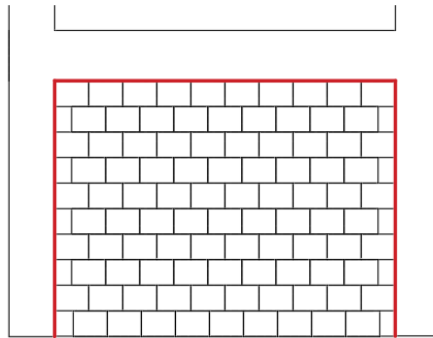
Dolgu duvarlarda eğilme-çekme kırılması, genellikle düzlem dışı yükler (örneğin deprem sırasında duvarın dışa doğru itilmesi) etkisiyle meydana gelen bir hasar türüdür. Bu kırılma biçimi dolgu duvarlı çerçevelerde yükseklik/genişlik oranının büyük olduğu durumlarda ortaya çıkan, duvarın bir bölgesi moment etkisi altında eğilmeye zorlanırken karşı tarafında çekme gerilmeleri meydana gelen bir kırılma şeklidir (Akkuzu, 2007).

Özellikle çekme dayanımı az olan (tuğla, biriket) gibi dolgu malzemelerinin bulunduğu duvarlarda genellikle duvarın ortasından başlayan ve giderek genişleyen çatlakların bir süre sonra duvarı ikiye ayırması ve duvarın göçmesiyle sonuçlanabilir.



Şekil 1. 12. Dolgu duvarlarda meydana gelen eğilme-çekme kırılması modeli (Akkuzu, 2007).

Düzlem dışı tek parça halinde göçme türü, dolgu duvarın taşıyıcı çerçeveye yeterince sabitlenmemiş ya da çerçeve ile arasında boşluk bırakılmış olması durumunda meydana gelir. Deprem gibi yatay kuvvet etkilerinde, duvarın yüzeyine gelen itici kuvvet, duvarın üst veya alt kısmını dışa doğru devirerek yapıyla olan bağlantısını koparır. Eğer duvar, üst veya yan kenarlarından yapısal olarak sabitlenmemişse veya duvar ile çerçeve arasındaki harç dayanımı olması gerekenden zayıf olması durumunda tüm panel tek parça halinde devrilerek düşebilir. Bu durum can güvenliği açısından ciddi problemler yaratabilir.



Şekil 1. 13. Dolgu duvarlarda düzlem dışı tek parça halinde göçme modeli (Bayrak, 2020).

Yapısal sistemlerde taşıyıcı elemanlar ile dolgu duvarlar arasındaki etkileşimden kaynaklanan olumsuzlukları minimize etmek amacıyla çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu doğrultuda, enerji sönümleyici bağlantı elemanlarının kullanımı yapıya etki eden yükleri belirli ölçüde azaltabilmektedir. Ayrıca, daha hafif yapı malzemelerinin tercih edilmesi veya dayanımı diğer malzemelere kıyasla daha yüksek olan yapı elemanlarının kullanımı da alternatif çözümler olarak değerlendirilmektedir. Bununla birlikte, söz konusu yaklaşımlar kesin çözümler sunmamakta; maliyet artışı, estetik kaygılar ve daha fazla kimyasal içerik kullanımı gibi ek zorluklara sebep olabilmektedir. Bu nedenle, yapı malzemesi seçiminde ve bağlantı sistemlerinin tasarımında, sadece mekanik performans değil, aynı zamanda çevresel ve ekonomik faktörler de dikkate alınmalıdır (Bui ve ark., (2025).

Bu olumsuz örnekler araştırılırken ve çözüm yöntemleri aranırken literatürde birçok bilimsel çalışma yapıldığı görülmüştür. Jalaefar, A ve ark (2020) yılında yaptıkları çalışmada dolgu duvarın betonarme çerçevelerdeki sismik davranışa etkisini incelemiştir. Çerçeve sistemlere ana ve artçı şoklar uygulanmış ve sonucunda dolgu duvar kullanılan betonarme çerçevelerde sünekliğin ve enerji sönümlemenin azaldığı belirlenmiştir. Dolgu duvarlı çerçevelerde duvarların yıkılmasından dolayı ani mukavemet kayıplarının ortaya çıktığı literatürde ifade edilmiştir (Jalaefar ve Zargar, 2020). Ayrıca çelik çerçevelerde yapılan analizlerde de dolgu duvarların çerçeve sistemde sünekliği azalttığı tespit edilmiştir (Shan ve ark., 2019). Sancioğlu ve ark. (2022) yılında yaptıkları çalışmada düşey delikli tuğla ve gazbeton duvar malzemelerini dikkate alarak ve çerçeve sistemlerdeki konumlarını değişken parametresine ekleyerek yatay deplasman, göreceli kat ötelemeleri, dayanım, yatay ve düşey yük analizleri yapmışlardır. Sonuç olarak iki malzemenin de düşey yük kapasitesini arttırmasının yanı sıra yatay deplasmanları her iki yönde de azalttığı, rijitliği arttırdığı ve periyotları azalttığını görmüşlerdir (Sancioğlu ve ark., 2022).

Oreiby ve ark. (2022) farklı yükseklikler ve dolgu oranları ile katlardan dolguları ayrı kombinasyonlarla çıkararak çerçeve sistemin performansını incelemiş ve sonuç olarak dolgu duvarların kısa kolon etkisi, yumuşak kat etkisi ve deprem yükü altında burulmalar gibi istenmeyen etkilere yol açtığını görmüşlerdir (Oreiby ve ark., 2022). Kısa kolon etkisinin görülebileceği betonarme sistemlerin dışında dolgu duvarların uygulandığı diğer bir çerçeve sistem olan çelik sistemlerde de benzer etkiler görülmektedir. Dolgu duvarların çelik çerçeveler üzerindeki etkisini araştıran Bayrak, O. ve ark. (2018) dolgu duvarların düşey ve yatay doğrultularda asimetrik olarak

yerleştirilmesinin yumuşak kat ve burulma gibi bazı düzensizliklere yol açabildiğini belirlemişlerdir (Bayrak ve ark., 2018). Bu araştırmalardan da görülmektedir ki dolgu duvarların yapısal sistem üzerinde düşey yük kapasitesini, rijitliği ve dayanıklılığı arttırmak, izolasyonu sağlamak gibi olumlu etkileri olsa da özellikle deprem yükü başta olmak üzere sismik yükler altında yapının sünekliğini azaltması, enerji sönümlemesini, yatay deplasmanları, yapı periyotlarını azaltması ve değişken ön görülemeyen mod şekilleri oluşturması, kısa kolon ve yumuşak kat etkisi ortaya çıkarması, burulmalar gibi bazı düzensizliklere yol açabilmesi gibi olumsuz etkileri ortaya çıkabilmektedir. Tüm bu olumsuzluklara ek olarak uygulamada duvar imalatında yaşanan işçilik, malzeme kalitesi, birim elemanlar arasındaki harç kalınlıkları ve kalitesi, duvarlar yüzeyine uygulanan sıva işçiliğinin kalitesi gibi etkiler, çatlak oluşumları, çatlakların ilerlemesi, kırılmalar, dökülmeler, taşıyıcı sistemden ayrılmalar, kopmalar gibi olumsuzluklar görülebilmektedir.

Bu kapsamda mevcut duvarlarda güçlendirme teknikleri uygulanmaktadır. Bu güçlendirme teknikleri arasında daha modern, sağlıklı, dayanımı ve dayanıklılığı yüksek ve yeni bir beton türü olan ECC ile güçlendirme tekniği, günümüzde üzerinde yoğun bir şekilde çalışılan ve gelecek vadeden bir güçlendirme yöntemi olarak görülmektedir. Bu tez kapsamında, yapısal sistemlerde dolgu duvarlar açısından karşılaşılan olumsuzlukları ortadan kaldırmak veya minimize etmek amacıyla kapsamlı bir araştırma yürütülmüştür. Öncelikle konuya ilişkin detaylı bir literatür taraması gerçekleştirilerek mevcut çalışmalar incelenmiş ve ECC betonun mekanik parametreleri belirlenmiştir. Bu amaç doğrultusunda çeşitli deneyler yapılmış ECC betonun dayanım ve deformasyon karakteristikleri analiz edilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, dolgu duvarlarda güçlendirme tekniği olarak ECC betonun kullanımına yönelik analitik ortamda kapsamlı incelemeler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonuçlarının, ECC betonun yapısal performansa katkısını ortaya koyması, modern inşaat mühendisliği uygulamalarında kullanım potansiyelini değerlendirmeye yönelik önemli bir kaynak sağlaması hedeflenmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. ECC Beton ve Yapısal Tasarımda Kullanımı

Bu tez kapsamında, dolgu duvarların yeni tasarımında veya güçlendirilmesinde yenilikçi yaklaşımların uygulanabilirliği araştırılmıştır. Bu kapsamda ilk olarak mevcut dolgu duvarların güçlendirilmesinde veya yeni dolgu duvarların inşasında uygulanması planlanan ECC beton üzerinde yapılan önceki çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu inceleme sürecinde, ECC betonun hazırlanma yöntemleri, içerik özellikleri, uygulama teknikleri ve yapısal tasarımdaki farklı kullanım çeşitleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Literatür taraması aşamasında, güncel kaynaklardan yararlanılarak yapılan araştırmalar sonucunda önemli ve ilgili görülen çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

Özkan (2012) çalışmasında depreme karşı zayıf yapılara diğer güçlendirme yöntemlerine alternatif olarak daha ekonomik bir güçlendirme yöntemi ortaya koymayı amaçlamıştır. Çalışmada 10 adet 755x755 mm ölçekli bölme duvar numunesi ve düşük dayanımlı, kirişlerin kolonlardan güçlü olduğu 6 adet 1/3 ölçekli, tek açıklıklı, tek katlı betonarme çerçeve numunesi üretmiştir. Bu numunelerden bazılarını cam lif takviyeli çimento esaslı kompozit ile güçlendirmiş ve güçlendirilmeyen şahit numunelerle karşılaştırmıştır. İlk aşamada dolgu duvarları diyagonal kayma etkisinde denemiştir. Numunelerin kayma dayanımı ve rijitliklerini incelemiş ve çimento esaslı kompozit ile güçlendirilmiş numunelerin şahit numunelere göre kayma gerilmesi, kayma şekil değiştirmesi ve kayma modüllerinde ciddi artışlar olduğunu görmüştür. İkinci aşamada ise çerçeve numuneleri tekrarlı yatay yükler etkisinde denemiş ve güçlendirilmiş numunelerde yatay yük-tepe yer değiştirmesi eğrileri, zarf eğrileri; başlangıç rijitliği ve yatay yük taşıma kapasitelerinin şahit numunelere kıyasla oldukça olumlu sonuçlar elde edildiğini belirtmiştir (Özkan, 2012).

Gür (2017), tarafından gerçekleştirilen başka bir çalışmada mevcut duvarların ve yeni yapılacak yapıların deprem performansının güçlendirilmesi ve iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Çalışmada 9 adet 760x760 mm ölçekli bölme duvar numuneleri üretilmiş ve numunelerin bazıları PVA (Polyvinyl Alcohol) ve cam lif içerikli iki farklı takviyeli çimento esaslı kompozit ile güçlendirilmiştir. Güçlendirme işlemi önce üretilen kompozit betonun tuğla ile örülmüş numunelere yapıştırma şeklinde uygulanmıştır. Bazı duvarlarda tek yüzeye, bazı duvarlarda iki yüzeye de uygulanmıştır. Cam lifli tekstil içerikli kompozit plakaların PVA tekstil içerikli plakalara göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Deneyler sonucunda kompozit plakalar ile güçlendirilen bölme duvar

numunelerinin kayma dayanımı değerleri şahit numunelere kıyasla %19 ila %90 artış göstermiştir. Bu sonuçlar dikkate alındığında mevcut yapının rijitliğinin ve yatay yük taşıma kapasitesinin önemli derecede artacağı ön görülmüştür. Ayrıca kompozit güçlendirme plakalarının beklenen seviyelerde çalışarak yük taşıdığı ve sargı etkisiyle bölme duvar numunelerinin göçme sonrası dağılmasını engellediği belirlenmiştir. Ek olarak ülkemizde gelişen teknoloji ve sanayi ile de bu güçlendirme uygulamasının daha ekonomik bir uygulama haline gelebileceği belirtilmiştir (Gür, 2017).

Özkaynak (2010), dolgu duvarları karbon lifli polimerler (CFRP) ile sargılanmış betonarme çerçevelerin yatay yükler etkisindeki 22 adet 1/3 ölçekli tek katlı ve tek açıklıklı yalın, dolgu duvarlı ve güçlendirilmiş dolgu duvarlı betonarme çerçeve numuneleri statik ve dinamik yüklere benzeştirilen deney teknikleri kullanılarak deprem davranışını incelemiştir. Elde edilen sonuçları rijitlik, dayanım, süneklik, enerji tüketme kapasitesi, yapısal sönüm ve hasar gelişimleri açısından değerlendirmiştir. Statik ve benzeşik dinamik deney sonuçlarına göre güçlendirilmiş dolgu duvarların enerji sönümlemesinin arttığı görülmüştür. Göreli kat ötelemesi %1 düzeyine eriştiğinde CFRP şeritlerde kabarmalar ve çatlaklar tespit edilmiş, sonrasında numunelerde dayanım azalması başlamıştır. Genel olarak uygun biçimde CFRP ile güçlendirilen dolgu duvarlarda dayanım, rijitlik ve enerji tüketim kapasitesindeki artış belirtilmiştir (Özkaynak, 2010).

Fayu Wang ve ark. (2021), sismik direncin yükseltilmesini sağlamanın bir yolunun, kumaş takviyeli kompozit beton sisteminin mevcut yığma dolgu duvarlara uygulanarak rijitlik ve bütünlüklerinin artırılmasını sağlamak olduğunu savunmuş ve 23 malzeme performans testi, kuru kumaş ve kompozitlere 15 doğrudan çekme testi ve matris ile tuğla duvar arasında 30 kesme testi içeren bir dizi deney gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak gerilme mukavemetinin yük transferinden etkilendiğini görmüştür. Çekme mukavemeti ve kesme mukavemetinin sadece harcın mukavemeti ile değil, aynı zamanda genel matrisin mukavemeti ile de belirlendiğini vurgulamıştır. Ek olarak harç bloklarının eğilme dayanımı, çekme dayanımı ve kırılma sonrası çekme dayanımının, basınç dayanımına sırasıyla %11,03, %3,06 ve %2,90'ı kadar olduğunu göstermiştir (Wang ve ark., 2021).

Sharbatdar ve ark. (2021) betonarme çerçeve aralarındaki yarı statik yüklemeye maruz kalan, sünek olmayan, donatısız, boşluklu kil tuğla ile örülmüş yığma dolgu duvarlar için çimento esaslı kompozitlerin (ECC) güçlendirme tekniğinin performansını değerlendirmeyi amaçlamışlardır. Çalışmada bir tane çerçeve dolgu duvarsız, bir tane

çerçeve güçlendirilmemiş dolgu duvarlı, bir tane tek tarafı ECC kaplama ile güçlendirilmiş dolgu duvarlı ve bir tane de her iki tarafı ECC kaplama ile güçlendirilmiş olacak şekilde dört adet 1/3 ölçekli, tek katlı, tek açıklıklı betonarme çerçeve imal etmişlerdir. Yapılan testler sonucunda güçlendirilmiş duvarlarda; daha yüksek yanal yük kapasitesi elde edilmiş, rijitlik ve enerji sönümleme kapasitesi sağlanmış, gevrek göçme önlenmiş ve dolgu duvarın kısmen bütünlüğü korunmuş, güçlendirilmiş numunelerin yer değiştirme süneklik faktörü %50'ye kadar azalmış, aynı zamanda kuvvet azaltma faktörü ve dayanım faktörü artmıştır (Sharbatdar ve Tajari, 2021).

Li, Y. ve ark. (2018) yaptıkları çalışmada, iki tip ECC malzemesini yığma dolgu duvarlar üzerine harç şeklinde uygulamışlardır. Güçlendirilmemiş ve ECC ile güçlendirilmiş yığma yapıların sismik performansı tersinir tekrarlı yükleme testi ile değerlendirmişlerdir. Sonuç olarak ECC' nin yığma dolgu duvarlara uygulanmasının yapının nihai taşıma kapasitesini, sünekliğini, rijitliğini ve kümülatif enerji dağılımını iyileştirebileceğini göstermişlerdir. Ayrıca tek tarafı ECC ile güçlendirilmiş yığma yapı ile karşılaştırıldığında, her iki tarafı ECC ile güçlendirilmiş yapının süneklik, nihai taşıma kapasitesi, kümülatif enerji dağılımında daha iyi iyileşmenin oluştuğunu savunmuşlardır (Y. Li ve ark., 2019).

Mercedes ve ark. (2020) çalışmalarında, yığma duvarları güçlendirmek için kumaş takviyeli çimentolu kompozitler esas alarak 10 tane 100x90 cm boyutlarında duvarlar üretmiş ve epoksi kullanılarak birleştirilen farklı içerikli malzemelerle ve harçlarla duvarları farklı varyasyonlarla güçlendirmişlerdir. Bu duvarlar döngüsel yükleme altında test edilmiştir. Sonuç olarak tüm güçlendirme çözümleri, güçlendirilmemiş duvarlara kıyasla kesme mukavemeti kapasitesini ve enerjiyi dağıtma kabiliyetini önemli ölçüde artırmış, ayrıca güçlendirilmiş tüm duvarlar çok çatlaklı bir davranış sergilemiş ve %300'e varan iyileşme elde edilmiştir. Bitkisel çözümler, cam ve kumaş takviye ile güçlendirilmiş duvarlara kıyasla üstün verimlilik sağlamış ve ayrıca daha büyük hacimde bitkisel liflerin kullanılması çimento tüketimini azaltmış ve sürdürülebilir bir çözüm sağlayabildiği savunulmuştur. Ayrıca diğer numunelere kıyasla bitkisel çözümlerde sertlik, sönümleme, deformasyon ve hasar indeksi bozulma özellikleri daha verimli bir şekilde gelişmiştir (Mercedes ve ark., 2020).

Dönmez (2021), doktora çalışmasında deprem etkilerinde mevcut hasarlı duvarların çimento esaslı tekstil kompozitlerle iyileştirme yöntemlerinin deneysel ve nümerik olarak geliştirilmesi ve bölme duvarlara sünek davranış kazandıracak yenilikçi bölme duvar tasarımı üzerine araştırmalar yapmıştır. Kesme hasarı bulunan duvarların

yüzeyine uygulanan tekstil takviyeli ve PVA kısa fiber içerikli ECC harcın, tekrarlı yatay yük etkisindeki bu hasarlı duvarların yük taşıma kapasitesi, rijitlik ve süneklik değerleri üzerindeki etkileri ortaya koyulmuştur. Hasarlı duvar yüzeylerine uygulanan bazalt tekstil takviyeli PVA fiber içerikli ECC harcının beton blok duvarlarla tuğla duvarlara göre daha iyi bağ dayanımı ve aderans gösterdiği görülmüştür. Hasarlı tuğla duvar yüzeyine uygulanan tekstil takviyeli kompozit malzemenin tekrarlı yükler altında duvar yüzeyinden ayrıştığı belirlenmiştir. Kesme hasarı almış duvarların iyileştirilmesinde duvar yüzeyinde tekstil bazlı kompozit malzeme kullanmanın diyagonal kesme kapasitesini arttırdığı ve duvarın daha zayıf noktası olan duvarın temelle birleşim bölgesinde hasarın oluşmasına sebep olduğu tespit edilmiştir. Tekstil ve kısa fiberlerin birlikte kullanıldığı ECC ile iyileştirilmiş duvarlarda deprem gibi yatay yüklerde daha yüksek yük taşıma kapasitesi ve sünek davranış kazandırıldığı ifade edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre yazar, tekstil takviyeli ECC' lerin hasarlı duvarları iyileştirmede FRP ile uygulanan iyileştirme yöntemlerine göre iyi bir alternatif olabileceği göstermiştir (Dönmez, 2021).

Fedakar (2023), tez çalışması kapsamında betonarme kirişlere ECC harç malzemesini doğrudan bir güçlendirme uygulaması olarak değil, lokasyonel olarak ve kirişin kritik bölgelerinde uygulanmasıyla performansa katkısını incelemiştir. Bu amaçla tam ölçekli 8 adet 250 mm genişlik, 500 mm derinlik ve 3200 mm net açıklığa sahip betonarme kiriş üretilip dört noktalı eğilme yükü altında test edilerek yük-sehim ilişkisi, moment-eğrilik ilişkisi, düktilite, tüketilen elastik ve plastik enerji, sehim davranışı, kırılma davranışı, çatlak genişlikleri ve şekli incelemiştir. Uygulama, kirişin açıklık bölgesine ve mesnet bölgesine olacak şekilde 2 şekilde yapılmıştır. Açıklık bölgesinde: ECC uygulamasında gevrek davranış görülmüş, ECC sayesinde elastik bölgedeki dayanım artmıştır. Düktilite indeksi akma noktasındaki sehim değerinin artmasıyla azalmış, nihai sehim değerinin azalmasıyla da doğru orantılı şekilde azalmıştır. Toplam enerji tüketiminde azalma meydana gelmiştir. Mesnet bölgesindeki uygulamada ise akma yükü azalmış fakat toplam enerji tüketimi ise önemli derecede artmıştır (Fedakar, 2023).

Qin, F ve ark. (2020), yüksek dayanımlı-yüksek süneklik özelliğine sahip polimer takviyeli mühendislik ürünü çimento esaslı kompozitlerle güçlendirilmiş betonarme kirişlerin eğilme performansını incelemişlerdir. 2 metre uzunluğunda, 30 cm yüksekliğinde ve 20 cm genişliğinde; bir tane şahit, ECC kalınlıkları ve boyuna donatı oranının değişkenlik gösterdiği 6 adet güçlendirilmiş betonarme kiriş hazırlamış ve dört noktalı eğilme deneyi ile eğilme dayanımlarını test etmişlerdir. ECC uygulaması önce

normal beton, ardından ECC katmanının döküldüğü katmanlı döküm yöntemi ile uygulanmıştır. Nihai yüklemeye ulaşıldığında ECC kaplamalı kirişlerde lokalize çatlaklar yerine çekme bölgesinde mikro çatlaklar gözlemlenmiştir. ECC kaplama kullanılan kirişlerde çatlama yükü, akma yükü, nihai yükü iyileşmiş, aynı zamanda süneklik ve enerji yutma kapasiteleri gelişmiştir (Qin ve ark., 2020).

Wu, J. (2023) çalışmasında ani yüklemeye maruz kalan betonarme yapılarda hasarı azaltmak ve betonarme elemanları güçlendirmek için polietilen (PE) elyaf katkılı çimento esaslı kompozit (ECC) kullanımını incelemiştir. Öncelikle ECC' nin mekanik özellikleri incelenmiş, sonrasında ise kirişlerde ani yük tepkisini araştırmak için 100x10x10 cm ebatlarında bir tane şahit betonarme numune ve sadece kirişin alt kısmına uygulanacak şekilde çoklu ayrı katmanlar yöntemiyle farklı kalınlıklardaki üç adet ECC takviyeli kirişlerin modelleri oluşturulmuş ve ağırlık düşürme testi uygulanmıştır. Sayısal sonuçlar, ECC takviyeli betonarme kirişlerin ani yükleme direncinin performansının önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Bu yöntemin kiriş üzerindeki tepkiyi ve hasar derecesini önemli derecede azalttığı, enerji dağılımını iyileştirdiği ve ani yükü ve aktarılan yükü belirli seviyelerde kontrol ettiği belirlenmiştir. Ayrıca çoklu ECC katmanı yöntemi ile çatlak yayılımı önemli derecede önlenmiş, elemanın bütünlüğü korunduğu ve ani yük direncinde gelişme gözlemlendiği ifade edilmiştir (Wu, 2023).

Ismail, M. ve Hassan, A. (2021) çalışmalarında betonarme kirişlerde onarım malzemesi olarak fiber takviyeli çimento esaslı kompozitlerin (FRCC) kullanımının eğilme kapasitesi, çatlama davranışı, kırılma modu, süneklik ve enerji yutma kapasitesi açısından gelişmelerinin değerlendirilmesini amaçlamıştır. Bu kapsamda 1960x250x250 mm ebatlarında bir adet şahit numune, bir adet tamamı polivinil alkol (PVA) elyafı ECC numune, bir adet tamamı çelik elyafı ECC numune, bir adet basınç bölgesindeki 85 mm kalınlığındaki normal betonun PVA-ECC ile değiştirilmiş numune, bir adet çekme bölgesindeki 85 mm kalınlığındaki normal betonun PVA-ECC ile değiştirilmiş numune, bir adet basınç bölgesindeki 85 mm kalınlığındaki normal betonun çelik lifli ECC ile değiştirilmiş numune, bir adet çekme bölgesindeki 85 mm kalınlığındaki normal betonun çelik lifli ECC ile değiştirilmiş numune olacak şekilde toplamda 7 adet numune üretmiştir. Sonuç olarak PVA-ECC ve çelik lifli ECC kirişlerinin, şahit numuneye kıyasla önemli ölçüde gelişmiş bir eğilme performansı gösterdiğini ortaya koymuştur. Şahit numunenin basınç bölgesinde PVA-ECC veya çelik lifli ECC ile onarılması, tam döküm şahit kirişe kıyasla nihai yük, süneklik ve enerji yutma kapasitesinin iyileştirilmesine açıkça katkıda bulunduğu belirlenmiştir. Çekme bölgesindeki onarım

değerlendirildiğinde ise çatlakların başlamasını ve yayılmasını kontrol etmeye katkıda bulunmuş, böylece daha iyi dayanıklılık performansı sağlanmıştır. Bu sonuçlar çelik elyafı ile iyileştirilen kirişlerde daha belirgin ortaya çıkmıştır (Ismail, M. ve Hassan, A., 2021).

Shanour ve ark. (2018), yaptıkları bir çalışmada iki farklı boyuna donatı yüzdesi ve değişken hacim oranlarında polivinil alkol (PVA) ve polipropilen lif (PP) takviyeli çimento esaslı kompozitler (ECC) kullanarak kirişlerin dört noktalı yükleme testi altında eğilme davranışını incelemişlerdir. Bunun için 115x280x1850 mm ebatlarında ikisi şahit numune olacak şekilde kirişler üretmişlerdir. ECC'leri ise kirişin çekme bölgesindeki 100 mm-200 mm veya kirişin tamamında olacak şekilde kullanmışlardır. Sonuç olarak; PVA formundaki ECC lifleri, polipropilen PP formundaki liflerden daha iyi performans sergilemiş, lif oranları arttıkça kirişin yük taşıma kapasitesi de aynı şekilde artmış, lifli kirişlerin süneklik faktöründe bariz artış görülmüş, ECC malzemeleri gerinim sertleştirme özelliği göstermiş, bu nedenle beton çatlamadan sonra çekme yükünü sürdürmeye devam etmiş ve taşıma yük kapasitesi artmıştır (Shanour ve ark., 2018).

Öztürk, M. (2011), çalışmasında etriyesiz beton kirişlere 1.0%, 2.0% ve 3.0% hacimlerdeki polipropilen lifler (PP) takviye ederek kirişlerde oluşacak kesme mukavemetini araştırmıştır. Bu araştırma sonucunda PP oranı arttıkça kirişin kesme mukavemeti ve süneklik özelliğinin arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca kirişlerde güç tükenme anının kesme kırılmasından eğilme kırılmasına geçtiği görülmüştür (Öztürk, 2011).

Abdalah, A. N. (2018), çalışmasında hacimsel olarak % 0.5, 1.0, 1.5 oranlarında polipropilen lif (PP) ve çeşitli oranlarda donatı kullanarak 150 x 150 x 850 mm ebatlarında kirişler üretmiş ve kirişlerin süneklik davranışını araştırmıştır. Sonuç olarak PP liflerin betonun basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü gibi mekanik özellikleri iyileştirdiği, çatlak oluşma yükünün arttığı, lif oranının arttıkça ilk çatlak yükü, akma noktası ve nihai yükteki sapma değerlerinde azalma olduğu ve araştırmanın asıl amacı olan süneklik değerinin de lif oranı arttıkça arttığı görülmüştür (Abdalah, 2018).

Yapılan literatür araştırmasından ECC malzemesinin dolgu duvarların güçlendirilmesine yönelik araştırıldığı görülmüştür. Ancak ECC malzemesinin mekanik davranışının analitik olarak modellendiği çalışmalar sınırlıdır. Çünkü ECC malzemesi karışım oranlarına göre mekanik ve fiziksel özellikler çok değişkenlik gösterebilmektedir. Bununla birlikte ECC malzemesinin dolgu duvarların güçlendirilmesinde tuğla duvar

yerine ECC birim elemanların kullanımı, güçlendirmede kullanılan ECC'nin kalınlık optimizasyonu gibi hususlar büyük deprem araştırma merkezlerinde maliyetli ve uzun süren deneysel çalışmaları gerektirmektedir. Tez kapsamında ECC malzemesinin yeni dolgu duvar inşasında birim eleman olarak veya mevcut dolgu duvarların güçlendirilmesinde kullanımı hususları analitik olarak araştırılmıştır. Bu araştırma öncesinde laboratuvar ortamında gerçekleştirilen birçok ECC karışım denemesinden en optimum karışım esas alınarak kiriş deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu kiriş deneyleri sonuçları kullanılarak ECC malzemesinin mekanik davranışı parametrik olarak elde edilmiştir. Mekanik davranışı elde edilen ECC 1/1 ölçekli çerçeve modelleri üzerinde tanımlanarak, bu malzemenin dolgu duvar inşasında kullanımı veya güçlendirmede kalınlık optimizasyonu çerçeve statik itme analizleri ile incelenmiştir. Dolayısıyla ECC'nin yapısal sistem üzerindeki davranışı doğrulanmış teorik modeller üzerinden irdelenebilmiştir. Bu çerçevede ECC'nin yeni dolgu duvar inşasında ve güçlendirmede kullanımı sayısal veriler ile değerlendirilebilmiştir. Güçlendirmede yeterli kalınlık yapılan analizlerle incelenmiştir. Bu iki araştırma başlığı altında gerçekleştirilen deneysel ve analitik çalışmalar tezin özgün yönünü oluşturmaktadır.



3. MATERYAL VE METOT

Çimento Esaslı Kompozitler (ECC), geleneksel betonun sünekliğini arttırmak için geliştirilmiş yüksek performanslı, dayanıklı yapı malzemeleridir. ECC, yüksek çekme dayanımı ve süneklik, çoklu mikro çatlak oluşumu, kendi kendini iyileştirme özellikleri, düşük büzülme ve gelişmiş yorulma direnci özelliklerine sahiptir. ECC bileşenleri temel olarak çimento, kum, su, süper-hiper kimyasal akışkanlaştırıcı ve lifleri (tipik olarak polivinil alkol, polipropilen veya çelik lifler) içerir. Bu noktada, bileşenler ECC'nin davranışı ve sürdürülebilirlik endeksi üzerinde önemli bir faktör olabilir. Ayrıca, uçucu kül, silis dumanı gibi mineral katkıları ve geri dönüştürülmüş beton gibi geri dönüştürülmüş malzemelerin kullanılması sürdürülebilirliği artırır. Bu nedenle, bileşenlerin seçimi sürdürülebilirlik açısından hayati öneme sahiptir. ECC'nin bu benzersiz özellikleri depreme dayanıklı yapılarda, onarımlarda, köprülerde, tünellerde, yüksek binalarda, yol kaplamalarında ve enerji santrallerinde iyi performans göstermesini sağlar. ECC'nin dayanıklılığı, sürdürülebilirliği, yüksek sünekliği ve yüksek performansı nedeniyle gelecekte daha yaygın olarak kullanılması ve çeşitli inşaat uygulamaları için daha güvenli ve daha dayanıklı çözümler sunması ve özellikle düşük karbon salımlı yapılar için iyi bir çözüm olması beklenmektedir. Bu çalışmada öncelikle ECC'nin mekanik özelliklerini elde etmek için laboratuvar ortamında üretilen 150x150x150 mm küp, 40x40x160 mm kiriş, 150x300 mm silindir, 100x180x1200 mm kiriş numuneler üretilip, deneyler yapılmış ve bu deneyler ile basınç dayanımı, eğilme dayanımı, elastisite modülü, gerilme-şekil değiştirme değerleri, kiriş yük-deformasyon davranışı elde edilmiştir. Deneysel verilerle elde edilen parametreler sonrasında ECC'nin mekanik davranışı modellenmiş, bilgisayar ortamında model bir çerçeve üzerinde dolgu duvar inşasında kullanımı veya mevcut çerçevelerin güçlendirilmesinde uygulanması statik itme analizi yöntemi ile araştırılmıştır.

3.1. Kullanılan Malzemeler

Çimento esaslı kompozit üretiminde literatürde birçok malzemenin kullanıldığı görülmüştür. Tez kapsamında sürdürülebilir bir ECC elde edebilmek için atık ve doğal malzeme kullanımı esas alınmıştır. Bağlayıcı olarak çimento kullanılmıştır. Atık malzeme kapsamında atık beton, atık mermer tercih edilmiştir. Doğal malzeme olarak iri ve ince pomza kullanılmıştır. Lif olarak polipropilen lif uygulanmış, karışımda süper

akışkanlaştırıcı belli oranda karışıma eklenmiştir. Bu bölümde karışımda kullanılan tüm malzemelerin özellikleri detaylandırılmıştır.

3.1.1. Çimento

Karışımlarda klinker içeriği azaltılmış CEM I 42.5 R tipi çimento kullanılmıştır. Çimento özellikleri Tablo 3.1.'de verilmiştir. Karışımda kullanılacak çimento türünün hızlı dayanım kazanması ve üretimin hızlı olması talep edilen bir durumdur. Bu çimentonun kullanılmasının nedenleri arasında, 42.5 MPa dayanım sınıfına ve R tipi (erken dayanımlı) özelliğe sahip olması yer almaktadır. Bu, nispeten yüksek mukavemet gerektiren ve potansiyel olarak daha hızlı dayanım gelişimi istenen uygulamalar veya araştırmalar için uygun olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte bu çimento türü özellikle yüksek dayanımlı beton, lif takviyeli çimento esaslı kompozitler, atık agregalı harç ve farklı lif türleri içeren kompozit malzemelerin araştırılması gibi çeşitli alanlardaki deneysel çalışmalarda tercih edilmektedir (Öner, 2013; Sarı, 2013; Daşkiran, 2018; Demir ve ark., 2022). Her ne kadar karışımlarda bu çimento türü kullanılsa da oransal olarak sürdürülebilir bir tasarım için çimento kullanımı oldukça minimize edilmiştir.

Tablo 3. 1. CEM I 42.5 R çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Özellik	Değer
SiO ₂	%20,30
Al ₂ O ₃	%5,98
Fe ₂ O ₃	%3,06
CaO	%63,30
MgO	%1,89
Na ₂ O	%0,43
K ₂ O	%0,95
SO ₃	%3,50
Kızdırma Kaybı	%2,25
Çözünmeyen Kalıntı	%0,52
Özgül Ağırlık	3,14 g/cm ³
İncelik	3684 cm ² /g



Şekil 3. 1. CEM I 42.5 R çimento.

3.1.2. Pomza

Çimento esaslı yapı malzemelerinde mineral katkı olarak kullanılan öğütülmüş pomza üzerine yapılan çalışmalar (Mohammed ve Yaltay, 2024) kapsamında, pomzanın kalsiyum ve sodyum gibi bileşenlerle reaksiyona girmeye elverişli ince partikül boyutuna ve amorf silikat yapısına sahip olduğu belirlenmiştir. Bu özellikleri sayesinde, pomzanın C-S-H, C-A-S-H ve N-A-S-H benzeri jel yapılar oluşturabildiği gözlemlenmiştir.



a)



b)

Şekil 3. 2. a) İnce taneli pomza <0.063 mm, b) İri taneli pomza <2 mm.

Bu avantajlarından yararlanmak amacıyla, çalışmada kullanılan numunelerde pomza tercih edilmiştir. Kullanılan pomza asidik özelliklidir. Bu çalışmada pomza iki

farklı formda değerlendirilmiştir: Mineral katkı amacıyla kullanılan öğütülmüş pomza (<0.063 mm) ve ince agrega olarak kullanılan öğütülmemiş pomza (<2 mm) için fiziksel ve kimyasal özellikler Tablo 3.2.'de sunulmuştur.

Tablo 3. 2. Pomzanın kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Kimyasal özellikleri:

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Kızdırma Kaybı
%72.10	%15.44	%4.08	%1.12	%0.45	%0.01	%4.40	%2.70	%0.07	%2.55

Fiziksel özellikleri:

	Özgül Ağırlık	Su Emme
İri Pomza	2.67 g/cm ³	% 2.57
İnce Pomza	0.90 g/cm ³	% 11.80

3.1.3. Mermer atığı

Numunelerin üretiminde, 0–2 mm tane boyutuna sahip mermer atığı kullanılmıştır. Küresel ölçekte üretilen mermer atığı miktarı, büyük ölçüde yoğun taş ocaklarından ve mermer işleme faaliyetlerinden kaynaklanmakta olup, bu yönüyle dikkatleri üzerine çekmektedir (Mehta ve ark., 2020). Söz konusu işlemler sırasında her bir mermer bloğunun yaklaşık %70'lik kısmı atık hâline gelmektedir (Bilir ve ark., 2022). Bu atıklar; iri parçalar, daha küçük taneler, ince tozlar ve çamur şeklinde çeşitli formlar içermektedir. Taş ocaklarından (mermer, gnays, granit ve benzeri taşlar dâhil olmak üzere) yıllık yaklaşık 316 milyon ton malzeme çıkarıldığı tahmin edilmektedir (Tazzini ve ark., 2024). Mermer endüstrisi, oldukça yüksek düzeyde atık üretimiyle karakterize edilmekte olup, toplam çıktının %70'inden fazlası atık olarak değerlendirilmektedir (Tazzini ve ark., 2024). Bu endüstri, çıkarılan mermer miktarına bağlı olarak, ocak üretiminin yaklaşık %30'u oranında çamur (sludge) formundadır (Tazzini ve ark., 2024). Buna ek olarak, atıkların yaklaşık %15 ila %20'si işleme faaliyetlerinden, %5 ila %7'si ise cilalama işlemlerinden kaynaklanmaktadır. Mermer işleme sektörlerinde, dünya genelinde yaklaşık 200 milyon ton mermer atığı toz veya çamur formunda oluşmaktadır (Tazzini ve ark., 2024). Bu nedenle sürdürülebilirliği desteklemek, mermer atığı için bir geri dönüşüm oluşturmak ve mermerin doğal bir malzeme olmasından da faydalanarak yeşil beton kavramını desteklemek için ECC karışımlarında bir bileşen olarak kullanılmıştır. Mermer atığının kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.3.'te verilmiştir.

Şekil 3.3.' de bu çalışmada kullanılan Kırşehir ilindeki farklı bölgelerde çekilmiş farklı ebat ve çeşitlerdeki mermer atıkları görülmektedir.



Şekil 3. 3. Çeşitli boyutlarda mermer atıkları.

Tablo 3. 3. Mermer atığının kimyasal ve fiziksel özellikleri.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Kızdırma Kaybı	Özgül Ağırlık	Su Emme
%0.43	%0.15	%0.08	%51.86	%0.77	%0.11	%0.04	%0.40	0	%46.11	2.55 g/cm ³	% 2.12

3.1.4. Beton atığı

Doğa kaynaklı afetler, özellikle depremler, altyapı ve üstyapı sistemleri üzerinde ciddi etkiler oluşturan yıkıcı olaylar arasında yer almaktadır. Yapı stoğunun büyük bölümünü oluşturan betonarme yapılar, söz konusu afetlerden doğrudan etkilenmekte; meydana gelen yıkımlar sonucunda ise yoğun miktarda beton bazlı (agrega, çimento hamuru) inşaat ve yıkıntı atığı oluşmaktadır (T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2020; T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı., 2023). Bununla birlikte ülkemizde kentsel dönüşüm çalışmaları devam etmekte olup, birçok yapının

dönüşüm süreci tamamlanmaktadır. Bu kapsamda da beton atığı ortaya çıkmaktadır. Bu atıklar hem çevresel hem de ekonomik açıdan önemli bir sorun teşkil etmektedir (European Environment Agency, 2020). Betonun inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılması nedeniyle, yıllık beton üretiminin (10 milyar tonun üzerinde) önemli miktarda atık oluşturduğu belirtilmektedir (Schepper ve ark., 2013). Bu üretimin yaklaşık %30 ila %40'ının (3-4 milyar ton) fazla sipariş, dökülme ve yıkım gibi nedenlerle atığa dönüştüğü tahmin edilmektedir (Brito ve Saikia, 2013). Beton atığının, yeni bir çimento esaslı malzemede (örn. Beton) kullanımı, iyi bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Çünkü beton, sudan sonra en yaygın kullanılan ikinci akışkan malzemedir (Çakır ve Dilbas, 2021). Yapı malzemesi olarak ürün bileşeni şeklinde kullanılması ve potansiyel kullanım mekanizmalarının geliştirilmesi bu çalışmada hedeflenmiştir. Bu bağlamda, atıkların azaltılması; sürdürülebilir kalkınma hedeflerine ulaşmanın bir yoludur. Atık beton olarak basınç testi uygulanmış ve kullanım amacını tamamlamış yapı laboratuvarlarından çıkan atık küp numuneler çalışmada kullanılmıştır (Şekil 3.4.). Literatürden C25-30 dayanıma sahip beton numune atıklarının kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.4.'te verilmiştir.

Tablo 3. 4. Beton atığının kimyasal ve fiziksel özellikleri.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Kızdırma Kaybı	Özgül Ağırlık	Su Emme
%45.31	%14.80	%6.06	%22.10	%1.10	%2.33	%0.72	%0.77	0%	%6.62	2.20 g/cm ³	% 7.82



a)



b)

Şekil 3. 4. a) Beton atıkları, b) Öğütülmüş beton atığı

3.1.5. Polipropilen lif

Liflerin temel amacı, beton içerisinde homojen olarak dağılarak çatlakların oluşmasını önlemek ve çatlakların beton içerisinde ilerlemesini yavaşlatarak malzemeyi daha dayanıklı hale getirmektir. Polipropilen lifler, özellikle betonun kuruma rötresi çatlaklarını azaltmada ve süneklik ihtiyacını karşılamada etkili bir seçenektir (Yıldırım, 2014). Bu tez kapsamında Concreasy marka MICRO12 adında 12 mm uzunluğunda, %100 saf polipropilen monofilament fiber kullanılmıştır. Liflerin betonun iç ve dış ortam koşullarına karşı çatlama dayanımını artırma, her noktada etkin çatlak kontrolü, yüzey dayanımını artırarak çarpma yükü ve aşınmalara karşı koruma, betonda pasif yangın dayanımı, betonun alkali ortamına karşın %100 dayanıklılık, asit, zemin suyu, deniz suyu ve uzun dönemli korozyon direnci gibi özellikleri bulunmaktadır. Tablo 3.5.'te kullanılan polipropilen lifin özellikleri verilmiştir.



Şekil 3. 5. Polipropilen lif.

Tablo 3. 5. Polipropilen lifin kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Kopma Uzaması	Çekme Mukavemeti	Yoğunluk	Uzunluk	Çap	Erime
15,75%	527 MPa	0,90 g/cm ³	12 mm	20 µm	160 °C

3.1.6. Süper akışkanlaştırıcı

Karışımlarda polikarboksilat esaslı süper akışkanlaştırıcı kullanılmıştır (Şekil 3.6.). Bu ürünün tercih edilme nedenleri:

- Düşük su/çimento oranına sahip beton karışımlarının hazırlanmasına olanak tanınması,
- CO₂ emisyonunu azaltan çevre dostu karışım tasarımlarını mümkün kılması,

- Taze betonun akışkanlığını artırarak yerleştirme kolaylığı sağlaması,
- Priz sonrası beton yüzeyinde estetik ve düzgün bir görünüm elde edilmesine katkı sunması,
- Betonun uzun vadeli dayanımını etkileyen büzülme, sünme, karbonatlaşma ve su geçirgenliği gibi olumsuz etkileri azaltması,
- Düşük enerji gereksinimiyle yerleştirme ve sıkıştırma işlemlerini kolaylaştırması gibi bazı özellikleri olmuştur. Bu özelliklerin yanı sıra kimyasal ve fiziksel özellikleri Tablo 3.6.'da verilmiştir.



Şekil 3. 6. Süper akışkanlaştırıcı.

Tablo 3. 6. Süper akışkanlaştırıcının kimyasal ve fiziksel özellikleri.

Kimyasal ve Fiziksel Özellikler	Açıklama
Donma Noktası	-4°C
Kimyasal Yapı	Polikarboksilat esaslı
Görünüm / Renk	Sıvı, kahverengi
Yoğunluk	1,05-1,09 g/cm ³ , 20°C' de
pH-Değeri	3,00-7,00 (%10 'luk çözelti)
Toplam Klor İyon İçeriği	Maks. %0.1, klorür içermez.

3.2. Malzeme Çalışmaları Yöntemi

Tepki yüzeyi yöntemi, bağımsız değişkenlerin tekil ve etkileşimli parametrelerini incelemeye olanak sağlayan bir optimizasyon tekniğidir. Bu özelliği sayesinde inşaat mühendisliği başta olmak üzere çeşitli akademik disiplinlerde yaygın şekilde

kullanılmaktadır. Söz konusu disiplinlerde, istatistiksel ve matematiksel analiz yöntemleriyle birlikte süreç optimizasyonu ve tahmin modellerinin oluşturulmasında etkili bir araç olarak değerlendirilir. Bu çalışmada deneysel tasarım, tepki yüzeyi yöntemi yaklaşımı ile yapılandırılmış ve elde edilen basınç dayanımı sonuçları, ECC bileşenlerinin karışım oranlarının optimizasyonunda kullanılmıştır (Stat-Ease, Inc., 2024). Merkezi kompozit tasarım ve Box–Behnken Tasarımı sık tercih edilen yaklaşımlar olmakla birlikte, bu çalışmada numune sayısının azaltılmasını sağlayan Box–Behnken Tasarımı tercih edilmiştir. Toplamda 49 farklı karışım tasarlanmış olup, ilgili karışım oranları Tablo 3.7.’de sunulmuştur. ECC üretiminde kullanılan malzeme bileşenleri ve birim hacime düşen oranları şu şekildedir: Çimento (434–976 g/cm³), su (195–490 g/cm³), beton atığı (152–380 g/cm³), mermer atığı (86–260 g/cm³), iri pomza (31–93 g/cm³), ince pomza (31–93 g/cm³), polipropilen lif (8–32 g/cm³) ve süper akışkanlaştırıcı (0–15 g/cm³). Karışım bileşenlerinin dağılımı Şekil 3.7.’de görselleştirilmiştir.



Şekil 3. 7. ECC karışım bileşenlerinin dağılımı.

Tablo 3. 7. Box–Behnken tabanlı ECC karışım tasarımı (birimler kg/m³ cinsindendir).

(Stat-Ease, Inc., 2024)

Karışım	Çimento	Su	İnce Pomza	İri Pomza	Mermer Atığı	Beton Atığı	Polipropilen Lif	Süper Akışkanlaştırıcı
1	1242	220	40	40	330	338	25	8
2	977	239	43	43	239	526	44	5
3	1431	101	46	46	380	390	29	15
4	1089	267	72	72	267	235	31	5
5	1150	197	51	51	282	434	32	10
6	1480	183	24	24	262	403	12	10
7	891	248	32	32	355	546	16	10
8	938	230	62	62	230	506	26	5
9	1362	241	43	43	120	371	28	5
10	1308	224	29	29	160	494	15	10
11	1089	107	72	72	267	587	31	10
12	1140	196	75	75	140	430	51	15
13	1160	199	77	77	142	438	13	10
14	708	197	51	51	423	620	32	10
15	1484	145	33	33	364	320	42	10
16	852	237	61	61	508	298	39	10
17	1219	299	27	27	299	263	34	5
18	1362	169	43	43	120	530	28	10
19	1431	177	46	46	380	223	29	12.5
20	1339	166	64	64	237	365	11	12.5
21	1457	180	23	23	258	397	47	15
22	1592	113	51	51	141	434	32	15
23	1041	179	69	69	383	393	12	10
24	1026	176	68	68	377	387	46	15
25	991	243	44	44	243	534	11	7.5
26	852	136	61	61	508	522	39	10
27	1033	253	23	23	253	557	29	5
28	1140	196	25	25	419	430	51	10
29	1160	199	26	26	426	438	13	7
30	1140	112	50	50	279	615	51	10
31	1321	164	63	63	234	360	43	15
32	1140	279	50	50	279	246	51	5
33	1242	154	40	40	330	484	25	15
34	1160	284	51	51	284	250	13	5.5
35	797	317	57	57	159	489	37	0
36	797	222	57	57	159	698	37	5
37	780	217	84	84	311	478	14	5
38	766	213	82	82	305	470	56	10
39	1398	137	62	62	342	301	16	12.5
40	1296	127	86	86	317	279	37	12.5
41	1160	114	51	51	284	625	13	12.5
42	985	275	71	71	196	345	45	10
43	985	157	71	71	196	604	45	8

Tablo 3. 8. Box–Behnken tabanlı ECC karışım tasarımı devamı (birimler kg/m³ cinsindendir). (Stat-Ease, Inc., 2024)

44	1370	134	60	60	336	295	62	12.5
45	1592	197	51	51	141	248	32	10
46	1219	119	27	27	299	657	34	10
47	708	282	51	51	423	434	32	5
48	872	243	31	31	347	535	64	15
49	1284	220	28	28	157	484	58	15

3.2.1. ECC üretimi, kütleme ve testleri

ECC numuneleri, standart laboratuvar koşullarında hazırlanmıştır. Üretim sürecine, öncelikle parçalanmış beton atıklarının Los Angeles aşındırma cihazında 300 devirde inceltilmesiyle başlanmıştır (Şekil 3.8.). Gerekli seviyede öğütülen beton atıkları, ardından laboratuvardaki elek makinesi kullanarak eleme işlemiyle <0,2 cm boyutuna getirilerek ayrıştırılmıştır. Elde edilen ince taneli malzeme, ECC üretiminde filler olarak kullanılmak üzere depolanmıştır.



a)



b)



c)



d)

Şekil 3. 8. A) Beton atığı, b-c) Los Angeles cihazında beton atığının öğütülmesi, d) öğütülen beton atığının eleme cihazında istenilen boyutlarda elenmesi.

Ardından tüm numuneler optimizasyon yöntemiyle belirlenen oranlarda ayrı ayrı tartılmış ve numuneler hazırlanmaya başlanmıştır (Şekil 3.9.).



Şekil 3. 9. 40x40x160 mm numunelerin hazırlanması.

Üretim işlemini takiben, taze karışımlar kalıplara dökülmüş ve numunelerin üst yüzeylerinde hava kabarcıkları oluşana kadar titreşim uygulanmıştır. Bu kabarcıklar, üretim esnasında malzemelerin sürüklemiş olduğu hava nedeniyle oluşmuştur. Titreşim masası aracılığıyla bu hava kabarcıkları giderilmiş; ayrıca, karışıma dahil edilen liflerin, hava içeriğini artırabileceği görülmüştür. Bu bağlamda titreşim uygulaması, numune kalitesini artırmak açısından kritik bir rol oynamıştır (Dilbas ve Çakır, 2021). Üretilen numuneler, dökümden sonraki 24 saatlik bekleme süresinin ardından kalıplardan çıkarılarak, 28 gün boyunca 24 °C sıcaklık ve %50 bağıl nem içeren standart laboratuvar koşullarında kürlenmiştir. Numuneler, ilk aşamada 40×40×160 mm boyutlarında bir geometriye sahip olacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 3. 10. 40×40×160 mm boyutlarında hazırlanmış 49 adet farklı numune.

40×40×160 mm boyutlarındaki numuneler, TS EN 196-1:2016 standardına uygun şekilde basınç ve eğilme testlerine tabi tutulmuştur (Şekil 3.11). Bu mekanik testler sırasında elde edilen yük değerleri, ilgili gerilme hesaplamalarının yapılmasında kullanılmıştır (Denklem 1 ve 2). Bunun yanı sıra, 50×50×50 mm ve 150×150×150 mm boyutlarındaki numuneler üzerinde ayrı ayrı basınç testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 11. 40×40×160 mm boyutlarındaki kiriş numunesinin eğilme testleri sırasında laboratuvar ortamındaki uygulama görüntüsü.

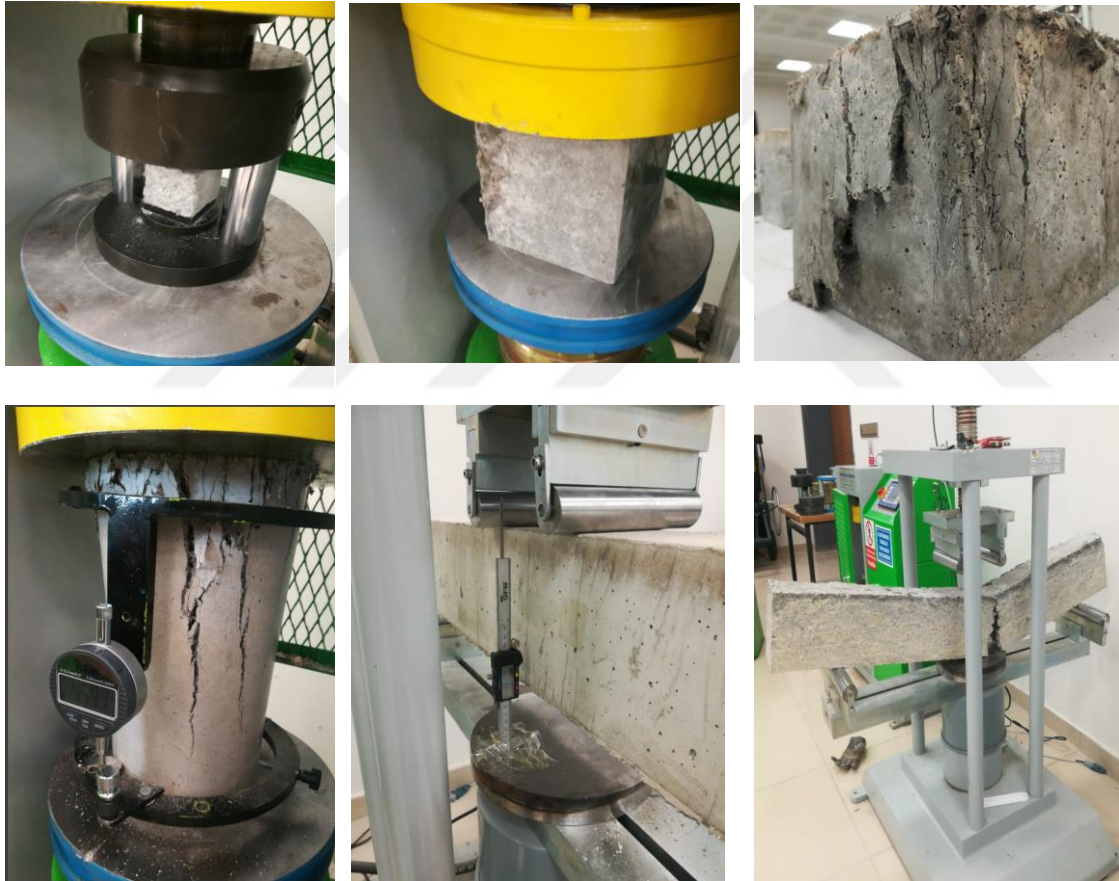
$$f_c = \frac{P_c}{A} \quad (1)$$

$$f_b = \frac{M_b}{I} y \quad (2)$$

Burada, ' f_c ' MPa cinsinden basınç dayanımı, P_c Newton cinsinden maksimum basınç kuvveti, ' A ' mm² cinsinden kuvvetin uygulandığı kesit alanı, ' f_b ' MPa cinsinden eğilme dayanımı, ' M_c ' Newton.mm cinsinden maksimum eğilme momenti, ' I ' mm⁴

cinsinden atalet momenti, 'y' mm cinsinden kiriş numunesinin yüksekliğinin yarısını ifade etmektedir.

ECC'nin gerilme-birim şekil değiştirme davranışlarının belirlenmesi amacıyla 150×300 mm boyutlarında silindir numuneler ve ECC'nin yük-deformasyon davranışlarının belirlenmesi amacıyla 100×180×1200 mm boyutlarında kiriş numuneler üretilmiştir. Deneyler sırasında yük ve deformasyon verileri saniye başına olacak şekilde kayıt altına alınmıştır. Elde edilen veriler doğrultusunda, silindirik numunelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkileri ile kiriş numunelerinin yük-deformasyon davranışları analiz edilmiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda, ECC malzemesinin mekanik performansı, geleneksel betonla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir (Şekil 3.12.).



Şekil 3. 12. Silindir numunelerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi ve kiriş numunelerin yük-deformasyon davranışının test edilmesi.

3.2.2. Malzeme deney sonuçları

ECC'nin optimum oranlarının belirlenmesi ve seçilmesi amacıyla, üretim karışımlarında çok sayıda farklı bileşen kullanılmıştır. Bu bileşenlerin miktar aralıkları Tablo 3.8.'de ilgili test sonuçları ise Tablo 3.9.'da sunulmaktadır. Ancak Tablo 3.9'da

yer alan bazı karışımlar, düşük işlenebilirlik özellikleri nedeniyle üretilenmemiş ve bu sebeple ilgili test sonuçları "mevcut değil (N/A)" olarak belirtilmiştir.

ECC karışımlarının basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve birim ağırlık değerleri üzerinde tek değişkenli parametre değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Ardından, ECC'nin performans özelliklerinin daha kapsamlı şekilde tahmin edilmesini sağlamak üzere, denklem önerisi yoluyla çok değişkenli parametre analizi yapılmıştır. Bu değerlendirme sürecine ilişkin detaylar Şekil 3.13-17'de sunulmuştur. Son olarak, standart laboratuvar koşullarında (24 °C sıcaklık ve %50 bağıl nem) ile ayrıca 24 ± 2 °C sıcaklıktaki su altında kürlen 50×50×50 mm ve 150×150×150 mm boyutlarındaki numuneler, basınç dayanımı testine tabi tutulmuş ve numunelere ait şekil faktörleri detaylı biçimde analiz edilmiştir.

Tablo 3. 9. ECC bileşenlerinin miktar aralıkları.

Tanım	Birim	Minimum	Maksimum
Çimento	%	20	45
Su	%	10	25
Pomza	%	5	15
Mermer Atığı	%	5	15
Beton Atığı	%	10	25
Polipropilen lif	%	0.5	2.0

Tablo 3. 10. ECC test sonuçları.

Karışım	Eğilme mukavemeti, MPa	Basınç mukavemeti, MPa	Birim ağırlık, g/cm ³
1	5.53	36.05	1.70
2	17.59	29.30	1.70
3	N/A	N/A	N/A
4	7.34	26.93	1.54
5	7.11	35.53	1.75
6	4.16	44.16	1.85
7	6.16	23.12	1.56
8	8.40	29.21	1.72
9	6.42	32.93	1.81
10	5.90	33.12	1.74
11	N/A	N/A	N/A
12	14.05	36.85	1.82
13	7.03	34.26	1.69
14	9.63	27.64	1.68
15	N/A	N/A	N/A
16	5.28	20.83	1.46
17	7.46	35.43	1.57
18	N/A	N/A	N/A
19	10.13	36.18	1.87
20	6.21	37.55	1.86
21	13.98	44.13	1.90
22	N/A	N/A	N/A
23	6.27	37.50	1.86
24	16.59	25.05	1.61
25	5.97	29.62	1.73
26	N/A	N/A	N/A
27	7.02	30.62	1.69
28	9.14	39.30	1.83
29	16.34	34.31	1.83
30	N/A	N/A	N/A
31	20.07	37.17	1.77
32	8.64	28.26	1.53
33	6.65	38.77	1.81
34	6.28	29.61	1.58
35	5.73	19.31	1.37
36	20.94	29.18	1.64
37	5.09	26.97	1.59
38	13.67	20.34	1.55
39	N/A	N/A	N/A
40	N/A	N/A	N/A
41	N/A	N/A	N/A
42	8.08	18.99	1.27
43	N/A	N/A	N/A
44	N/A	N/A	N/A
45	7.08	43.25	1.73
46	N/A	N/A	N/A
47	10.41	17.89	1.39
48	5.66	14.58	1.32
49	11.68	35.21	1.75

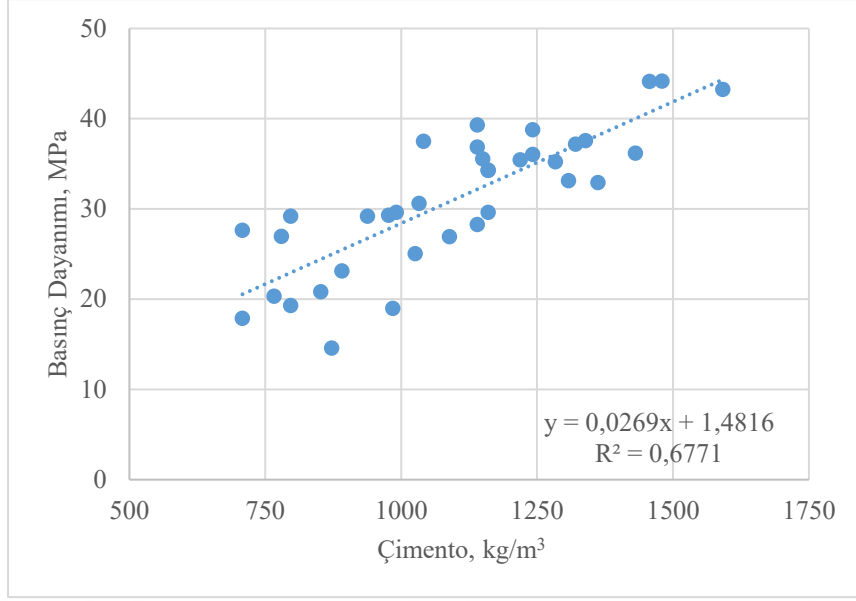
N/A: İşlenebilirliği çok düşük olduğu için mevcut değil.

3.2.2.1 Basınç dayanımı test sonuçları

Basınç dayanımı, özellikle inşaat mühendisliğinde yapı malzemelerinin mekanik performansını değerlendirmede temel bir parametre olarak kabul edilmektedir. Bu değer, bir malzemenin kırılmaksızın dayanabileceği maksimum basınç gerilimini ifade eder. Beton, çimento ve benzeri yapı malzemeleri sıklıkla yüksek basınç yüklerine maruz kaldığından, bu özellik mühendislik tasarımında kritik bir rol oynamaktadır. Bu çalışmada, optimize edilmiş bileşen oranlarına sahip ECC malzemesinin basınç dayanımı özellikleri kapsamlı bir şekilde incelenmiştir.

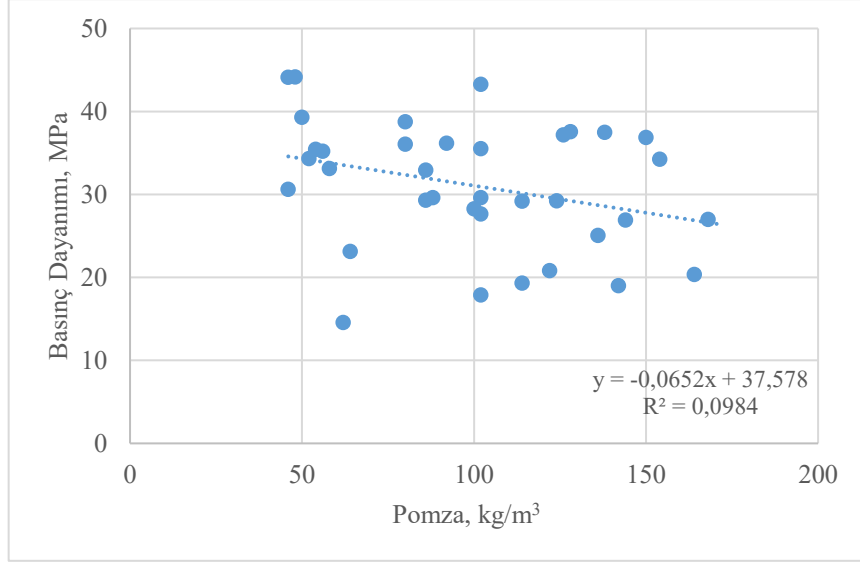
Test sonuçlarına göre, basınç dayanımı değerlerinin 14,58 MPa ile 44,16 MPa arasında değiştiği gözlemlenmiştir. En yüksek dayanım değeri, 1480 kg/m³ çimento içeriğine, 183 kg/m³ su içeriğine ve görelî olarak düşük ince pomza ve iri pomza oranlarına 6 numaralı karışıma aittir. Bu sonuçlar, yüksek çimento içeriğinin basınç dayanımını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Benzer şekilde, su/çimento oranı düşük olan ve 44,13 MPa basınç dayanımına sahip numuneler de bu ilişkiyi desteklemektedir. Bununla birlikte, 1242 kg/m³ çimento içeriğine sahip ve 38,77 MPa dayanım gösteren bazı varyasyonlar bu genel eğilimden sapmaktadır. Bu durum, yardımcı malzemelerin (polipropilen lif ve süper akışkanlaştırıcı) türü ve oranı gibi ek faktörlerin de nihai mukavemet üzerinde belirleyici olabileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle 243 kg/m³ su ve 872 kg/m³ çimento içeriğine sahip olan, 14,58 MPa ile en düşük dayanım gösteren numune, aşırı su kullanımının çimento matrisinde zayıf bağlanmalara neden olabileceğini ve bunun sonucunda mekanik dayanımın düşük olarak elde edilmesine sebebiyet vermiştir. Buna karşılık, uygun su içeriğine sahip dengeli bileşimlerin malzemenin mekanik performansını artırdığı görülmektedir.

Bu analizler, mühendislerin yapı malzemesi tasarımında hem maliyet hem de işlenebilirlik gibi faktörleri göz önünde bulundurarak optimum dayanımı elde etmelerine olanak tanır. Bileşen oranlarının dikkatli bir şekilde ayarlanmasıyla, inşaat malzemeleri belirli yük taşıma gereksinimlerine göre özelleştirilebilir ve böylece hem dayanıklılık hem de yapısal bütünlük sağlanabilir. ECC bileşenlerinin dayanım üzerindeki etkilerini değerlendirebilmek amacıyla yapılan tek parametre analizinde (Şekil 3.13-17) çimento, pomza, mermer atığı, beton atığı ve lif içeriklerinin (kg/m³ cinsinden) basınç dayanımı (MPa) ile ilişkileri gösterilmektedir. Her veri seti için doğrusal eğilim çizgileri oluşturulmuş, denklem ve belirleme katsayısı (R^2) grafiklerde sunulmuştur. En uygun fonksiyon türleri de şekillerde belirtilmiş olup, bu analizlerin amacı ilgili parametrelerin beton performansı bağlamındaki etkilerini akademik olarak yorumlanmıştır.



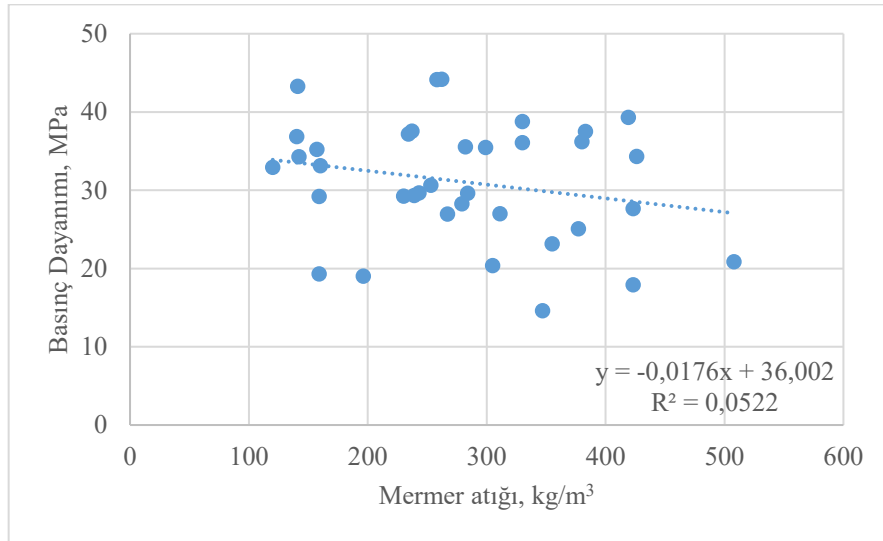
Şekil 3. 13. Çimento- Basınç dayanımı ilişkisi grafiği.

Şekil 3.13. dağılım grafiği, çimento içeriği ile basınç dayanımı arasında güçlü bir pozitif korelasyon bulunduğunu ortaya koymaktadır. Korelasyon katsayısı (R^2) 0,6771 olup, çimento miktarındaki artışın basınç dayanımında anlamlı bir yükselişe neden olduğunu göstermektedir. Eğilim çizgisine ait denklem, $y = 0.0269x + 1,4816$ formundadır ve çimento içeriğinin artmasıyla birlikte basınç dayanımının da orantılı olarak yükseldiğini ifade etmektedir. Bu bulgular, beton teknolojisi alanındaki literatürle (Erdoğan, 2007) tutarlılık göstermektedir. İlgili çalışmalarda, çimento içeriğindeki artışın bağlayıcı matrisin oluşumunu olumlu etkilediği, bunun sonucunda da mekanik dayanımın genellikle arttığı belirtilmektedir. Özellikle yüksek R^2 değeri, çimento içeriğinin basınç dayanımı üzerinde birincil belirleyici olduğunu ortaya koyarken, açıklanamayan varyansın son derece düşük düzeyde olduğunu göstermektedir. Bu durum, modelin doğruluğu ve açıklayıcı yönü açısından yüksek güvenilirlik sunmaktadır.



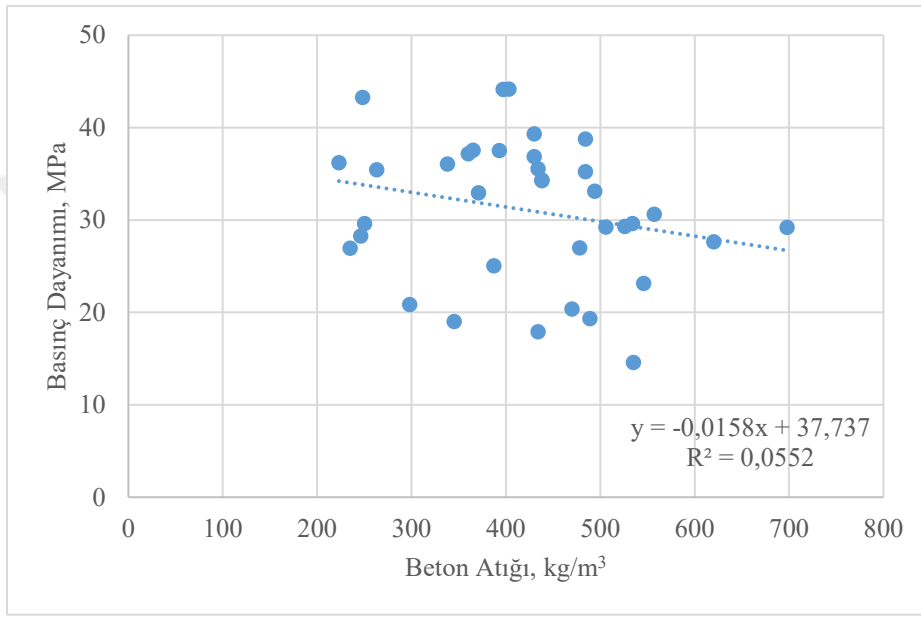
Şekil 3. 14. Pomza- Basınç dayanımı ilişkisi grafiği.

Şekil 3.14 dağılım grafiği, pomza içeriği ile basınç dayanımı arasında negatif bir korelasyon bulunduğunu göstermektedir. Bu ilişki, korelasyon katsayısı (R^2) 0,0984 ve eğilim çizgisine ait denklem $y = -0,0652x + 37,578$ ile ifade edilmektedir. Düşük R^2 değeri, pomza içeriğinin basınç dayanımını tahmin etmede zayıf bir gösterge olduğunu işaret ederken; negatif eğim, artan pomza içeriğinin basınç dayanımında azalmaya yol açtığını göstermektedir. Pomzanın, geleneksel agregalara kıyasla daha düşük yoğunluk ve mekanik dayanım sunan hafif bir agrega olması, bu bulgularla tutarlıdır (Beycioğlu ve ark., 2010; Wongsu ve ark., 2018). Veri noktalarının geniş bir dağılım göstermesi, dayanım üzerinde etkili olabilecek başka parametrelerin de varlığını işaret etmektedir.



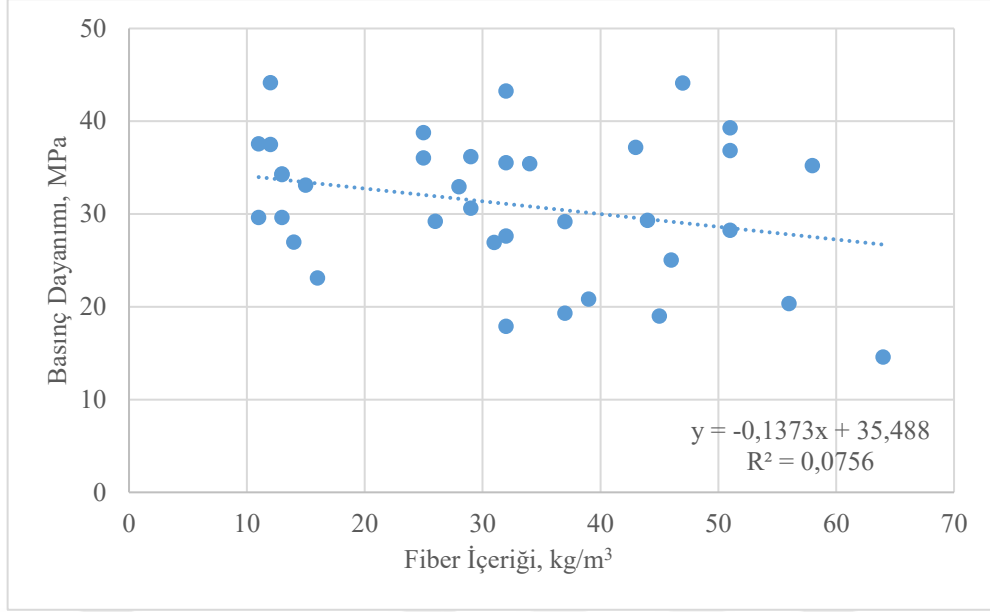
Şekil 3. 15. Mermer atığı-basınç dayanımı ilişkisi grafiği.

Şekil 3.15. dağılım grafiği, mermer atık içeriği ile basınç dayanımı arasında negatif bir korelasyon ortaya koymaktadır. Korelasyon katsayısı $R^2 = 0,0522$ olarak hesaplanmış olup, eğilim çizgisine ait denklem $y = -0,0176x + 36,002$ şeklindedir. Bu zayıf ilişki, karışıma kısmi ikame olarak mermer atığı ilave edilmesinin basınç dayanımını azaltabileceğini göstermektedir. Mermer atığının, çimento matrisinde parçacıkların daha etkili paketlenmesine ve bağlanmasına katkı sağladığına dair sürdürülebilir beton teknolojisi araştırmaları ile uyumluluğu araştırılmalıdır.



Şekil 3. 16. Beton atığı- basınç dayanımı ilişkisi grafiği.

Şekil 3.16. grafikte, beton atık içeriği ile basınç dayanımı arasında negatif bir ilişki gözlemlenmiştir. R^2 değeri 0,0552 ve eğilim çizgisi denklemi $y = -0,0158x + 37,737$ olup, beton atığının karışıma dahil edilmesinin mukavemet azalmasına yol açtığı anlaşılmaktadır. Geri dönüştürülmüş beton atığının uygun şekilde işlenerek, yeterli çimento içeriği ile birlikte kullanıldığında tatmin edici dayanım performansı sağlayabileceği literatürde belirtilmektedir (Dilbas ve ark., 2019). Bazı numunelerde diğer bileşenlerin de etkisiyle bu etki görülse de genel olarak düşük R^2 değeri, beton atığının sürdürülebilir inşaat uygulamalarında yeniden kullanım potansiyelini azaltmakta ve daha fazla araştırma gerektirdiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 3. 17. Fiber içeriği- basınç dayanımı ilişkisi grafiği.

Şekil 3.17. dağılım grafiği, lif içeriği ile basınç dayanımı arasında negatif bir korelasyona işaret etmektedir. Korelasyon katsayısı $R^2 = 0,0756$ olup, denklem $y = -0,1373x + 35,488$ şeklindedir. Bu değer fiber ilavesinin mukavemet üzerinde olumsuz etkiler yarattığını göstermektedir. Lif katkısının, özellikle beton matrisinde yük dağılımını dengelemesi ve çatlak oluşumunu sınırlandırması ile betona yeni bir karakter kazandırmaktadır. Bazı çalışmalarda lif kullanım oranının da etkisiyle basınç dayanımına katkıda bulunduğu saptanmıştır (Dhand ve ark., 2015; Ranjbar ve Zhang, 2020; Samal ve Blanco, 2021). Bununla birlikte, bazı çalışmalarda ise lifin aşırı kullanımının sınırlı bir katkı sunduğu, hatta mukavemeti olumsuz yönde etkilediği bulgularına da rastlanmaktadır (Dilbas ve Çakır, 2021). Bu çalışmada kullanılan farklı lif oranlarına sahip numunelerin basınç dayanımlarının dağılım grafiğini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür.

Dağılım grafikleri üzerinden yapılan analizler, farklı bileşenlerin basınç dayanımı üzerindeki etkilerini karşılaştırmalı olarak ortaya koymaktadır. Çimento içeriği, basınç dayanımı ile en güçlü korelasyonu sergileyerek dayanım gelişimindeki temel rolünü desteklemektedir. Mermer, beton atıkları, pomza içeriği ve lif hem negatif etkisi hem de düşük korelasyon değeriyle sınırlı yapısal uygulanabilirlik göstermektedir. Bununla birlikte deneysel çalışmalarda lif içeriğinin ve homojene yakın lif dağılımının malzemenin eğilme mukavemetini ve enerji yutma kapasitesini önemli ölçüde değiştirdiği görülmüştür.

3.2.2.2 Eğilme dayanımı test sonuçları

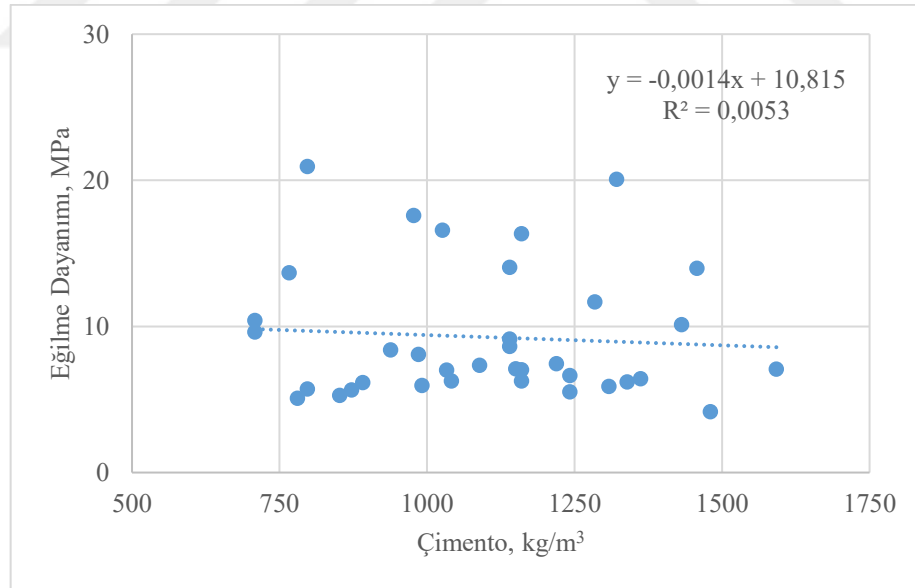
Eğilme dayanımı, beton ve kompozit malzemelerin mekanik performansının değerlendirilmesinde temel bir parametre olarak öne çıkmaktadır. Bu özellik, bir malzemenin yük altında deformasyona karşı direnç gösterme yetisini belirler ve özellikle çekme kuvvetlerinin etkin olduğu yapısal uygulamalarda kritik bir rol oynar. Bu çalışmada, eğilme mukavemeti sonuçları istatistiksel eğilimler, değişkenlik düzeyleri ve malzeme performansına olası etkiler açısından kapsamlı şekilde aşağıda analiz edilmiştir.

ECC numunelerine ait eğilme mukavemeti değerleri 4,16 MPa ile 20,94 MPa arasında değişmektedir. Bu geniş varyasyon aralığı, aynı kürlenme koşulları ve deneysel protokol altında bile, malzeme bileşenlerindeki farklılıkların mekanik özellikler üzerinde belirgin etkilere sahip olduğunu göstermektedir. En yüksek değerlere sahip üç örnek, sırasıyla 20,94 MPa, 20,07 MPa ve 17,59 MPa olarak kaydedilmiştir. Bu durum, ilgili numunelerin optimize edilmiş bileşim oranlarına, uygun hava kürlenmesi koşullarına ve etkili fiber takviye mekanizmalarına bağlı olarak üstün eğilme performansı sergilediklerini göstermektedir. Bu özellikler yüksek performans, yüksek dayanım ve çatlak kontrolü gerektiren özel uygulamalar açısından son derece önemlidir. Bu doğrultuda, çalışmada uygulanan optimizasyonun sonuçlar üzerindeki belirleyici etkisi vurgulanmış ve ECC bileşen oranlarının belirlenmesinde bir karışım optimizasyonu yöntemi kullanımının gereksinimi önerilmiştir. Optimasyon yöntemin kullanılması, optimum malzeme tasarımının elde edilmesinde güçlü bir strateji olarak öne çıkmaktadır. Buna karşılık, en düşük eğilme mukavemeti değerleri olan 4,16 MPa ve 5,09 MPa gibi sonuçlar, yetersiz bağlayıcı içeriği, zayıf agrega- çimento pastası kenetlenmesi ve sürüklenmiş hava miktarının fazlalığı, fiber miktarının azlığı ile ilişkilendirilebilir. Bu düzeydeki düşük performans, eğilme yüklerinin kritik olduğu mühendislik uygulamaları için risk teşkil etmektedir. Eğilme mukavemeti değerlerinin önemli bir kısmı 6–12 MPa aralığında yer almakta olup, bu durum ECC malzemelerin çoğunun orta düzeyde performans sergilediğine işaret etmektedir. Söz konusu aralık, genel amaçlı yapılar için yeterli bulunmakta ve yüksek eğilme direnci gerektirmeyen inşaat uygulamalarında kullanılabilirliği artırmaktadır.

Kompozit karışımlarda çok sayıda bileşen yer aldığına, bu bileşenlerin optimize edilmesi mekanik performans açısından stratejik bir öneme sahiptir. Gözlemlenen eğilme mukavemeti dağılımı, malzeme davranışının anlaşılması açısından önemli veriler sunmaktadır. Yüksek eğilme mukavemeti değerleri zorlu yükleme koşullarına uygunluğu işaret ederken, düşük performans gösteren numuneler için ilave araştırma ve iyileştirme

yaklaşımlarının denenmesini gerektirebilir. Mühendisler ve malzeme araştırmacıları, bu verileri karışım tasarımının optimize edilmesi, dayanıklılığın artırılması ve yapısal gerekliliklere uyumun sağlanması amacıyla kullanabilir (Ji ve ark., 2023). Elde edilen sonuçlar, malzeme bileşenlerinin ve işleme koşullarının eğilme mukavemeti üzerindeki etkilerini ortaya koyan yüksek düzeyde değişkenlik sergilemektedir. Bu nedenle, ileride yapılacak çalışmaların değişkenliği azaltmaya ve kompozit malzemelerde eğilme mukavemeti tahminlerinin güvenilirliğini artırmaya yönelik deneysel stratejilere odaklanması önerilmektedir.

Bu bölümde, ECC'nin eğilme mukavemetine bileşen parametrenin etkisi değerlendirilmiştir. Aşağıda yer alan eğilme dağılım grafiklerinde, çeşitli malzeme bileşenlerinin eğilme mukavemeti üzerindeki etkileri görsel olarak sunulmaktadır. Bağımsız değişkenler arasında kg/m^3 cinsinden ölçülen çimento içeriği, pomza içeriği, mermer atığı içeriği, beton atığı içeriği ve lif içeriği yer almakta; bağımlı değişken olarak ise MPa cinsinden ölçülen eğilme mukavemeti değerlendirilmektedir. Her grafik için doğrusal bir eğilim çizgisi oluşturulmuş ve parametre ilişkilerini değerlendirmek amacıyla ilgili denklemler ile korelasyon katsayıları (R^2) belirtilmiştir.

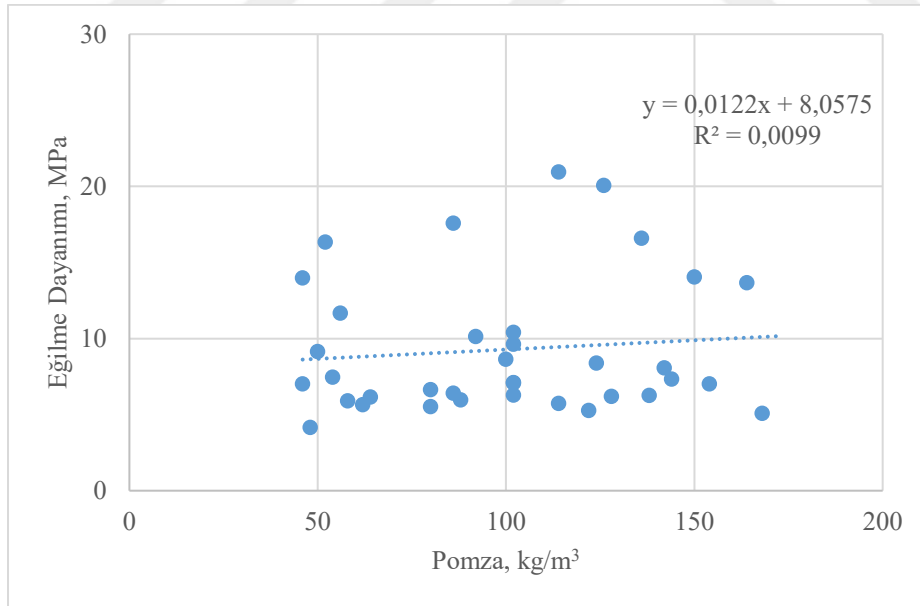


Şekil 3. 18. Çimento- eğilme dayanımı ilişkisi grafiği.

Şekil 3.18 çimento içeriği ile eğilme dayanımı arasında negatif yönde bir korelasyon olduğunu ortaya koymaktadır. Bu ilişkinin durumunu belirten R^2 değeri 0,0053 olup, eğilim çizgisi denklemi $y = -0,0014x + 10,815$ şeklindedir. Bu doğrusal ilişki, çimento miktarındaki artışın eğilme dayanımını genel olarak olumsuz etkilediğini göstermektedir. Eğilme değerinin nispeten düşük olması, çimento içeriğinin eğilme

dayanımından ziyade basınç dayanımı üzerinde daha güçlü bir etkiye sahip olduğunu düşündürmektedir. Bu bulgu beklenen bir durumdur; zira eğilme dayanımı, yalnızca çimento matrisinin özelliklerine değil, aynı zamanda agrega ile olan kenetlenme düzeyine ve fiber takviye mekanizmalarının etkinliğine bağlı olarak şekillenmektedir (Ranjbar ve Zhang, 2020; Samal ve Blanco, 2021).

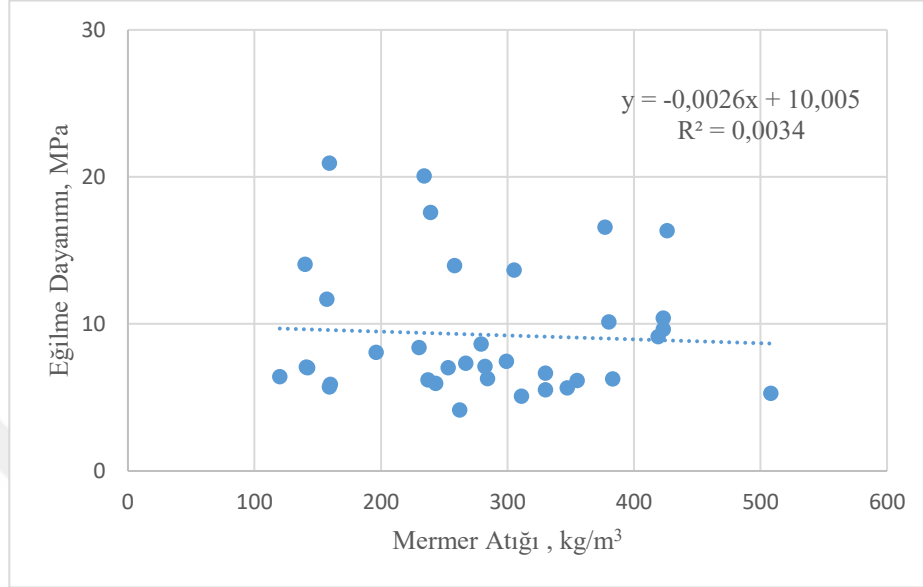
Yüksek çimento içeriği, daha yoğun ve sağlam bir matris oluşumuna katkı sunarak genel mekanik performansı artırma potansiyeline sahiptir (Mehta ve Monteiro, 2006). Bununla birlikte, aşırı çimento kullanımı, matriste kırılganlık artışına yol açarak süneklik özelliklerini ve dolayısıyla eğilme performansını azaltabilmektedir (Chung, 2017). Ayrıca çimento miktarının artması, geliştirilen kompozitin sürdürülebilir bir malzeme olması açısından olumsuz bir durumdur. Deneysel veri seti incelendiğinde, çimento içeriği 1400 kg/m³'ü aşan karışımların çoğunlukla 10 MPa'nın üzerinde eğilme dayanımı gösterdiği; bazı karışımların ise 13,98 MPa gibi yüksek değerlere ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca 1480 kg/m³ çimento içeriğine sahip bir karışımın yalnızca 4,16 MPa'lık eğilme dayanımı sergilemesi, su miktarı ve katkı maddeleri arasındaki etkileşimlerin bu ilişkide belirleyici olabileceğini işaret etmektedir.



Şekil 3. 19. Pomza- eğilme dayanımı ilişkisi grafiği

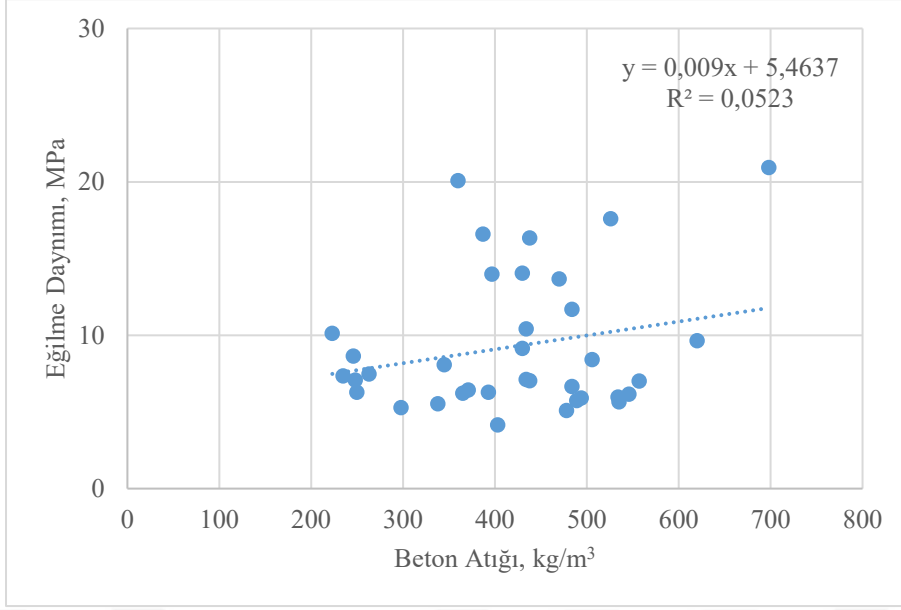
Şekil 3.19 pomza içeriği ile eğilme mukavemeti arasında düşük oranda pozitif bir korelasyon olduğunu göstermektedir. R² değeri 0,0099 olup, ilişkiyi tanımlayan doğrusal denklem $y = 0,0122x + 8,0575$ 'tir. Basınç dayanımı ile negatif yönde ilişkilendirilen pomza, eğilme performansı açısından olumlu katkılar sunduğu belirlenmiştir. Bu olumlu

etki, pomzanın hafif ve gözenekli yapısına bağlı olarak enerji sönümlemesini artırması ve kırılgenliği azaltması ile açıklanabilir. Ancak, orta düzeydeki R^2 değeri, pomza dışında farklı değişkenlerin de eğilme dayanımını etkilediğine işaret etmektedir.



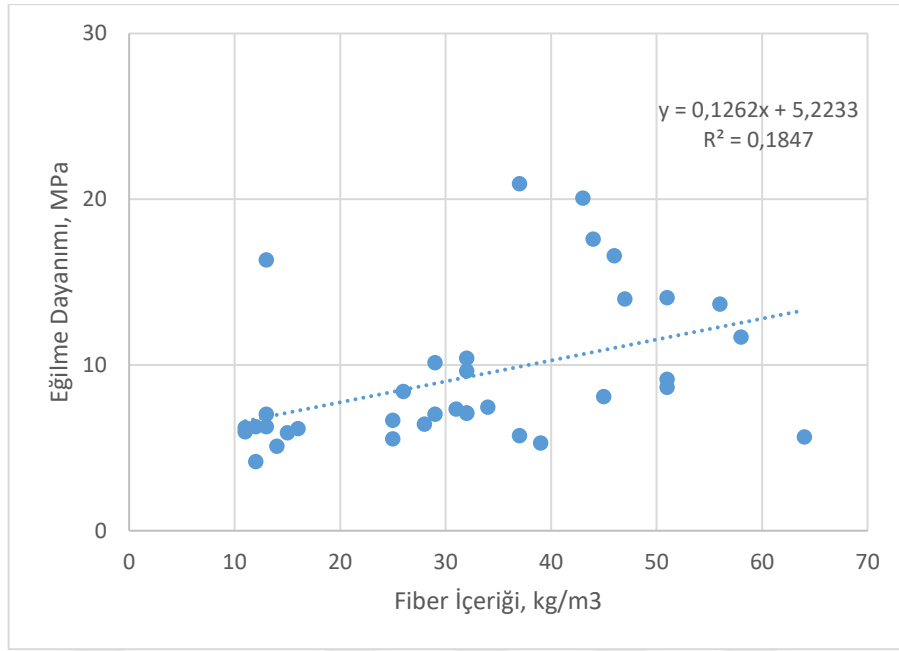
Şekil 3. 20. Mermer atığı-eğilme dayanımı ilişkisi grafiği.

Şekil 3.20. ise mermer atık içeriği ile eğilme dayanımı arasında negatif bir korelasyon görülmektedir. R^2 değeri 0,0034 olarak saptanmış olup, doğrusal denklem $y = -0,0026x + 10,005$ şeklindedir. Bu değerler, mermer atığının eğilme dayanımı üzerindeki azaltıcı etkisini ortaya koymaktadır. Negatif eğim, mermer atığı kullanımının sürdürülebilir beton üretiminde mekanik performansı olumsuz yönde etkilediğine dair tahmin edildiği gibi etki göstermiştir. Pomza, gözenekli yapısı nedeniyle betonun genel yoğunluğunu azaltma eğilimindedir (Beycioğlu ve ark., 2010) bu özellik yalıtım kapasitesini artırsa da genellikle mekanik dayanım üzerinde olumsuz etki oluşturabilmektedir (Mboya ve ark., 2019; Mohammed ve Yaltay, 2024). Mevcut veriler, pomza içeriği arttıkça eğilme dayanımında artış gözlemlendiğini ortaya koymaktadır. Ancak öte yandan, ince partikül yapısına sahip mermer atıkları eğilme dayanımı üzerinde karmaşık etkiler sergilemektedir. Bazı karışımlarda 10 MPa'nın üzerinde eğilme dayanımı elde edilirken, bazı örneklerde bu değer 7 MPa'nın altına düşmektedir. Bu değişkenlik, mermer atıklarının diğer katkı maddeleriyle olan etkileşimlerinin nihai mekanik performans üzerinde belirleyici olabileceğini göstermektedir.



Şekil 3. 21. Beton atığı-eğilme dayanımı ilişkisi grafiği.

Şekil 3.21 dağılım grafiği, beton atık içeriği ile eğilme dayanımı arasında pozitif yönde bir korelasyon olduğunu ortaya koymaktadır. R^2 değeri 0,0523 olan bu ilişki, $y = 0,009x + 5,4637$ doğrusal denkleminde dayanmaktadır. İlgili eğilim, beton atıklarının nispeten daha düşük oranlarda kullanılsa dahi eğilme performansı üzerinde olumlu etkiler oluşturduğunu göstermektedir. Geri dönüştürülmüş beton agregaları, agrega kenetlenmesini iyileştirerek eğilme dayanımının artmasına katkı sunmaktadır. R^2 değerinin yüksek oluşu, eğilme dayanımının kritik olduğu mühendislik uygulamaları için beton atıklarının yeniden kullanımını destekleyen bir bulgu niteliğindedir. Beton atıkları, ECC karışımlarında sürdürülebilirliği desteklemek amacıyla geri dönüştürülmüş agrega olarak tercih edilebilir. Bununla birlikte, eğilme mukavemeti üzerindeki etkileri ikame oranına bağlı olarak farklılık gösterebilir (Corinaldesi, 2010). Veri seti, yüksek beton atığı içeriğine sahip karışımların her zaman düşük performans sergilemediğini ortaya koymaktadır. Nitekim 698 kg/m³ beton atığı içeren bir karışımın 20,94 MPa'lık eğilme dayanımı göstermesi, en yüksek değerlerden biri olarak kaydedilmiş ve kullanılacak beton atıklarının, doğal agregaların yerini alabilecek nitelikte olduğunu kanıtlamıştır.

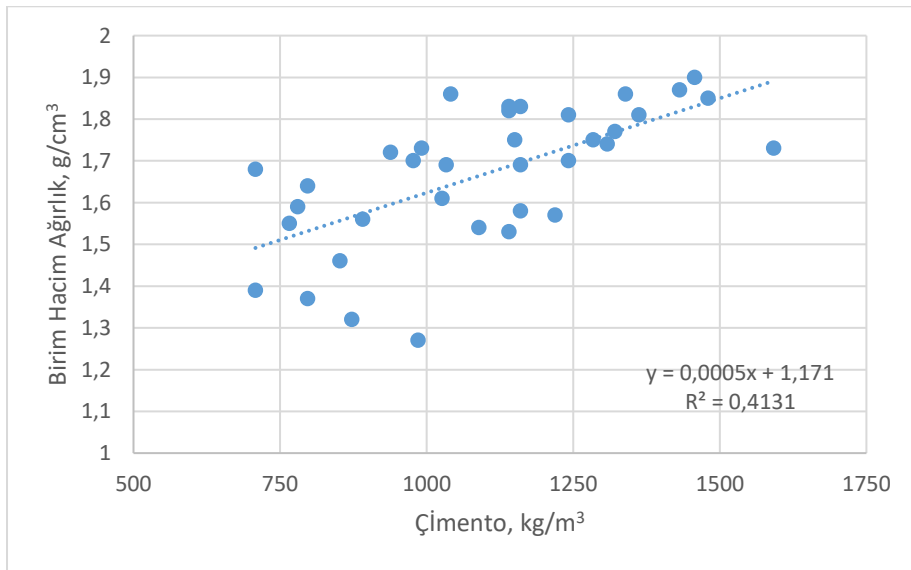


Şekil 3. 22. Lif içeriği-eğilme dayanımı ilişkisi grafiği.

Şekil 3.22. dağılım grafiği, fiber içeriği ile eğilme dayanımı arasındaki ilişkiyi değerlendirmekte ve orta-güçlü pozitif bir korelasyonu göstermektedir. Belirlenen R^2 değeri 0,1847 olup, doğrusal denklem $y = 0,1262x + 5,2233$ şeklindedir. Fiber miktarının artırılmasıyla eğilme dayanımındaki belirgin yükseliş, fiberlerin malzeme tokluğu ve çatlak direncini artırmadaki etkili rolünü bir kez daha doğrulamaktadır. Fiber takviyesi, yük dağılımını homojenleştirmekte ve gevrekliğin önlenmesine katkı sağlayarak yapının genel dayanımını artırmaktadır (Akça ve ark., 2015; Das ve ark., 2018; Ahmed ve ark., 2020). Yüksek R^2 değeri, fiber içeriğinin eğilme performansını öngörmekte güçlü bir parametre olduğunu ve dolayısıyla yüksek performanslı ECC karışımlarının tasarımında kritik bir değişken olarak ele alınması gerektiğini göstermektedir. Polipropilen lifler, betonun sünekliğini ve mekanik dayanımını artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Erdal, 2011; Liu ve ark., 2021). Fiber takviyeli beton, çatlama direnci ve enerji sönümlemesini yükleme altındaki koşullarda artırarak performansı geliştirmektedir (Xu ve ark., 2017). Nitekim veri analizine göre, lif içeriği 64 kg/m³ olan karışımlar 10 MPa'nın üzerinde eğilme dayanımı sergilemekte olup, polipropilen liflerin ECC yapılarında eğilme kapasitesini artırıcı etkisini ortaya koymaktadır. Ancak lif oranındaki artış işlenebilirliği de azaltmaktadır. Yüksek lif oranından dolayı bazı karışımların işlenebilirliği mümkün olmamıştır. Bu bulgular, yapı malzemesi tasarımında hedeflenen eğilme performansının sağlanabilmesi için karışım bileşenlerinin optimize edilmesinin stratejik önem taşıdığını açıkça ortaya koymaktadır.

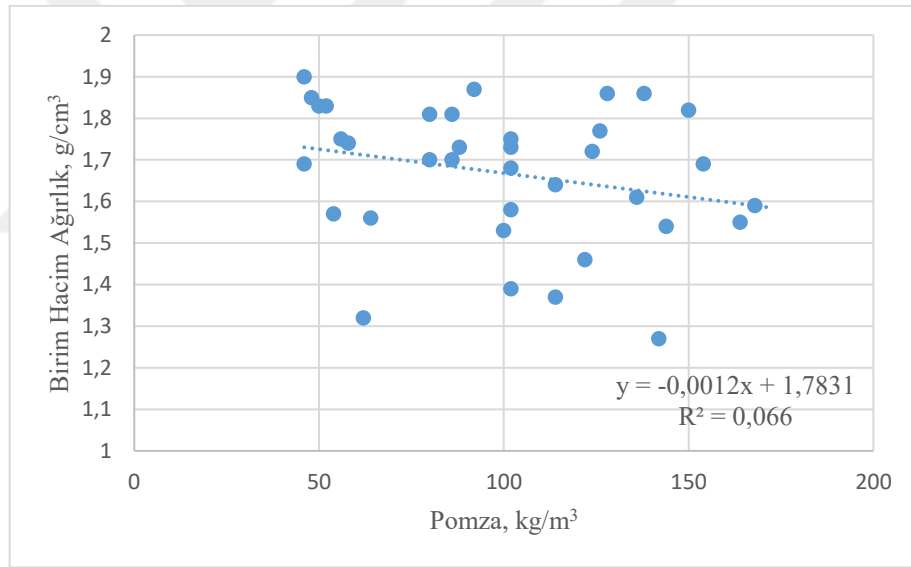
3.2.2.3 Birim hacim ağırlık test sonuçları

Birim hacim ağırlık (yoğunluk), çimento esaslı kompozitlerin mekanik özelliklerini (basınç ve eğilme mukavemeti, dayanıklılık, işlenebilirlik gibi kritik parametreleri) doğrudan etkileyen önemli bir fiziksel özelliktir. Bu çalışmada, farklı çimento karışımlarından elde edilen ECC malzemelerine ait birim hacim ağırlık değerleri incelenmiş; bu değerleri etkileyen faktörler analiz edilmiş ve ilgili performans sonuçları kapsamlı şekilde değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, karışım oranları ile bileşen malzemelerindeki varyasyonları yansıtarak 1,27 g/cm³ ile 1,90 g/cm³ arasında değişen birim ağırlık değerlerini ortaya koymaktadır. Çimento esaslı karışımların birim ağırlıkları; çimento içeriği, su/çimento oranı, kullanılan agregaların türü ve tamamlayıcı çimento esaslı kompozitler (ECC) olarak görev yapan puzolanlar ve mineral katkıların varlığı gibi çok çeşitli faktörlerden etkilenmektedir (Erdoğan, 2007). Şekil 3.23-27’de sunulan dağılım grafiklerinde, ECC karışımındaki farklı bileşenlerin birim ağırlık üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Grafiklerdeki bağımsız değişkenler; çimento içeriği, pomza içeriği, mermer atığı içeriği, beton atığı içeriği ve lif içeriğidir. Bu değişkenlerin tümü kg/m³ cinsinden ölçülürken, bağımlı değişken olarak analiz edilen birim ağırlık g/cm³ cinsinden raporlanmıştır. Her bir veri setine en iyi şekilde uyan eğilim çizgisi oluşturularak ilişkiyi tanımlayan denklem ve korelasyon katsayısı (R²) hesaplanmıştır. Yapılan analiz, bu ilişkilerin ECC'nin yoğunluk özellikleri ve mekanik performansı bağlamında ne derece belirleyici olduğunu ortaya koymayı amaçlamaktadır.



Şekil 3. 23. Çimento-birim hacim ağırlık ilişkisi grafiği.

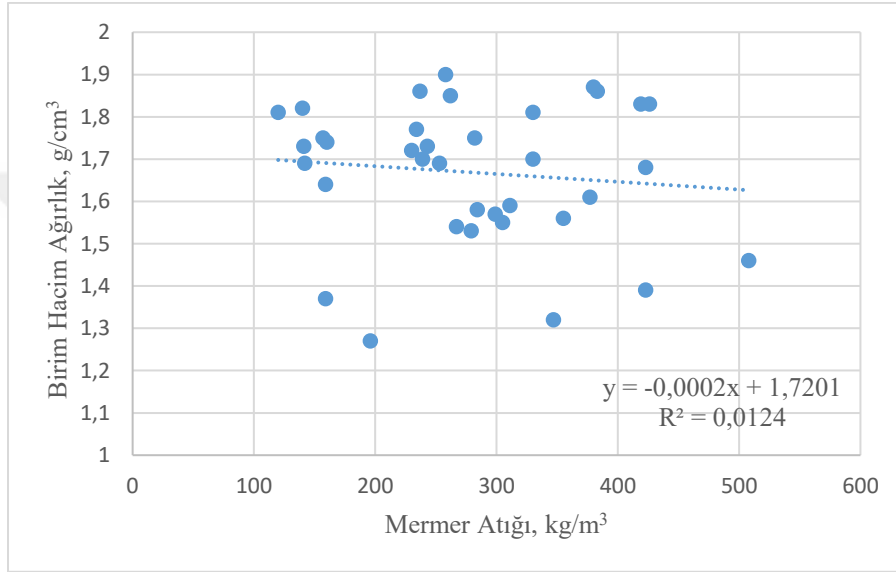
Şekil 3.23 çimento içeriği ile birim hacim ağırlık arasında pozitif bir korelasyon olduğunu göstermektedir. R^2 değeri 0,4131 olarak belirlenmiş olup, eğilim çizgisi denklemi $y = 0,0005x + 1,171$ şeklindedir. Elde edilen pozitif eğim, çimento içeriğindeki artışın birim ağırlığı artırıcı yönde etkide bulunduğunu göstermektedir. Bu sonuç beklenen bir durumdur; zira çimento yoğunluğu yüksek olan bir bağlayıcıdır ve karışımın toplam kütlesine doğrudan katkı sağlar. Ancak, R^2 değerinin orta düzeyde kalması, birim ağırlığın yalnızca çimento içeriği ile açıklanamayacağını ve agrega bileşimi ile su miktarı gibi diğer faktörlerin de önemli rol oynadığını ortaya koymaktadır. Yüksek çimento içeriği, partikül yoğunluğunun daha yüksek olması nedeniyle birim ağırlığı genel olarak artırıcı etki gösterir. Nitekim, veri setinde çimento içeriği 1400 kg/m^3 'ü aşan karışımların $1,85\text{--}1,90 \text{ g/cm}^3$ gibi yüksek birim ağırlık değerleri sergilediği; $700\text{--}900 \text{ kg/m}^3$ aralığında çimento içeren karışımların ise genellikle $1,50 \text{ g/cm}^3$ 'nin altında değerlere sahip olduğu görülmektedir.



Şekil 3. 24. Pomza-birim hacim ağırlık ilişkisi grafiği.

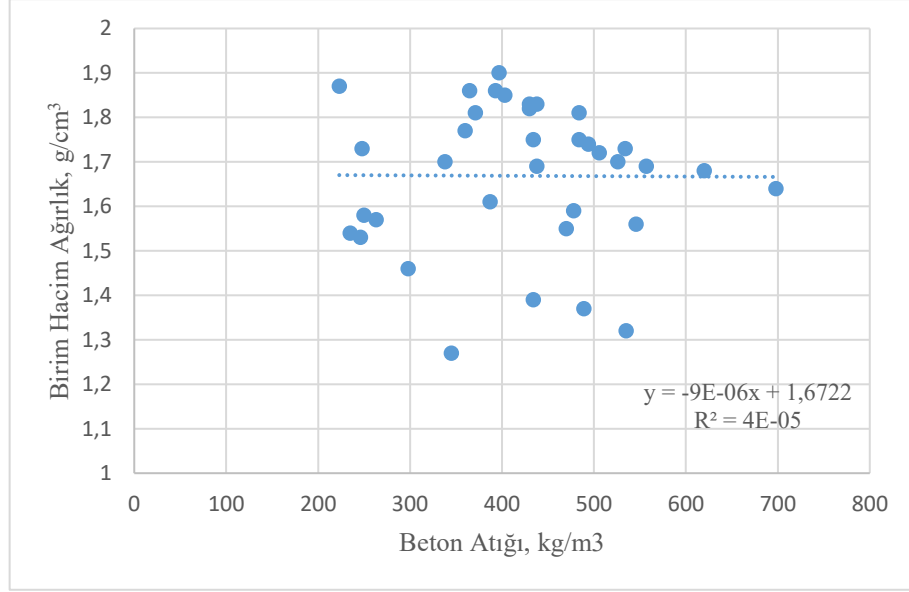
Şekil 3.24 dağılım grafiği, pomza içeriği ile birim ağırlık arasında negatif bir korelasyon olduğunu ortaya koymaktadır. Elde edilen R^2 değeri 0,066 olup, doğrusal denklem $y = -0,0012x + 1,7831$ şeklindedir. Negatif eğim, pomzanın düşük yoğunluklu bir agrega olarak karışım yoğunluğunu azaltıcı etki gösterdiği yönündeki beklentilerle uyumludur. Ancak, korelasyon katsayısının düşük olması, pomza miktarının birim ağırlığı doğrudan ve güçlü şekilde tahmin etmede yetersiz kaldığını göstermektedir. Veri noktalarının geniş dağılımı, parçacık boyutu, şekil faktörü, su emme kapasitesi gibi ek değişkenlerin de birim ağırlık üzerinde etkili olabileceğini göstermektedir. Betonda

kullanılan kaba ve ince agregaların özgül ağırlıkları, karışımın yoğunluğunda belirleyici rol oynamakta, daha yüksek özgül ağırlığa sahip agregalar, birim hacim ağırlığı artırıcı yönde etki etmektedir. Veri seti incelendiğinde, pomza içeriği 250 kg/m³'ün altında olan numunelerin genellikle 1,50–1,60 g/cm³ aralığında düşük yoğunluklar sergilediği; 400 kg/m³ üzerindeki pomza içeriğine sahip karışımların ise 1,75–1,90 g/cm³ gibi daha yüksek birim ağırlıklara ulaştığı görülmektedir. Bu sonuçlar, pomzanın etkisinin diğer mineral bileşenlerle olan etkileşimlerine bağlı olarak değişebileceğini göstermektedir.



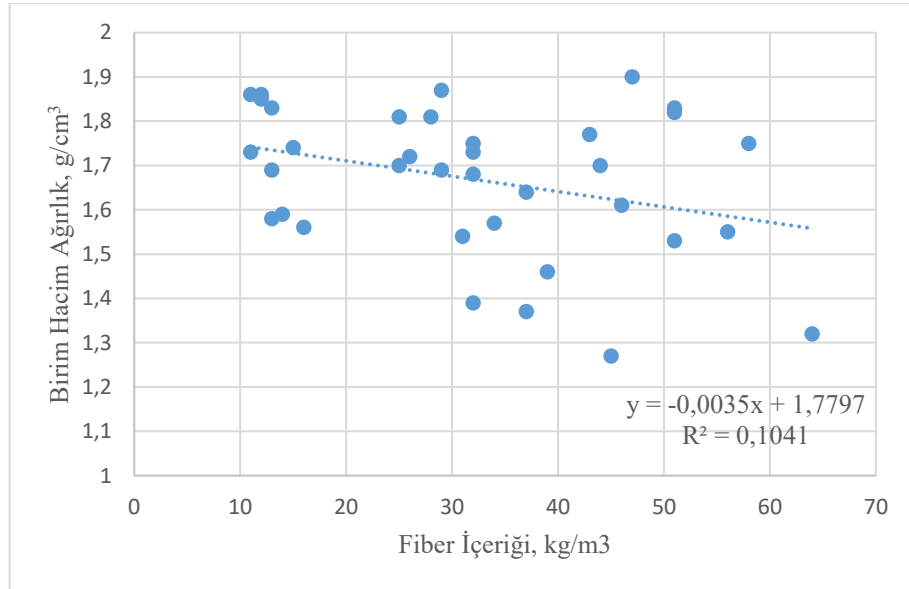
Şekil 3. 25. Mermer atığı -birim hacim ağırlık ilişkisi grafiği.

Şekil 3.25 dağılım grafiği, mermer atık içeriği ile birim ağırlık arasında oldukça zayıf bir negatif korelasyon olduğunu ortaya koymaktadır. R² değeri 0,0124 olarak belirlenmiş olup, doğrusal denklem $y = -0,0002x + 1,7201$ şeklindedir. Bu düşük korelasyon seviyesi, mermer atığı miktarındaki artışın birim ağırlık üzerinde ihmal edilebilir düzeyde bir etki oluşturduğunu göstermektedir. Mermer atığı, nispeten yoğun yapıya sahip olmasına rağmen, karışım içeriğindeki form farklılıkları ve diğer bileşenlerin oranlarına bağlı olarak birim ağırlığa katkısı sınırlı kalmaktadır.



Şekil 3. 26. Beton atığı -birim hacim ağırlık ilişkisi grafiği.

Şekil 3.26, beton atığı içeriği ile birim ağırlık arasında neredeyse sıfıra yakın bir korelasyon göstermektedir. R^2 değeri 0,00004 ve eğilim denklemi $y = -0,000009x + 1,6722$ şeklindedir. Eğilim çizgisinin yatay karakteri, beton atıklarının birim ağırlık üzerinde anlamlı bir etkiye sahip olmadığını göstermektedir. Bu durum, geri dönüştürülmüş beton agregalarının yoğunluk özelliklerinin doğal agregalarla benzerlik göstermesi ve bu nedenle karışımın genel yoğunluğunda belirgin bir değişim oluşturmaması ile açıklanabilir.



Şekil 3. 27. Lif içeriği -birim hacim ağırlık ilişkisi grafiği.

Şekil 3.27 lif içeriği ile birim ağırlık arasındaki ilişkiyi değerlendirmekte ve zayıf bir negatif korelasyon ortaya koymaktadır. R^2 değeri 0,1041 olup, eğilim denklemi $y = -0,0035x + 1,7797$ şeklindedir. Elde edilen negatif eğilim, daha yüksek lif miktarının birim ağırlıkta hafif bir azalmaya yol açabileceğini işaret etmektedir. Bu etki, liflerin daha yoğun matris bileşenlerinin yerini alarak karışımın genel kütlesini azaltmasıyla ilişkilendirilebilir. Diğer yönden artan miktarda lif kullanımıyla matriste sürüklenmiş hava miktarının artabileceği ve bu sebeple birim hacim ağırlığının düşebileceği yorumu yapılmıştır. Ancak korelasyonun zayıf olması, lif içeriğinin tek başına birim ağırlığın belirleyici faktörü olmadığını göstermektedir.

Bu bulgular, çimento esaslı karışımlarda birim ağırlığın çok sayıda etkileşimli faktörden etkilendiğini ve mekanik performansı optimize etmek adına tüm bileşenlerin birlikte değerlendirilmesini gerekli kıldığını göstermektedir. Veri seti, daha yüksek çimento içeriği, uygun agrega seçimi ve su/çimento oranının kontrolü birim ağırlığı artırarak yapısal performansı iyileştirdiği yönündeki literatürle uyumlu eğilimleri doğrulamaktadır. Tez kapsamında karışım oranlarının basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve birim hacim ağırlık açısından parametrik analizi gerçekleştirildikten sonra en iyi karışımın belirlenmesi gerçekleştirilmiştir.

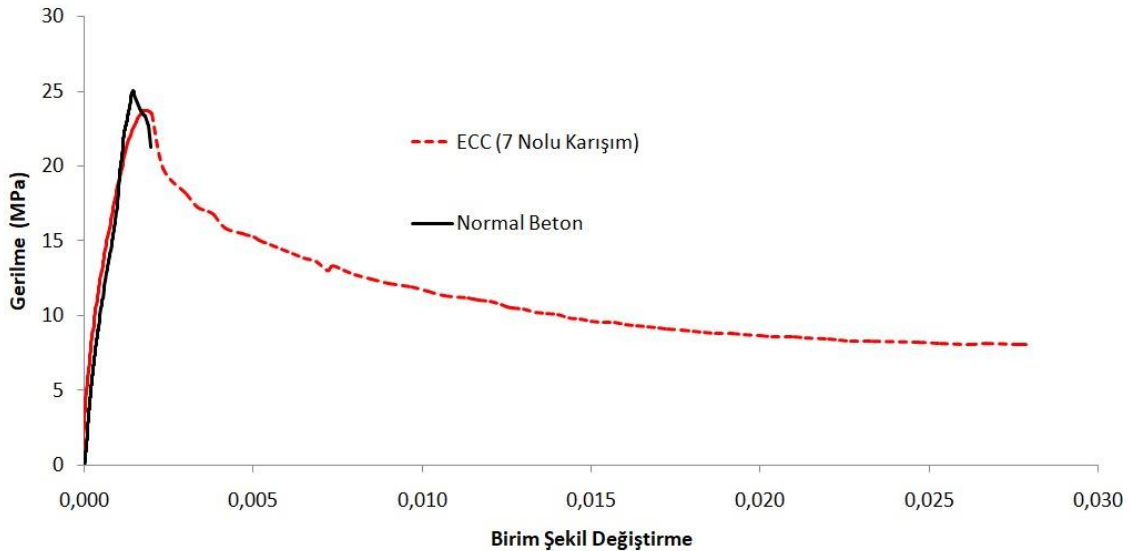
Basınç dayanımı test sonuçları dikkate alınarak en uygun serinin seçilmesi amacıyla değerlendirme yapılmıştır. Tablo 3.10'da sunulan verilere göre, en yüksek birinci ve ikinci basınç dayanımı değerleri sırasıyla karışım 6 için 44,16 MPa ve karışım 21 için 44,13 MPa olarak belirlenmiştir. Bu karışımların eğilme dayanımı ise sırasıyla 4,16 MPa ve 13, 98 MPa'dır. Karışım mekanik özellik değerlendirme kapsamında tez çalışmasında elde edilen diğer bir önemli sonuca karışım 36'da ulaşılmıştır. Karışım 36'nın basınç dayanımı 29,18 MPa olmasına rağmen, bu serinin eğilme dayanımı değerinin basınç dayanımına oldukça yakın olduğu görülmüştür. Bu durum, karışım 36'nın izotropik benzeri bir mekanik davranış sergilediğini göstermiştir. Dolayısıyla ECC malzeme tasarımında karışım oranlarının ve karışım içeriğinin mekanik davranışı büyük oranda değiştirebileceği görülmüştür. Burada önemli olan üretilecek ECC'nin hangi amaçla kullanılacağını belirlenmesidir. Bu kapsamda malzemeden beklenen özellik yüksek bir dayanım, yüksek bir sönümlenme kapasitesi, hafif bir malzeme elde edilmesi, yüksek çatlak kontrolü başlıklarında değişkenlik gösterebilmektedir. Bu beklenen özelliklerin her biri için ayrı bir karışım tasarımına ihtiyaç duyulabilmektedir.

Tablo 3. 11. ECC numunelerin en iyi serileri.

Karışım	f_b , MPa	f_c , MPa	d , g/cm ³
6	4.16	44.16	1.85
21	13.98	44.13	1.90
36	20.94	29.18	1.64

3.2.2.4 Kirişin yük-deformasyon ile ecc numunesinin gerilme-gerilim ilişkisi

Çalışma kapsamında, ECC serisinden karışım 7 (Tablo 3.9), C25 betona eşdeğer mukavemet değerlerine yakın olduğu için 150×300 mm boyutlarında silindir numune üretiminde esas alınmıştır (Şekil 3.29). Numunelere dijital kompresometre entegre edilmiş ve ardından basınç testleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.30). Test sonuçlarına göre, C25 beton mukavemetine sahip ECC serisinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi elde edilmiştir (Şekil 3.28). Şekil 3.28 'de karşılaştırılan geleneksel C25 beton ve ECC (25 MPa) eğrileri incelendiğinde, ECC numunesinin oldukça yüksek süneklik kapasitesi sergilediği görülmektedir. Geleneksel beton yaklaşık 0,003 birimlik şekil değiştirme değerinde nihai kapasitesine ulaşırken, ECC numunesi yaklaşık 0,027 birimlik şekil değiştirme ile bu değer yaklaşık on katına çıkmaktadır. Malzeme düzeyinde ECC'nin yüksek enerji yutma kapasitesi ortaya konulduktan sonra, bu etkinin yapısal elemanlar düzeyinde benzer şekilde gerçekleşip gerçekleşmediği analiz edilmiştir. Bu doğrultuda, 1200 mm uzunluğunda ve 100×180 mm kesit boyutlarında donatısız kiriş test numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 3.31).

**Şekil 3. 28.** 7 nolu ECC ve normal beton gerilme-şekil değiştirme eğrileri.

Numunelerden biri geleneksel beton, diğeri ise ECC ile üretilmiş olup her iki numuneye ayrı ayrı dört noktadan eğilme testleri uygulanmıştır. Test sonuçlarına göre, geleneksel betonlu kiriş numunesi ani ve gevrek bir kırılma davranışı gösterirken, ECC

ile üretilmiş kiriş numunesi son derece sünek bir davranış sergilemiş ve nihai kapasitesine ulaştığında dahi yük taşımaya bir müddet devam etmiştir. Donatı içermemesine rağmen ECC kirişinin davranışı geleneksel donatılı kirişe oldukça benzemektedir. Bununla birlikte, ECC kirişinde daha erken çatlak oluşumu gözlemlenmiş, bu da doğrusal olmayan davranışın daha erken başlamasına neden olmuş ve sonuç olarak maksimum yük taşıma kapasitesi geleneksel kirişten daha düşük kalmıştır.



Şekil 3. 29. ECC ve geleneksel beton silindir numuneleri.



a)



b)



c)



d)

Şekil 3. 30. a) C25 normal beton silindir numune, b) Normal betonun basınç deneyi sonrası görüntüsü, c) ECC beton silindir numune, d) ECC betonun basınç deneyi sonrası görüntüsü.



a)



b)



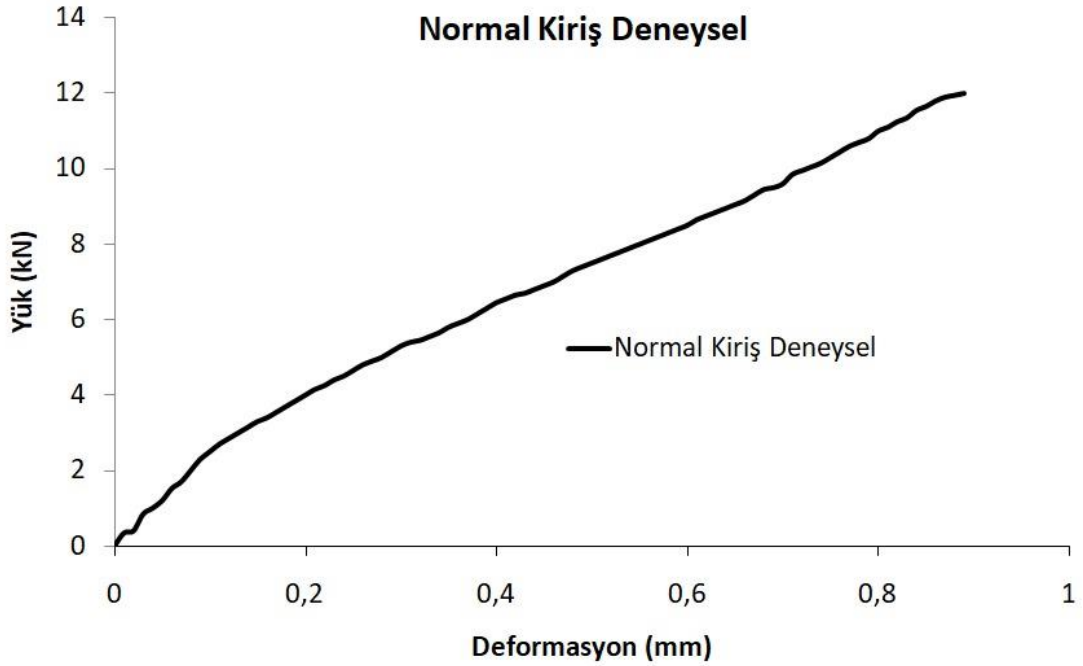
c)



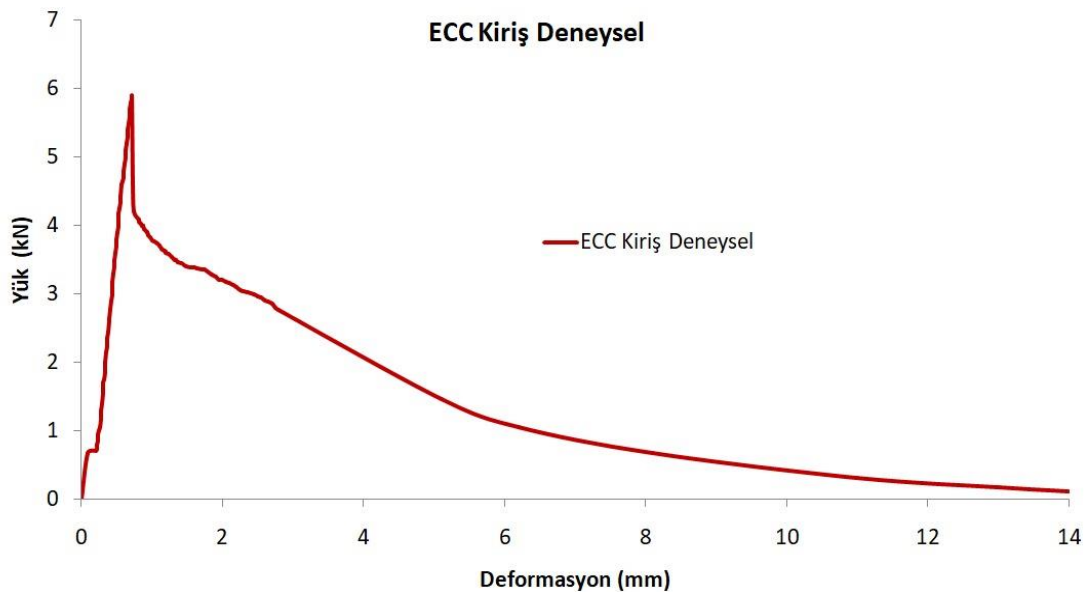
d)

Şekil 3. 31. a-b) Şahit kiriş kiriş eğilme deneyi, c-d) ECC kiriş eğilme deneyi.

Dört nokta eğilme deneyleri sonrası normal kiriş ve ECC kiriş deneysel yük deformasyon eğrisi elde edilmiştir (Şekil 3.32-33) Elde edilen bu veriler analitik modellemeye ECC malzemesinin mekanik özelliklerinin parametrik olarak tanımlanmasında kullanılmıştır.



Şekil 3. 32. Normal kiriş yük-deformasyon eğrisi.



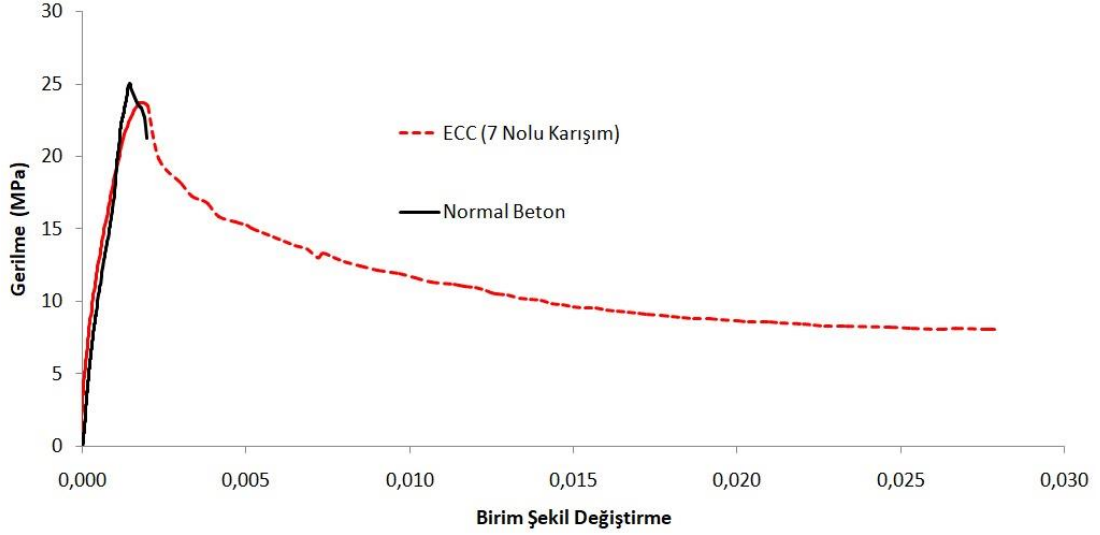
Şekil 3. 33. ECC kiriş yük-deformasyon eğrisi.

3.3. Analitik Çalışmalar Yöntemi

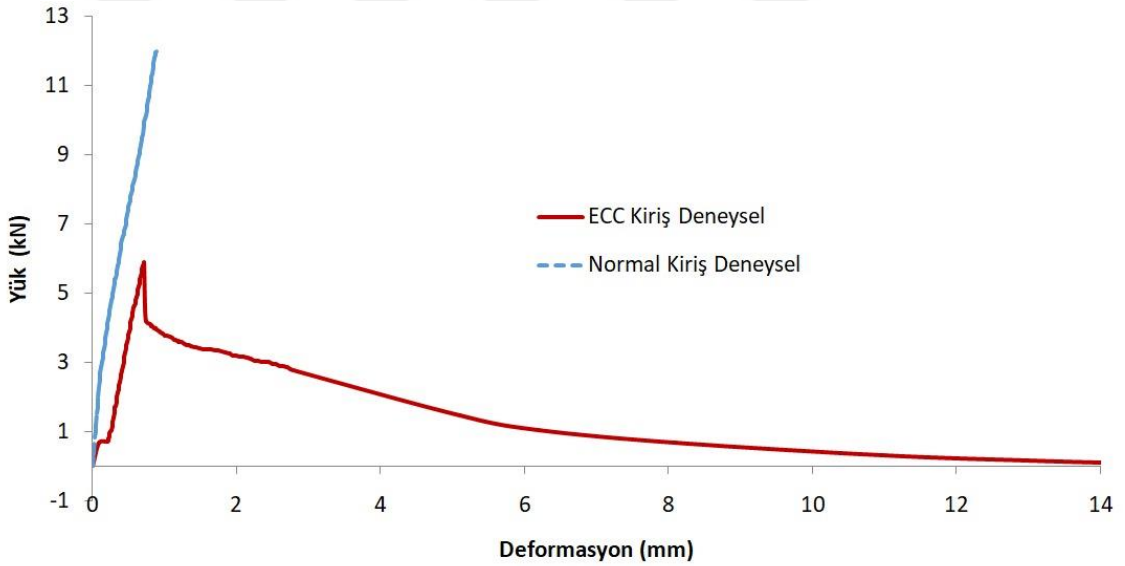
Tez çalışmasında ECC karışım optimizasyonuna yönelik malzeme deneyleri gerçekleştirilmiş, bu deneyler sonucunda en iyi mekanik özelliklere sahip karışım elde edilmiştir. Karışım optimizasyonu gerçekleştirilirken birim hacim ağırlığı $1,56 \text{ ton/m}^3$ değerinde ve basınç dayanımı 25 MPa dayanıma yakın değerde olan 7 nolu karışımdan 150x300 mm silindir numune üretilmiştir. Bu silindir numune üretilirken 25 MPa dayanıma sahip normal betondan da bir silindir numune elde edilmiştir. Silindir numuneler üretilirken 7 nolu karışımdaki ECC ve normal betondan ölçekli kiriş numuneler de üretilmiştir. Malzeme çalışmaları yöntemi bölümünde kiriş eğilme deneyleri detaylandırılmıştır. Tez kapsamında gerçekleştirilen kiriş eğilme deneyleri sonuçları ECC malzemesinin teorik davranışının elde edilmesi için kullanılmıştır. Silindir deneyleri sonucunda elde gerilme- birim şekil değiştirme grafikleri davranışın deneylere en yakın şekilde modellenebilmesi için analitik çalışmalarda dikkate alınmıştır. Bu çerçevede analitik çalışmalar kapsamında ilk olarak kiriş eğilme deneylerinin analitik modellenmesi yapılmıştır. Modelleme aşamasında ECC davranışını en iyi yansıtacak detay parametreler elde edilmiştir. Kiriş eğilme deneyi sonuçları analiz modellerinin kalibrasyonu için kullanılmıştır. Deneysel verilerle doğrulanan analiz modelleri elde edildikten sonra örnek betonarme çerçeveler modellenmiş, bu çerçevelerde literatürde kabul görmüş yöntemlerle dolgu duvar modellenmesi yapılmış, dolgu duvarların teorik davranışı belirlenmiş ECC malzemesi ile güçlendirilmesi analitik olarak araştırılmıştır. Dolgu duvarlar üzerine sırasıyla: 20 mm, 40 mm, 80 mm ve 100 mm kalınlığında ECC katmanlar modellenmiş, çerçeve kapasitesindeki değişim grafikleştirilmiştir. Çerçeve analizlerinde statik itme analizi yöntemi kullanılmıştır. Analizlerde SAP2000 v.26.2 yazılımı kullanılmıştır (Computers and Structures Inc.,2025). Dolgu duvarların tamamen ECC ile inşası durumu da analitik olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda tez çalışmasında en iyi malzeme değerlerini elde etmeye yönelik deneyler sonrasında gerçekleştirilen analitik çalışmalarla dolgu duvarların inşasında ve güçlendirilmesinde ECC malzemesinin kullanımına yönelik bulgulara ulaşılmıştır.

3.3.1. Kiriş eğilme deneyleri analitik modeli

Malzeme çalışmaları yöntemi bölümünde detaylandırılan kiriş eğilme ve silindir deney sonuçlarında normal beton ve ECC gerilme-şekil değiştirme eğrileri (Şekil 3.34) ile kiriş yük-deformasyon (Şekil 3.35) eğrileri kıyaslaması verilmiştir.



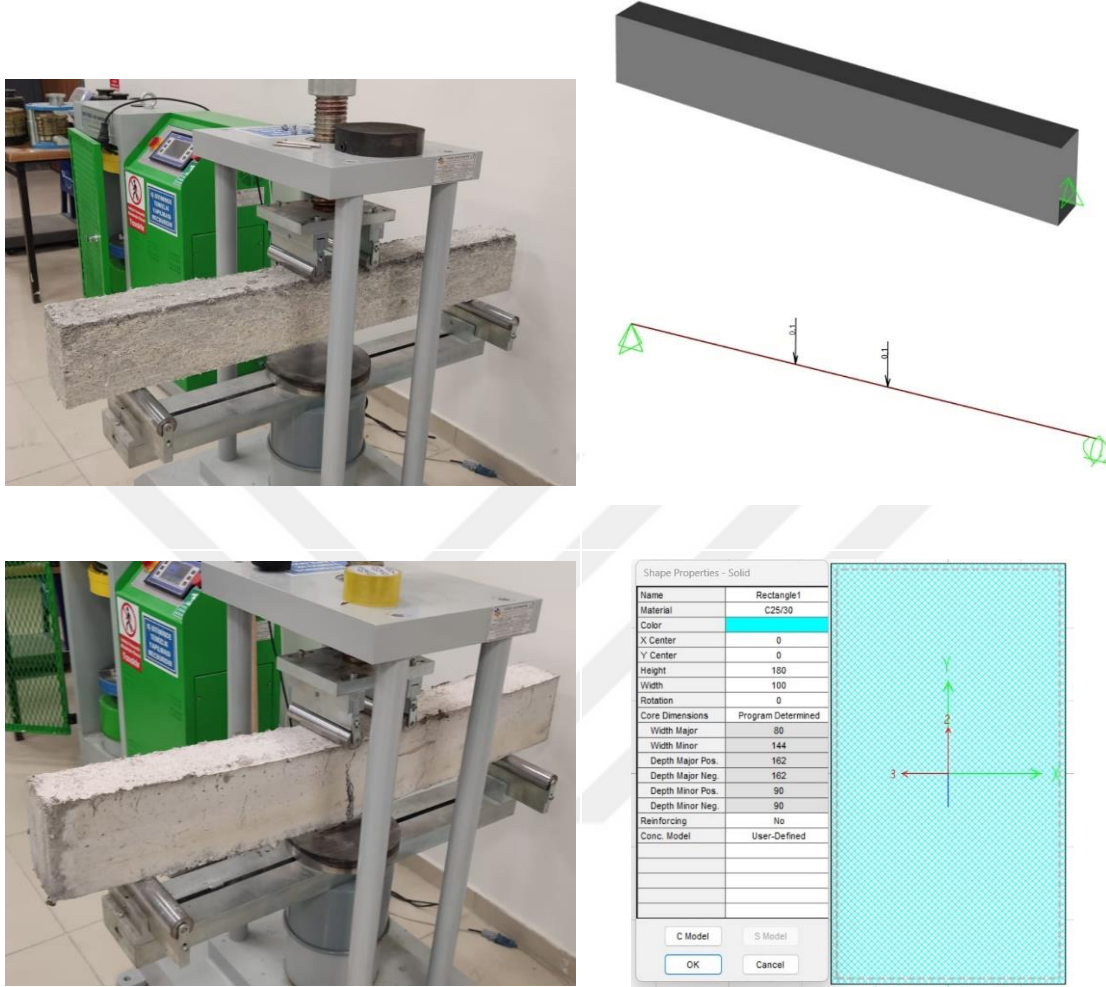
Şekil 3. 34. 7 nolu karışımın ECC ve normal beton arasındaki gerilme- birim şekil değiştirme eğrisi



Şekil 3. 35. ECC kiriş ve normal kiriş yük- deformasyon eğrileri.

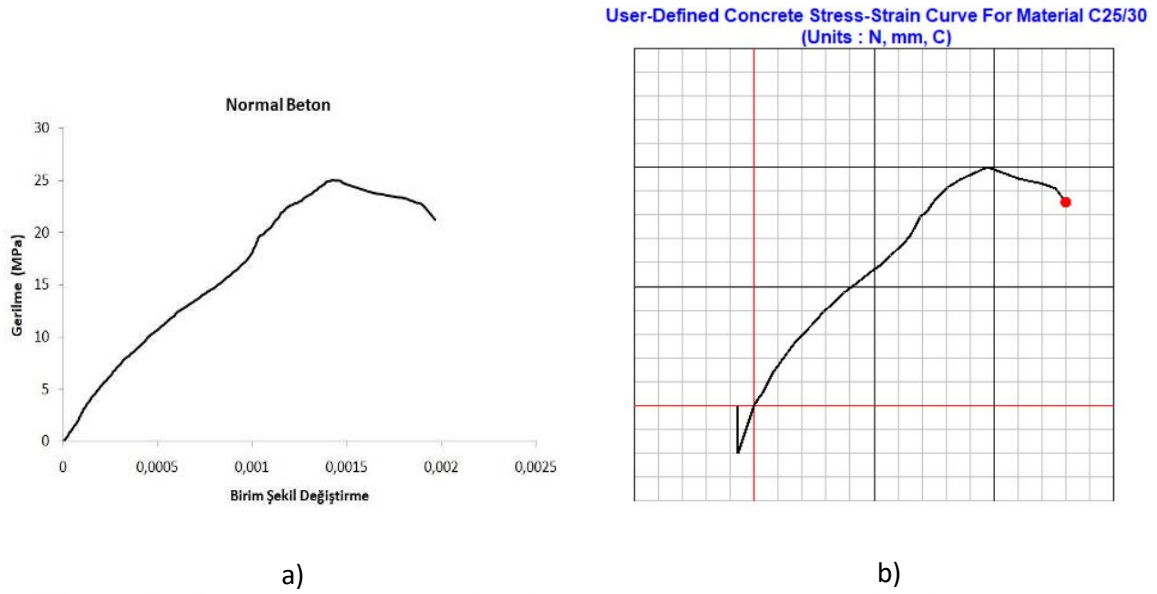
Gerilme-şekil değiştirme eğrilerinden ECC malzemesi ile normal betonun basınç dayanımı açısından yakın değerler verdiği ancak nihai şekil değiştirme kapasitesi açısından ECC'nin 14 kat daha fazla sünek olduğu görülmüştür. Ancak kiriş eğilme deneylerinde normal betonda elde edilen maksimum yük değerinin ECC kirişe oranla 2 kat daha fazla olduğu, buna karşın ECC kirişin maksimum deformasyon değerinin normal kirişe göre 16 kat daha fazla olduğu görülmüştür. Deneysel gözlemlerde bu durumun oluşmasında ECC'nin ilk çatlama dayanımının betona oranla daha küçük olması etkili olmuştur. Tüm bu deneysel sonuçlara bağlı mekanik değerlendirmeler esas alınarak öncelikle normal kiriş, sonrasında ECC kiriş modellenmiş ve deneysel bulgularla analitik

sonuçlar karşılaştırılmıştır. Burada ECC malzemesinin mekanik davranışının ve model parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır.



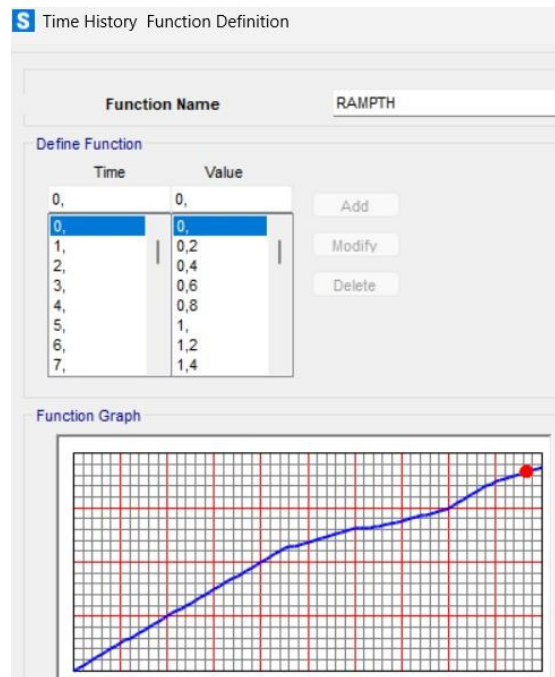
şekil 3. 36. Kiriş numuneleri analitik modeli.

Modelleme SAP2000 yazılımında gerçekleştirilmiştir. Deneysel olarak incelenen kiriş, yazılımda birebir modellenmiştir. Modelde kiriş genişliği 100 mm, kiriş yüksekliği 180 mm ve kiriş açıklığı 1200 mm olarak deney numunesinin analitik modeli oluşturulmuştur. Deneylerde dört nokta eğilme deneyi uygulanmıştır. Dört nokta eğilme deneyi analitik model üzerinde 2 noktaya yükleme tanımlanarak modellenmiştir (şekil 3.36). Malzeme tanımında normal beton için, silindir deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisi programa girilmiştir (şekil 3.37).



Şekil 3. 37. a) Normal beton deneysel, b) Normal beton analitik değerleri.

Deneylerde kullanılan kiriş numunesinde donatı bulunmadığından donatı modellenmemiştir. Betonun çekme davranışı için Mander parametrik modeli kullanılmıştır. Çekme davranışı için birçok deneme gerçekleştirilmiş, deneysel yük-deformasyon eğrisi ile en uyumlu model esas alınmıştır. Deneysel yükleme durumunun modellenmesi için programda zaman tanım alanı fonksiyonu (time history function) tanımlanmıştır (Şekil 3.38). Bu fonksiyonda analizlerde yakınsama sağlanacak adımlar optimize edilmiş ve bu adımlarla analiz gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. 38. Zaman tanım alanı yük fonksiyonu (Computers and Structures Inc, 2025).

Yükleme adımları model mesnetlerinde 1 kN artım oluşturacak şekilde uygulanmıştır. TÜRKİYE Bina Deprem Yönetmeliği 2018’de (TBDY 2018) dayanıma göre tasarımda betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının kesit özelliklerinin modellenmesinde (Tablo 3.11) verilen etkin kesit rijitliği çarpanlarının kullanılacağı belirtilmiştir.

Tablo 3. 12. Betonarme taşıyıcı sistem elemanlarının etkin kesit rijitliği çarpanları (TBDY 2018)

Betonarme Taşıyıcı Sistem Elemanı	Etkin Kesit Rijitliği Çarpanı	
Perde – Döşeme (Düzlem İçi)	Eksenel	Kayma
Perde	0.50	0.50
Bodrum perdesi	0.80	0.50
Döşeme	0.25	0.25
Perde – Döşeme (Düzlem Dışı)	Eğilme	Kesme
Perde	0.25	1.00
Bodrum perdesi	0.50	1.00
Döşeme	0.25	1.00
Çubuk eleman	Eğilme	Kesme
Bağ kirişi	0.15	1.00
Çerçeve kirişi	0.35	1.00
Çerçeve kolonu	0.70	1.00
Perde (eşdeğer çubuk)	0.50	0.50

TBDY 2018’de kiriş için etkin eğilme rijitliği çarpanı 0,35 olarak belirtilmektedir. Tez kapsamında etkin kesit rijitliği 1 olarak yapılan analizlerde deneysel nihai deformasyon değerinin %30’una ulaşılabilmiştir. Bu sebeple TBDY 2018’de etkin kesit rijitliği çarpanı uygulanmış deneysel deformasyonla uyumlu sonuç elde edilmiştir. Normal betonun elastisite modülü değeri deneysel silindir gerilme-şekil değiştirme eğrisi verilerinden 17671 MPa olarak belirlenmiştir. Malzeme basınç dayanımı için grafikten 25 MPa değeri tanımlanmıştır (Şekil 3.39).

S Material Property Data

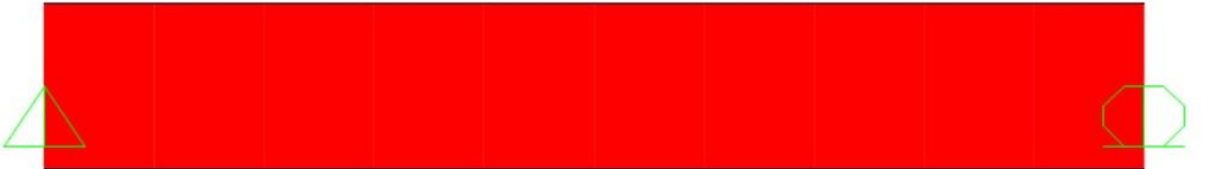
Material Name C25/30	Material Type Concrete	Symmetry Type Isotropic
Modulus of Elasticity E 17671,	Weight and Mass Weight per Unit Volume 2,499E-05 Mass per Unit Volume 2,549E-09	Units N, mm, C
Poisson U 0,2	Other Properties For Concrete Materials Specified Concrete Compressive Strength, f _c 25, Expected Concrete Compressive Strength 25, ☐ Lightweight Concrete Shear Strength Reduction Factor	
Coeff of Thermal Expansion A 1,000E-05		

Şekil 3.39. Normal beton analitik parametreleri.

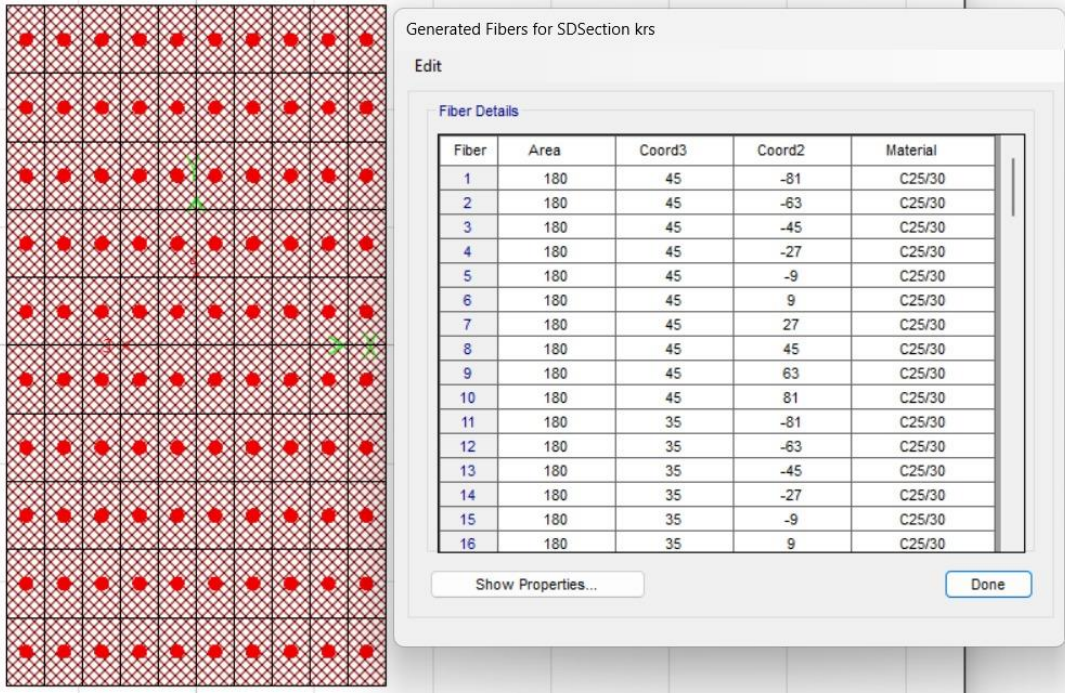
Analitik modelde kırılma davranışı modelleyebilmek için fiber plastik mafsallı model yaklaşımı kullanılmıştır. Kiriş 10 parçaya ayrılmış, ayrılan her kiriş parçasının başına ve sonuna kesit özelliklerine bağlı kapasiteyi tanımlayan fiber mafsallar tanımlanmıştır (Şekil 3.40). Kesit 10x10 fiber parçalara ayrılarak moment eğrilik kapasitesi elde edilmiştir (Şekil 3.41).



a)



b)



c)

Şekil 3. 40. a-b-c-) Fiber plastik mafsal modeli.

MOMENT CURVATURE ($M-\phi$) GRAPH - KN, m, C

Axial Load = 0
Moment Angle = 0



Şekil 3. 39. Normal kiriş moment eğrilik kapasitesi.

Tüm bu parametreler tanımlandıktan sonra kiriş için “Nonlinear Direct Integration History” analizi Hilber-Hughes-Taylor yöntemi ile uygulanmıştır (Şekil 3.42). Analizler sabit yük üzerine tanımlanan yükleme eğrisi uygulanarak 100 adımda tamamlanmıştır. Analiz sonucunda kiriş orta noktası deformasyon ve kiriş mesnetleri toplam düşey yük değişimi grafiği elde edilmiştir.

Load Case Data - Nonlinear Direct Integration History

Load Case Name: ACASE1 **Set Def Name** **Notes:** **Modify/Show...**

Initial Conditions:
☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
☒ Continue from State at End of Nonlinear Case **DEAD**
 Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case:
 Use Modes from Case **MODAL**

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Function	Scale Factor
Load Pattern	DEAD	RAMP	1,
Load Pattern	DEAD	RAMP	1,

Add **Modify** **Delete**

☐ Show Advanced Load Parameters

Time Step Data:
 Number of Output Time Steps: 100
 Output Time Step Size: 1,

Other Parameters:
 Damping: None **Modify/Show...**
 Time Integration: Hilber-Hughes-Taylor **Modify/Show...**
 Nonlinear Parameters: Default **Modify/Show...**

Load Case Type: Time History **Design...**

Analysis Type: ☐ Linear ☒ Nonlinear
Solution Type: ☐ Modal ☒ Direct Integration

Geometric Nonlinearity Parameters:
☒ None
☐ P-Delta
☐ P-Delta plus Large Displacements

History Type: ☒ Transient ☐ Consider Collapse
☐ Periodic

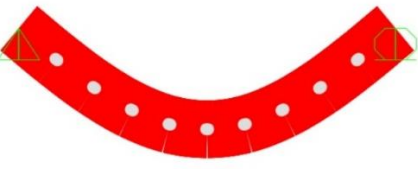
Mass Source: Previous

OK **Cancel**

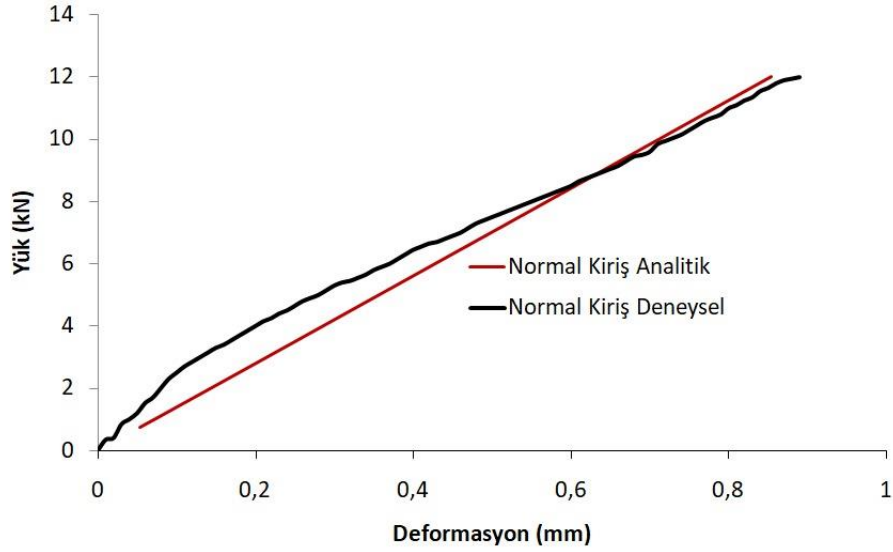
Şekil 3. 42. Nonlinear Direct Integration History Analizi.

Elde edilen grafik deneysel veri ile kıyaslanmıştır. Normal betondan üretilen kiriş numunesi dört nokta eğilme deneyi malzeme, kesit, mesnet, rijitlik azalımı, deneysel yükleme aşamaları modellenmiş, model analizi sonucunda deneysel sonuçlarla uyumlu bir yük-deformasyon eğrisi elde edilebilmiştir.

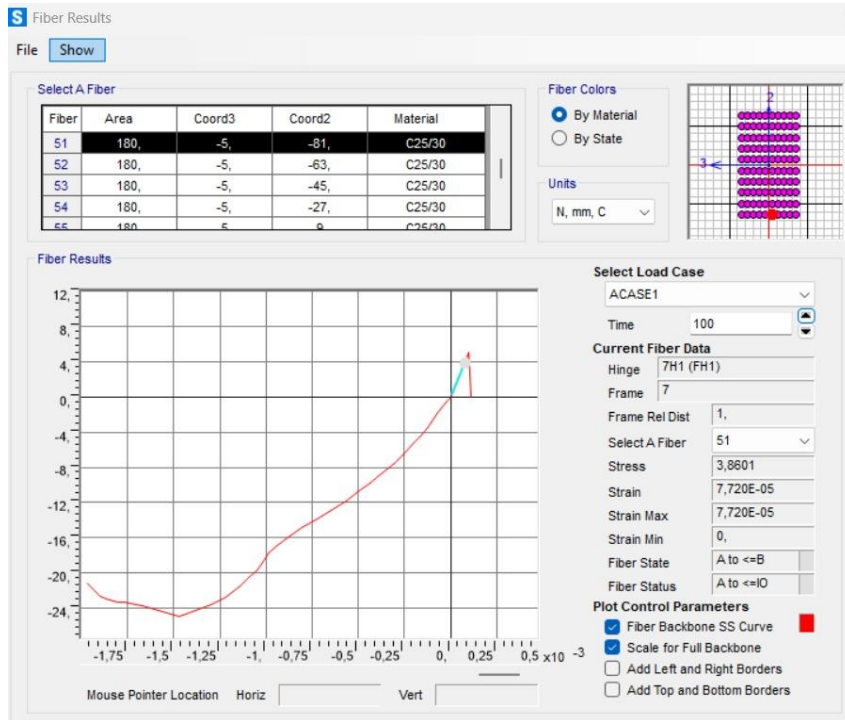
Tablo 3. 13. 100 adımda uygulanan kiriş analitik modeli.

Kiriş Modeli	Yük Adım Aralığı
	Yük Adımı 1-10
	Yük Adımı 10-20
	Yük Adımı 20-30
	Yük Adımı 30-40
	Yük Adımı 40-50
	Yük Adımı 50-60
	Yük Adımı 60-70
	Yük Adımı 70-80
	Yük Adımı 80-90
	Yük Adımı 90-100

Normal beton için analitik ve deneysel kiriş sonuçlarının karşılaştırmasını gösteren grafik Şekil 3.43’da gösterilmiştir. Analizin ilerleyen adımlarında fiber plastik mafsalsal kapasitesi açısından nihai dayanıma ulaşıldığı ve yakınsama sağlanamadığı belirlenmiştir. Bu kapsamda normal betonlu kirişin orta noktasındaki fiber üzerinde betonun çekme kapasitesine ulaşıldığı görülmüştür (Şekil 3.44). Bu sonuç kırılma durumunu doğrulamaktadır.

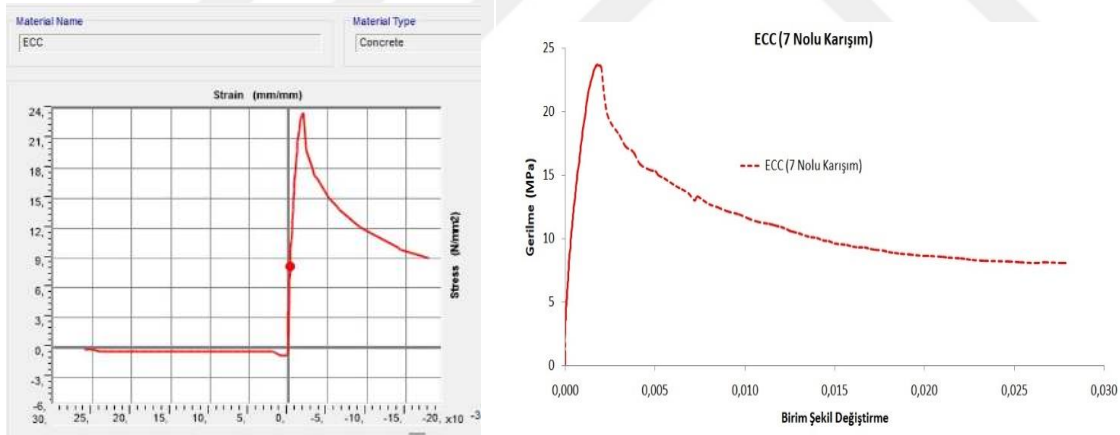


Şekil 3. 40. Normal kiriş analitik ve deneysel sonuçları.



Şekil 3. 414. Kiriş orta noktası fiber mafsalsal gerilme durumu.

Normal betonlu kirişin analitik modeli tamamlandıktan sonra ECC malzemesinden üretilen kirişin analitik modeline geçilmiştir. ECC kirişin modellenmesinde ilk olarak gerilme-şekil değiştirme eğrisi tanımlanmıştır. Normal beton ile tanımlanan kiriş modelinde malzeme özellikleri değiştirilmiştir. Ancak ECC malzemesi ile üretilen kiriş deneysel sonuçlarına ulaşabilmek için onlarca farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde ECC ile normal beton arasındaki en önemli analitik parametrik farkın ECC'nin çekmede çatlama dayanımının normal betona göre düşük olması olmuştur. Bununla birlikte ECC malzemesinin çekme gerilmeleri etkisinde normal beton gibi gevrek bir davranış göstermemesi durumu da analiz modelinde dikkate alınmıştır. Bu kapsamda ECC modelinde çekmede ilk çatlama dayanımı normal betonun %23'ü olarak tanımlanmıştır. 0,8 MPa olarak tanımlanan çekmede ilk çatlak dayanımının lif etkisine bağlı olarak 0,001 birim şekil değiştirme değerine kadar devam ettiği, çekmede nihai şekil değiştirmenin ise 0,02 birim şekil değiştirme değerinde ilk çatlama dayanımının %25'i seviyesinde ulaştığı deney sonuçlarına göre model kalibrasyonu ile elde edilmiştir. Silindirik deneyleri gerilme-şekil değiştirme eğrisinden ECC malzemesinin E modülü 16130 MPa, basınç dayanımı ise 23 MPa olarak modele girilmiştir (Şekil 3.45).



Şekil 3. 425. ECC beton gerilme- şekil değiştirme eğrileri.

ECC kiriş modeli analizinde yükleme adımları için çok daha küçük artırımlarla doğrusal 500 adım uygulanmıştır. Etkin kesit rijitliğinde bu modelde de 0,35 değeri kullanılmıştır. ECC malzemesinin analitik olarak modellenmesinde en zor parametre optimizasyonunu çekme davranışını tanımlamak olmuştur. Burada deneysel gözlemlere dayalı kabuller yapılmıştır. Fiber mafsallı yaklaşımının kullanıldığı modelde moment eğrilik grafiğinden normal betona göre oldukça sünek bir davranışın ortaya çıktığı görülmüştür. ECC malzemesinin parametrik olarak modelinde maksimum moment

kapasitesinin 1,12 kNm olduğu, maksimum eğrilik değerinin ise 0,2 olduğu görülmüştür. Normal betonun ise maksimum moment kapasitesinin 2,12 kNm olduğu, nihai eğrilik değernin ise 0,012 olduğu modele tanımlanan gerilme- şekil değiştirme değerleri sonucunda belirlenmiştir (Şekil 3,46). Deneysel çalışmalar sonucu laboratuvarda elde edilen ECC malzemesinin maksimum moment kapasitesi normal betona göre düşük olurken, deformasyon kabiliyetinin normal betonun 1,66 katı olduğu analiz modellerinin kıyaslamasıyla belirlenmiştir. Deneylerde 7 nolu ECC karışımından elde edilen kirişte çatlağın çok küçük yükte meydana geldiği, çatlak oluşuktan sonra normal betonlu kirişe göre daha düşük yük değerlerinin oluştuğu, ancak normal betonlu kirişe göre çok sünek bir kırılma biçiminin ortaya çıktığı belirlenmiştir. ECC kiriş modelinde de doğru kıyaslamaların yapılabilmesi için deneysel numunelere uygun olarak donatı tanımlanmamıştır. ECC malzeme özellikleri parametreleri tanımlandıktan sonra nonlinear direkt integrasyon analizi başlatılmıştır. Normal betonlu kirişte olduğu gibi etkin kesit rijitliği, malzeme çekme gerilme- şekil değiştirme eğrisi parametreleri, yük adımları değiştirilerek onlarca farklı model denenmiştir. Bu modeller içerisinde gerilme-şekil değiştirme eğrisi Şekil 3.47’de verilen basınç gerilme değerleri için deneysel veri kullanılmış, çekme değerleri için ise analiz modelinin deneysel verilerle kalibrasyonu ile elde edilen değerler dikkate alınmıştır. Analizlerde bu parametrik tanımlama en iyi sonucu vermiştir.

MOMENT CURVATURE ($M-\phi$) GRAPH - KN, m, C

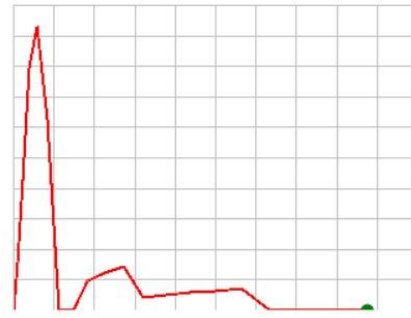
Axial Load = 0
Moment Angle = 0



a) ECC

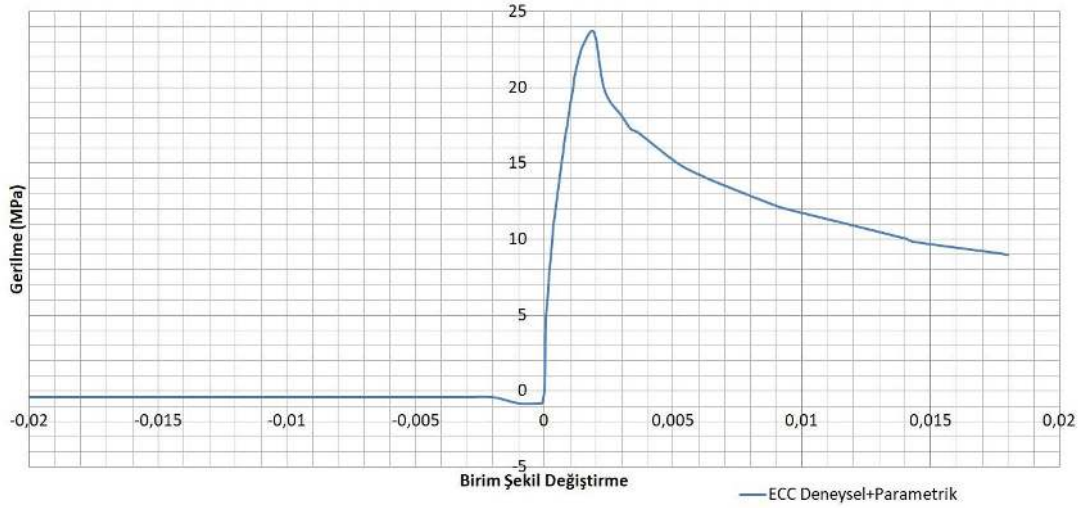
MOMENT CURVATURE ($M-\phi$) GRAPH - KN, m, C

Axial Load = 0
Moment Angle = 0



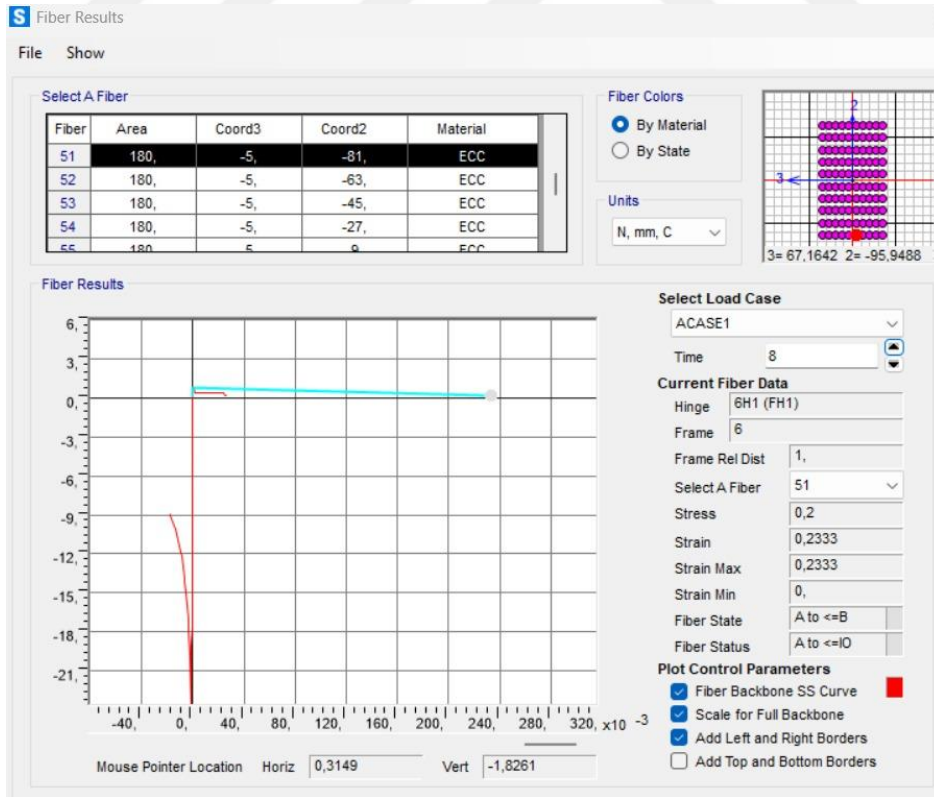
b) Normal beton

Şekil 3. 436. Moment- eğrilik diyagramı.



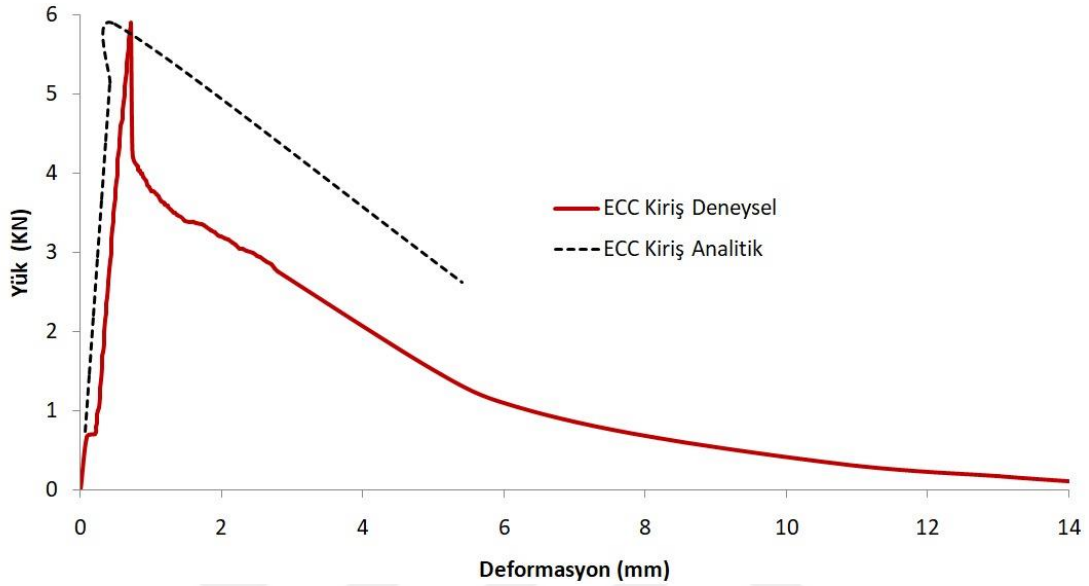
Şekil 3. 447. ECC deneysel + parametrik gerilme-şekil değiştirme eğrisi.

Gerçekleştirilen analizler sonucunda kiriş orta noktasındaki deformasyon ve kiriş mesnetlerinde oluşan toplam düşey yük eğrisi çizdirilmiştir. Normal betonda olduğu gibi burada da davranış açısından belirgin olan malzemenin çekme dayanımı parametresi olmuştur. Kiriş orta noktası fiber sonuçları incelendiğinde kesitin çekme kapasitesine ulaştığı belirlenmiştir (Şekil 3.48).



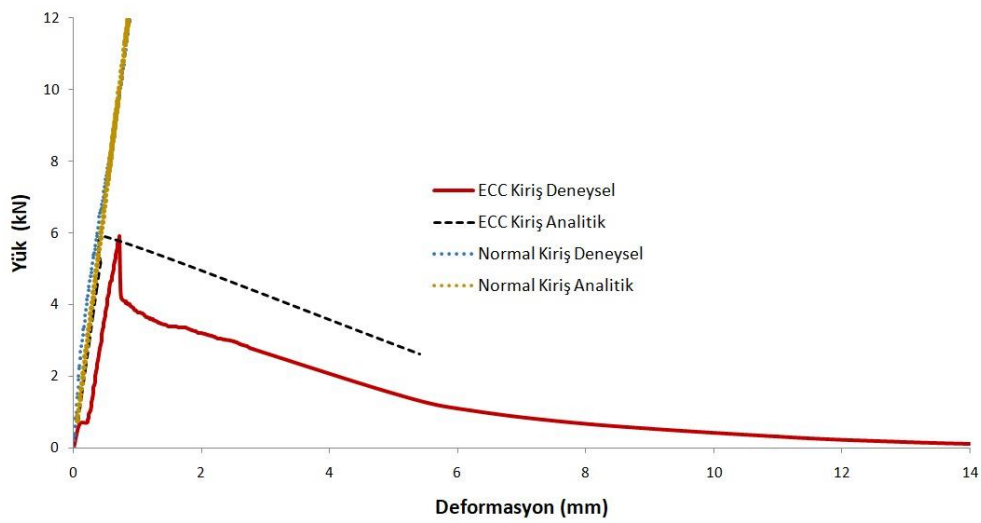
Şekil 3. 458. Kiriş orta noktası fiber sonuçları.

Ancak modelde lif etkisi tam olarak yansıtılamamıştır. ECC’li kiriş numunesi deneysel sonuçları ile analitik sonuçlar karşılaştırıldığında Şekil 3.49 elde edilmiştir. Bu analiz sonucunda deneysel veriler dikkate alınarak ECC malzemesi mekanik davranışı kısmen modellenebilmiştir.



Şekil 3. 469. ECC kirişin deneysel ve analitik yönden yük-deformasyon eğrisi.

Lif etkisini modelleyebilmek için daha ileri modelleme yaklaşımlarının kullanılması gereksinimi görülmüştür. Deneysel veriye uygun maksimum dayanım değeri ve rijitlik azalımı oranı tanımlanabilmektedir. Analizler sonucunda ECC ve normal kirişten elde edilen deneysel ve analitik sonuçlar Şekil 3.50’ de kıyaslamalı olarak verilmiştir.



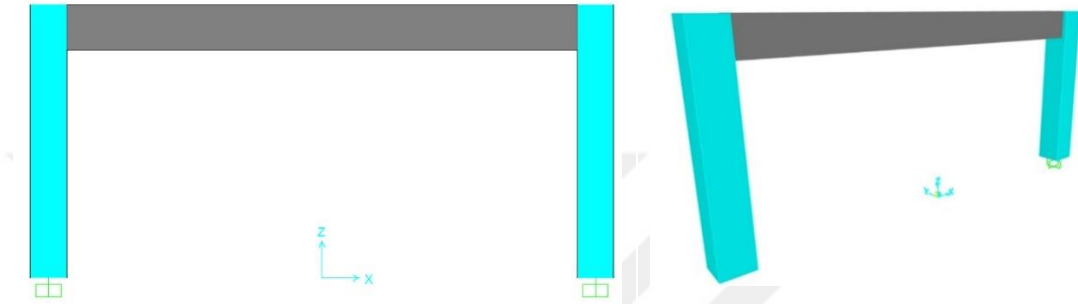
Şekil 3. 47. ECC ve Normal beton kiriş deneysel ve analitik kıyaslama.

SAP2000 yazılımı ile gerçekleştirilen parametrik analizlerde modelin kalibrasyonu için dört nokta eğilme sonuçları kullanılmıştır. Her bir parametrenin farklı değerleri için gerçekleştirilen analizlerde deneysel çalışmalarda kullanılan ECC malzemesinin davranış modeli elde edilebilmiştir. Donatısız kiriş eğilme deneylerinde malzemenin çekme altındaki davranışı parametrik olarak modellenenmiştir. Kiriş analitik çalışmaları sonucu elde edilen bu parametrik model dolgu duvarlı çerçevelerin inşasında veya güçlendirilmesinde ECC malzemesinin kullanımına yönelik analizlerde esas alınmıştır. Bu analizlerde esas alınan ECC davranışı için tez kapsamında deneysel olarak incelenen karışımlar kullanılmıştır. Bu çerçevede 7 nolu karışım dikkate alınarak analizler gerçekleştirilmiştir. Ancak burada farklı karışım parametrelerinden elde edilen her bir ECC için farklı bir davranış modelinin ortaya çıkabileceği görülmüştür. Bu sebeple çimento esaslı kompozit malzemeler için tek ve kesin bir parametrik modelin elde edilmesinin çok karmaşık bir problem olduğu tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalarda ECC malzemesinden elde edilen kirişin normal betondan elde edilen kirişe göre 14 kat daha fazla sünek bir davranış gösterdiği belirlenmiştir. Bu davranış kısmen analitik model kıyaslamasında da görülebilmektedir. Analitik model kıyaslamasında normal betona göre 6 kat daha fazla sünek bir davranış elde edilebilmiştir. Analizin ilerleyen aşamalarında yük adımları çok azaltılmasına rağmen yakınsama problemleri ortaya çıktığından analiz devam edememiştir. Dolayısıyla analitik olarak deneysel deformasyon kapasitesinin %42'sine kadar deneysel veri ile uyumlu bir sonuç ortaya çıkmıştır. Bu aşamadan sonra deneysel ve parametrik çalışmalar neticesinde elde edilen davranış modeli kullanılarak betonarme çerçeve analitik model çalışmalarına geçilmiştir.

3.3.2. Dolgu duvarlı betonarme çerçeve analiz modeli

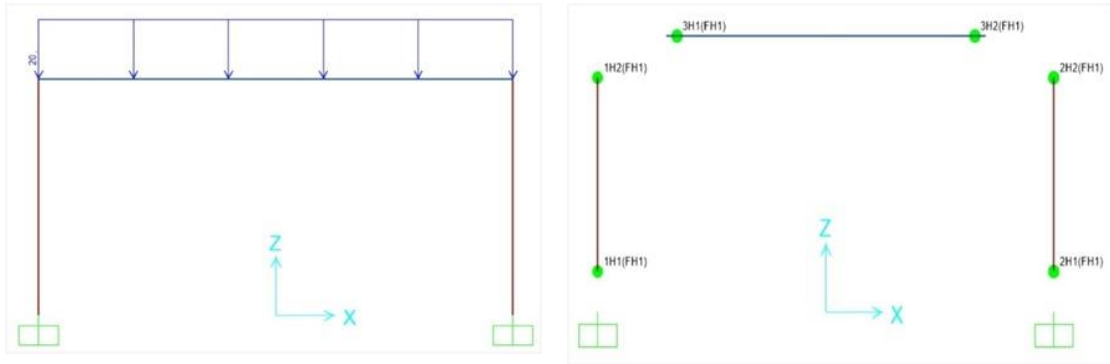
Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda farklı mekanik özelliklere sahip 49 karışım için testler gerçekleştirilse de sadece belirlenen 1 karışım için analitik çalışmalar yapılmıştır. Bu kapsamda 7 nolu karışım için gerçekleştirilen kiriş deneylerinde ECC malzemesinin mekanik davranışı analitik modeller üzerinden incelenmiştir. Bu bölümde deneysel verilerle büyük oranda doğrulanan bu teorik davranışın betonarme çerçeveler üzerindeki etkisi irdelenmiştir. ECC malzemesinin dolgu duvarların inşasında veya güçlendirilmesinde kullanımının değerlendirilmesine esas alan bu analizlerde referans bir çerçeve modellenmiş (Şekil 3.51), bu çerçevenin içerisine 130 mm kalınlıklı tuğla dolgu duvar modellenmiş, tuğla dolgu duvarın üzerinde

20 mm, 40 mm, 80 mm, 100 mm ECC sıva bulunması durumlarına göre çerçeve kapasindeki değişim kıyaslamalı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca dolgu duvarın tuğla yerine aynı kalınlığa sahip ECC birim elemanlardan oluşması durumunda çerçeve kapasitesinin nasıl etkilendiği değerlendirilmiştir. Bu amaç doğrultusunda SAP2000 programında bir referans çerçeve modellenmiştir, bu referans çerçeve 3000 mm yüksekliğe, 6000 mm açıklığa sahiptir. Kolon boyutları 400x400 mm, kiriş boyutları ise 250x 500 mm ölçülerdedir. Çerçeve beton malzemesi C30 olarak belirlenmiştir.



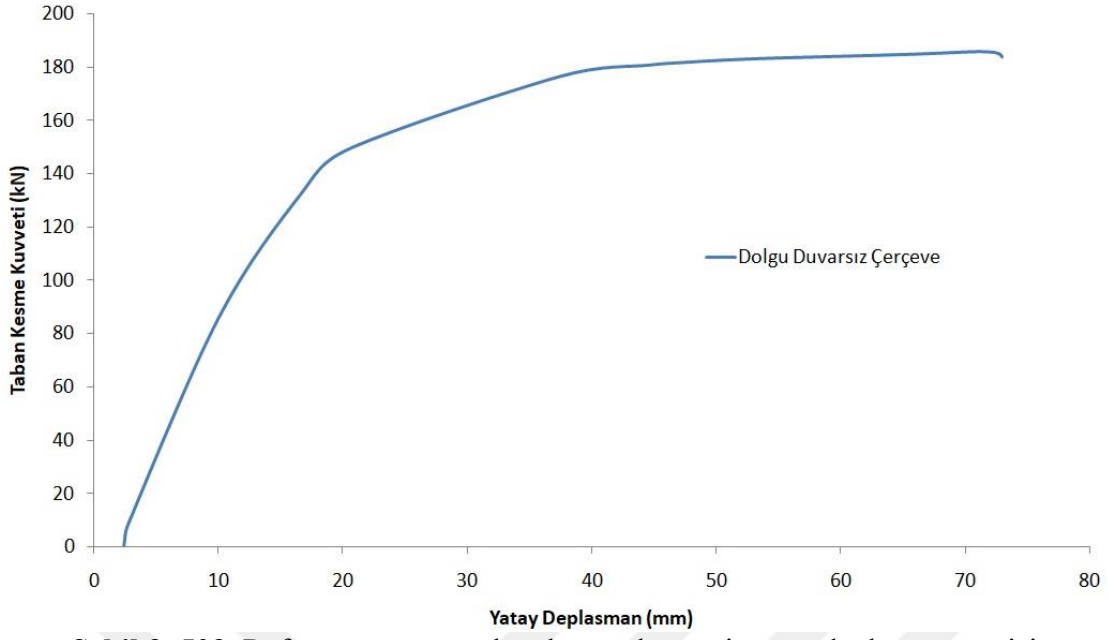
Şekil 3. 481. Referans çerçeve modeli.

Referans çerçeve modeline statik itme (Pushover) analizi uygulanmıştır. Çerçeve üzerine, kolonlara $N/N_0 = 0,1$ olacak şekilde eksenel yük uygulanmıştır. Çerçevede kolon ve kirişler için fiber mafsalları kullanılmıştır (Şekil 3.52).

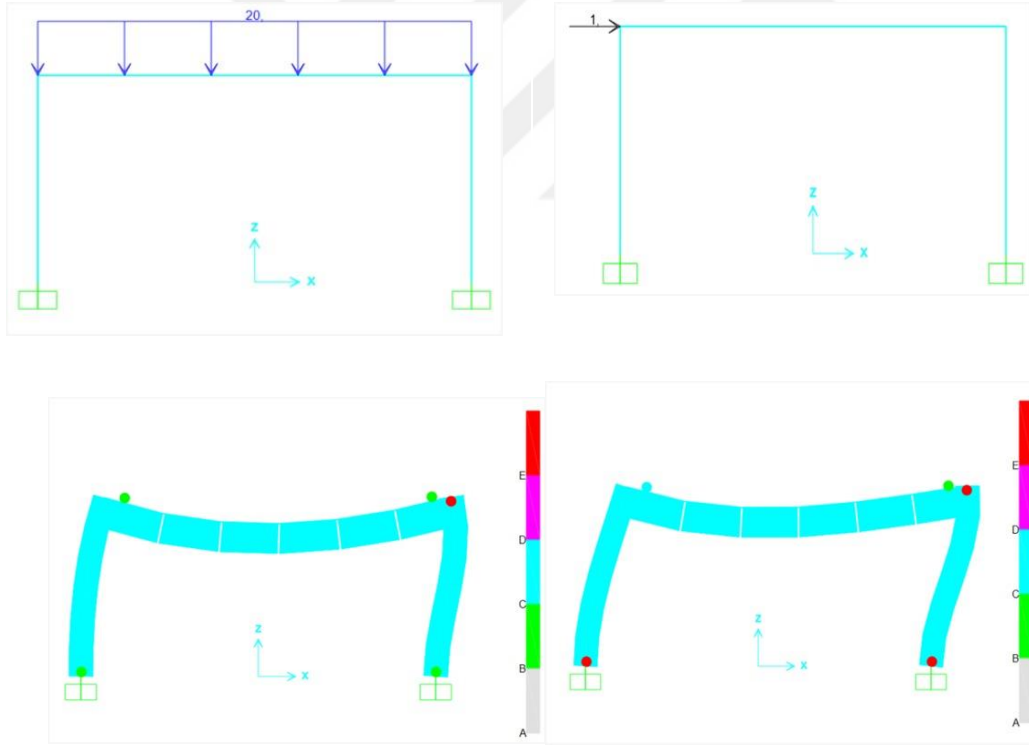


Şekil 3. 492. Referans çerçeve plastik mafsalları tanımları.

Deformasyon kontrollü olarak gerçekleştirilen itme analizi sonucunda statik itme eğrisi elde edilmiştir. Referans çerçevenin maksimum taban kesme kuvveti değerinin 183,68 kN, maksimum yatay deplasmanının ise 72,95 mm olduğu görülmüştür (Şekil 3.53-54).



Şekil 3. 503. Referans çerçeve taban kesme kuvveti-yatay deplasman eğrisi.



Şekil 3. 514. Dolgu duvarsız çerçeve pushover analizi.

Referans çerçeveye TBYD-2018 15C.2. “Dolgu Duvarların Hasır Çelik Donatılı Özel Sıva ile Güçlendirilmesi” bölümünde yer alan 15C.1 ve 15C.2 denklemleri (Şekil 3.55) kullanılarak dolgu duvarların eşdeğer basınç çubukları ile modellenmesi yöntemi dikkate alınarak 130 mm kalınlığında tuğla duvar modellenmiştir. Tuğla duvarın E

modülü ve basınç dayanımı literatürdeki araştırmalardan elde edilmiştir (Garip ve Dibekoğlu, 2022). Bu kapsamda dolgu duvar E modülü 2000 MPa, basınç dayanımı 3 MPa olarak modele tanımlanmıştır.

$$a_d = 0.175 (\lambda_d h_k)^{-0.4} r_d \quad (15C.1)$$

$$\lambda_d = \left[\frac{E_d t_d \sin 2\theta}{4 E_c I_k h_d} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (15C.2)$$

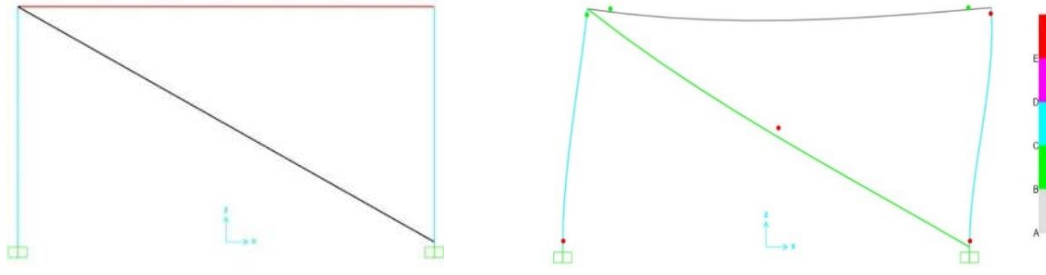
Şekil 3. 525. TBDY-2018 eşdeğer basınç çubuğu modelleme formülleri.

Denklemlerde E_d dolgu duvarın elastisite modülünü, t_d dolgu duvarın kalınlığını, θ eşdeğer basınç çubuğunun yatayla olan açısını, E_c çerçeve betonun elastisite modülünü, I_k kolonun atalet momentini, h_d dolgu duvarın yüksekliğini, λ_d eşdeğer basınç çubuğu katsayısını, h_k kolon boyunu, r_d dolgu duvarın köşegen uzunluğunu, a_d ise eşdeğer basınç çubuğunun genişliğini göstermektedir. Tüm bu parametreler hesaplanarak tuğla dolgu duvar için eşdeğer basınç çubuğu modeline yönelik değerler Tablo 3.13'te verilmiştir.

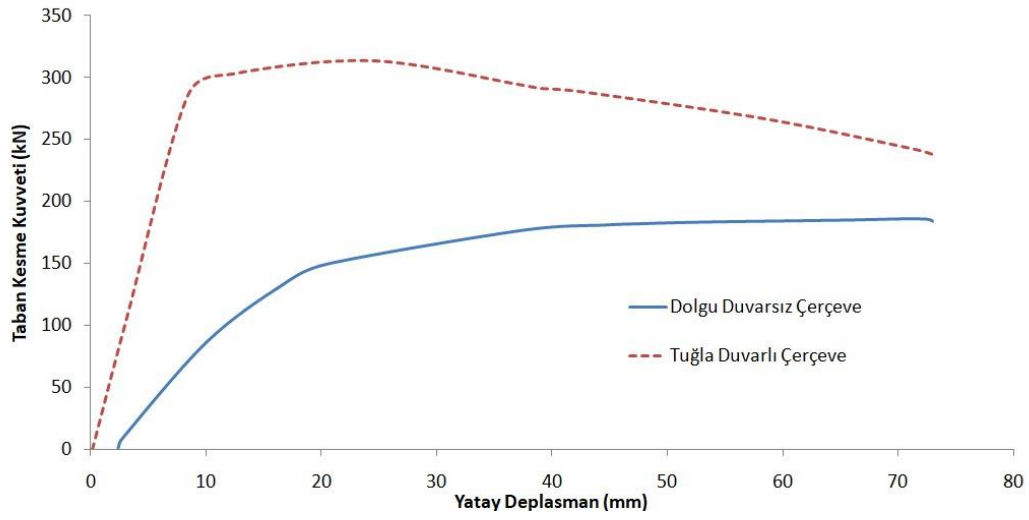
Tablo 3. 14. Tuğla dolgu duvar için eşdeğer basınç çubuğu parametreleri.

E_d (MPa)	t_d (m)	$\sin 2\theta$	E_c (MPa)	I_k (m ⁴)	h_d (m)	r_d (m)	λ_d	h_k (m)	a_d (m)
2000	0,13	0,86	31000	0,002	2,4	6,09	0,78	3	0,76

Analiz sonucunda tuğla dolgu duvarlı çerçevenin (Şekil 3.56) statik itme eğrisi elde edilmiştir. Bu eğri dolgu duvarsız çerçeve kapasite eğrisiyle kıyaslanmıştır. Tuğla dolgu duvarlı çerçevede maksimum taban kesme kuvvetinin 313,9 kN değerine ulaştığı görülmüştür. Dolayısıyla dolgu duvarsız çerçeveye göre maksimum taban kesme kuvveti değerinde 1,7 kat artış belirlenmiştir (Şekil 3.57). Bu artış oranının değerlendirilmesi için literatürde bulunan farklı deneysel araştırmalar incelenmiştir. Bu araştırmalarda da tuğla dolgu duvarların, belirlenen seviyede kapasite artışı ortaya çıkardığı doğrulanmıştır (Sevil ve ark., 2010; Coza, 2023).

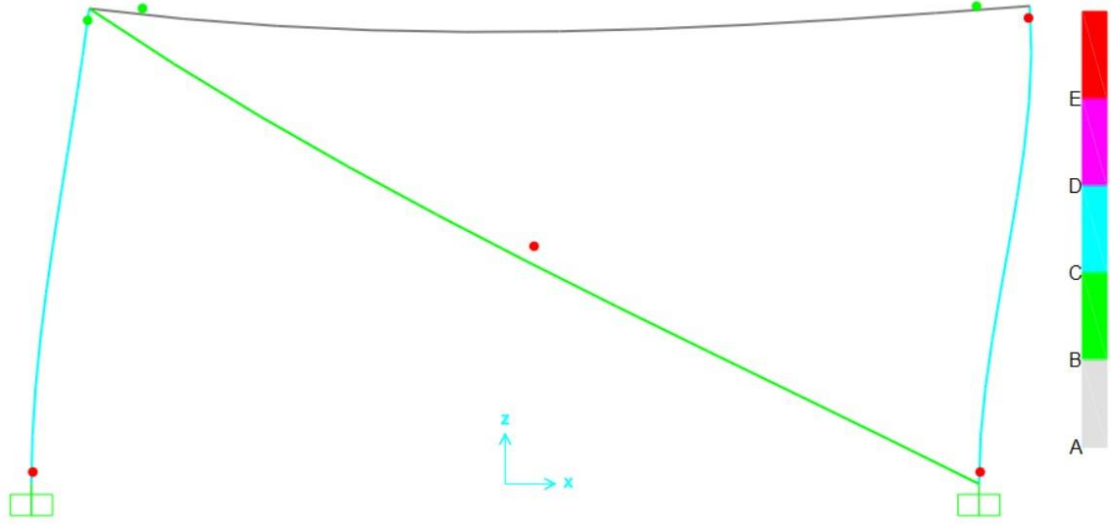


Şekil 3. 536. Dolgu duvarlı çerçeve modeli ve analizi.



Şekil 3. 54. Dolgu duvarsız ve tuğla duvarlı kapasite eğrisi karşılaştırılması.

Tuğla dolgu duvar modelinde, duvar kapasitesini tanımlayabilmek için eşdeğer basınç çubuğu orta noktasına aksenal yük mafsallı atanmıştır. Bu mafsallı ile tuğla malzemesinin gevrek davranışı modelde dikkate alınmıştır. Nihai statik itme adımı sonucunda eşdeğer basınç çubuğu orta noktasında göçme seviyesinde mafsallaşma oluşmuştur (Şekil 3.58).



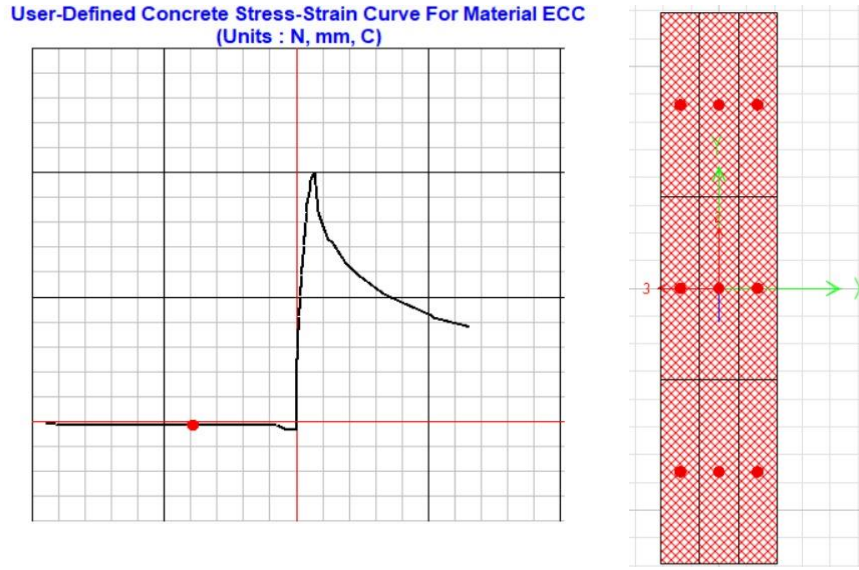
Şekil 3. 558. Tuğla dolgu duvarlı çerçeve plastik mafsalları dağılımı.

Tuğla duvarlı model kapasite eğrisi elde edildikten sonra, betonarme çerçevelerde dolgu duvarların inşasında ECC malzemesinden üretilen bir birim elemanın kullanılması durumunda çerçeve kapasitesinin ne oranda değişeceği analiz edilmiştir. Bu kapsamda eşdeğer basınç çubuğu parametreleri tez kapsamında kiriş deneyleri ile deneysel ve analitik olarak incelenen ECC parametreleri dikkate alınarak Tablo 3.14'te belirlenmiştir.

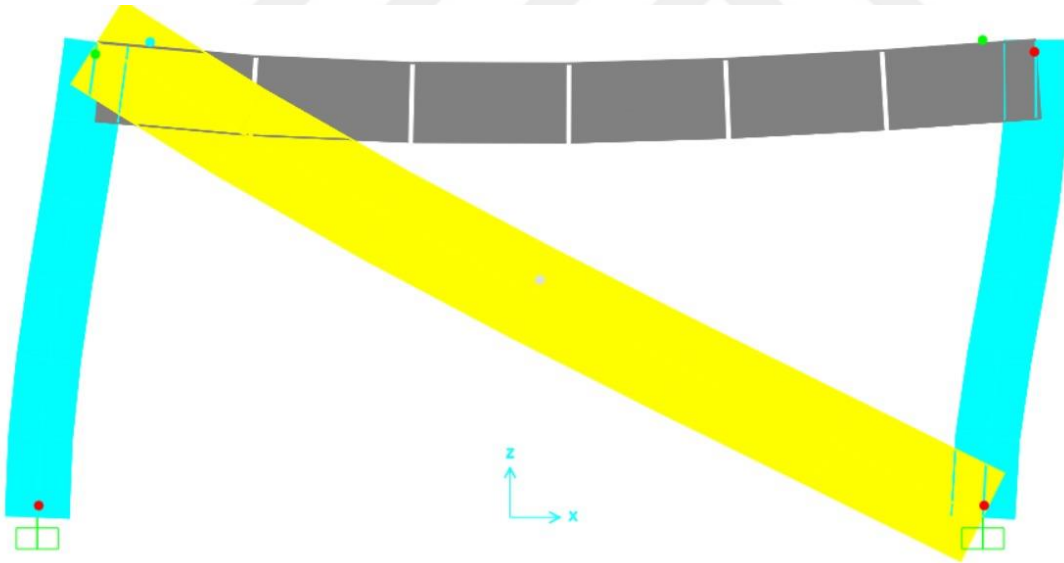
Tablo 3. 15. 130 mm kalınlıklı ECC birim eleman parametreleri.

E_d (MPa)	t_d (m)	$\sin 2\theta$	E_c (MPa)	I_k (m ⁴)	h_d (m)	r_d (m)	λ_d	h_k (m)	a_d (m)
16130	0,13	0,86	31000	0,002	2,4	6,09	1,31	3	0,62

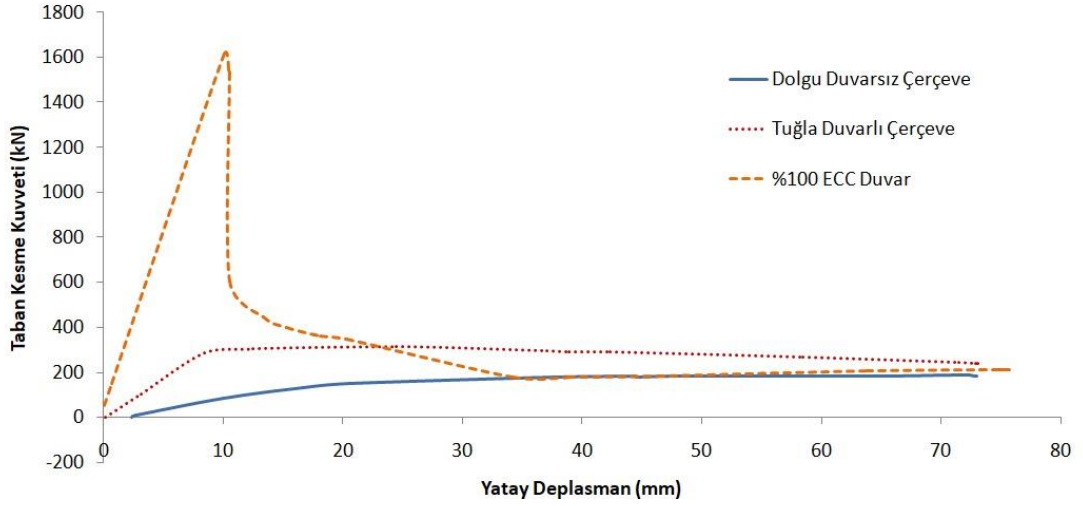
Bu modelde eşdeğer basınç çubuğu orta noktasına kiriş deneylerinde parametrik olarak elde edilen ECC gerilme-şekil değiştirme eğrisine bağlı fiber mafsalları tanımlanmıştır (Şekil 3.59). Kesit kalınlığı tuğla duvarlı analize uygun olarak 130 mm olarak belirlenmiş, eşdeğer basınç çubuğu malzemesi E modülü ise ECC ile aynı değerde tanımlanmıştır. Tüm bu tanımlamalar sonrasında çerçeveye statik itme analizi uygulanmıştır (Şekil 3.60). Analiz sonucunda dolgu duvarlı, tuğla dolgu duvarlı ve ECC dolgu duvarlı çerçeve kapasite eğrileri karşılaştırılmıştır (Şekil 3.61). %100 ECC malzemesinden inşa edilen dolgu duvarlı bir çerçevenin tuğla dolgu duvarlı bir çerçeveye göre maksimum taban kesme kuvveti değeri açısından 5,1 kat daha fazla bir kapasiteye sahip olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 3. 569. ECC birim eleman gerilme-şekil değıştirme eğrisi ve kesit genişliği.

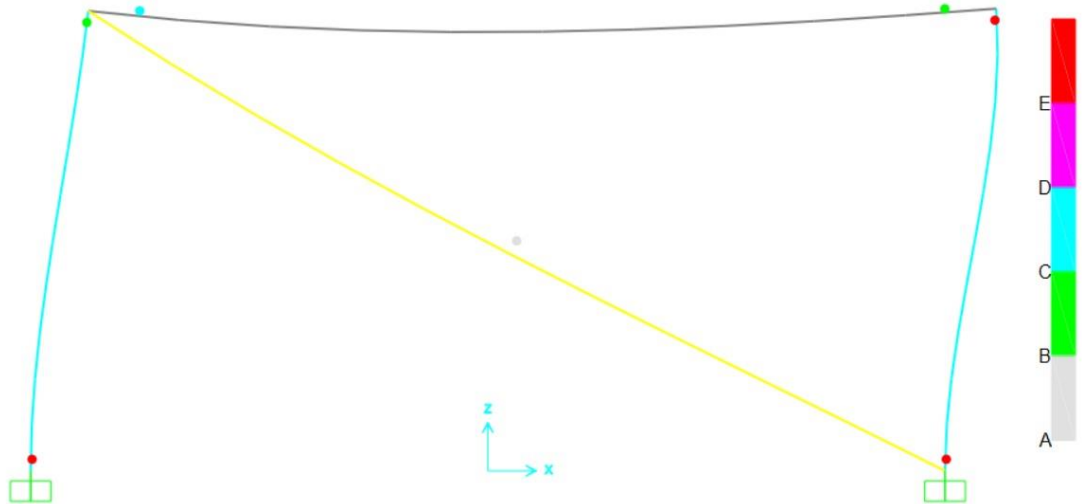


Şekil 3. 57. ECC birim elemandan oluşan çerçeve statik itme analizi.



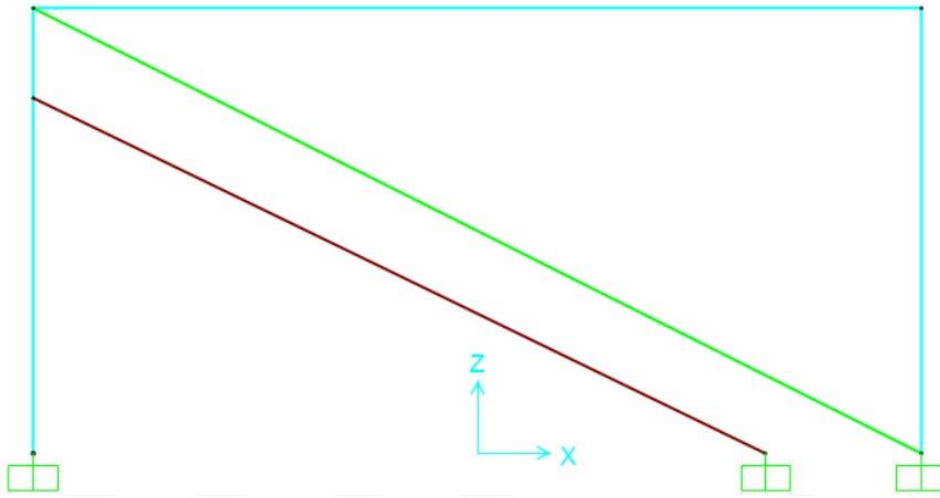
Şekil 3. 581. Dolgu duvarsız çerçeve, tuğla duvarlı çerçeve ve ECC çerçeve kapasite karşılaştırması.

Bu analiz, dolgu duvarlı çerçevelerin inşasında %100 ECC'den üretilmiş bir birim elemanın çerçeve kapasitesine çok büyük bir etki oluşturduğu sonucunu göstermiştir. Tez kapsamında sadece kapasite açısından bir kıyaslama yapılmış, maliyet analizi kapsamında bir değerlendirme yapılmamıştır. Ancak ECC birim eleman üretiminin tuğla malzemesine göre daha maliyetli olabileceği öngörülmüştür. Bununla birlikte (Şekil 3.62) ECC malzemesinden üretilen dolgu duvarlı çerçevede duvar orta noktası fiber mafsalda duvar kapasitesinin çok altında bir seviyede hasarın oluştuğunu göstermiştir.



Şekil 3. 592. ECC dolgu duvarlı çerçeve plastik mafsal dağılımı.

Bu analizden sonra mevcut tuğla dolgu duvar üzerine sırasıyla 20 mm, 40 mm, 80 mm ve 100 mm kalınlıklı ECC kaplaması uygulanması durumunda çerçeve kapasitesindeki değişim irdelenmiştir. Bu analizlerde çerçeve içerisine biri tuğla duvarı temsil eden, diğeri ECC kaplamayı temsil eden iki eş değer basınç çubuğu tanımlanmıştır. Bu yaklaşımın uygulanmasında literatürdeki makaleler esas alınmıştır (Baran ve ark., 2010; Durğut ve ark., 2020). Durğut ve ark.,'nın 2020 yılında dolgu duvar modelleme tekniklerini esas alan makalede çoklu eş değer basınç çubuğu için önerilen model dolgu duvarlı çerçevenin ECC ile güçlendirilmesi modelinde esas alınmıştır (Şekil 3.63).



Şekil 3. 603. ECC kaplamalı tuğla duvar çerçeve analitik modeli.

Bu modelde düğüm noktasından -z yönünde tanımlanan ikinci eş değer basınç çubuğu mesafesinde Durğut ve ark.'nın makalelerinde verdikleri formülasyon esas alınmıştır. Modelde tuğla duvarı temsil eden eş değer basınç çubuğu orta noktasına eksenel yük mafsali tanımlanmış, ECC kaplamayı temsil eden eş değer basınç çubuğu orta noktasına ise tez kapsamında parametrik olarak ortaya konan ECC mekanik davranışı esas alan fiber mafsali tanımlanmıştır. ECC kaplamasının her bir kalınlığı için eş değer basınç çubuğu parametreleri tabloda (Tablo 3.15-18)'da verilmiştir.

Tablo 3. 16. 20 mm kalınlıklı ECC eş değer basınç çubuğu parametreleri.

E_d (MPa)	t_d (m)	$\sin 2\theta$	E_c (MPa)	I_k (m ⁴)	h_d (m)	r_d (m)	λ_d	h_k (m)	a_d (m)
16130	0,02	0,86	31000	0,002	2,4	6,09	0,82	3	0,74

Tablo 3. 17. 40 mm kalınlıklı ECC eş değer basınç çubuğu parametreleri.

E_d (MPa)	t_d (m)	$\sin 2\theta$	E_c (MPa)	I_k (m ⁴)	h_d (m)	r_d (m)	λ_d	h_k (m)	a_d (m)
16130	0,04	0,86	31000	0,002	2,4	6,09	0,98	3	0,69

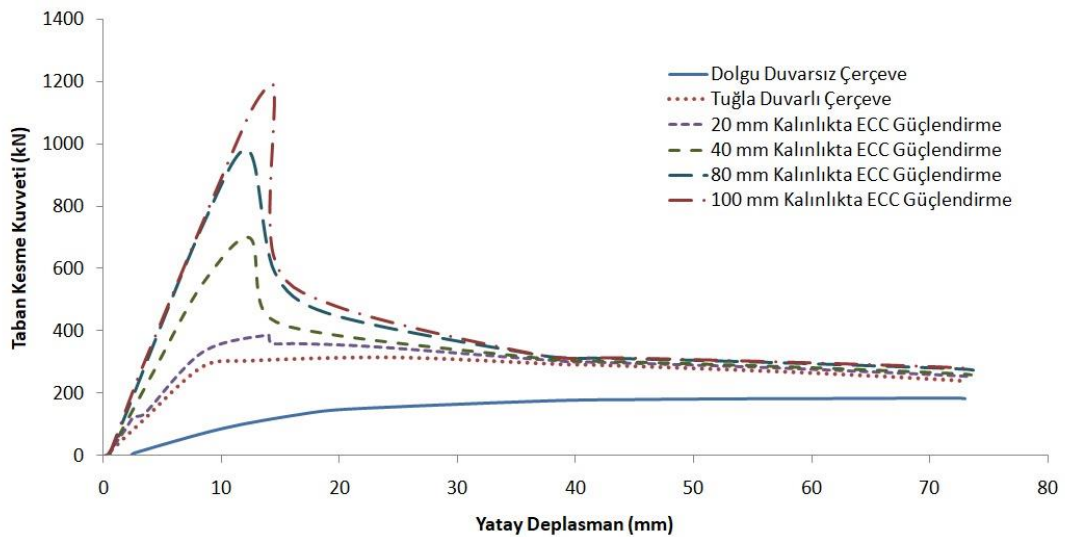
Tablo 3. 18. 80 mm kalınlıklı ECC eş değer basınç çubuğu parametreleri.

E_d (MPa)	t_d (m)	$\sin 2\theta$	E_c (MPa)	I_k (m ⁴)	h_d (m)	r_d (m)	λ_d	h_k (m)	a_d (m)
16130	0,08	0,86	31000	0,002	2,4	6,09	1,16	3	0,65

Tablo 3. 19. 100 mm kalınlıklı ECC eş değer basınç çubuğu parametreleri.

E_d (MPa)	t_d (m)	$\sin 2\theta$	E_c (MPa)	I_k (m ⁴)	h_d (m)	r_d (m)	λ_d	h_k (m)	a_d (m)
16130	0,01	0,86	31000	0,002	2,4	6,09	1,23	3	0,63

Dört farklı kalınlıkta ECC parametrelerinin çerçeve modele tanımlaması yapılmış ve ayrı ayrı statik itme analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizler ile ECC ile dolgu duvarların güçlendirilmesi analitik olarak incelenebilmiştir. Analiz sonucunda dolgu duvarsız, tuğla dolgu duvarlı ve dört farklı kalınlıkta ECC ile güçlendirilmiş çerçeve analiz sonuçları karşılaştırılmıştır (Şekil 3.64).

**Şekil 3. 614.** ECC ile güçlendirmenin çerçeve kapasitesine etkisi.

20 mm kalınlığında ECC ile dolgu duvar güçlendirmesinin maksimum taban kesme kuvveti değerini 313,91 kN'dan 387,12 kN'a çıkardığı ve kapasitede %23,3 bir artış sağladığı hesaplanmıştır. Sırasıyla 40 mm, 80 mm ve 100 mm ECC güçlendirme modellerinde kapasitede 2,2 kat, 3,12 kat ve 3,79 kat artış belirlenmiştir (Şekil 3.64). Bu analiz neticesinde dolgu duvarların güçlendirilmesinde ECC sıva kullanımının kapasitede önemli oranda artışa neden olacağı görülmüştür. Burada kalınlık seçimi hedeflenen dayanım, mimari detaylar ve maliyet parametrelerini esas alan bir optimizasyon problemidir. Yapmış olduğumuz analizlerde 20 mm kalınlığında ECC'nin kapasitede %23,3 artış sağlamasının önemli bir değer olduğu görülmüştür. Analizler tez çalışmasında deneysel ve analitik verilerle ortaya konan sürdürülebilir bir ECC karışımının dolgu duvarların inşasında veya güçlendirilmesinde araştırılmasını esas almıştır. Bu kapsamda tez çalışması deneysel ve parametrik verileri kullanılmıştır. Ancak farklı ECC karışımlarının farklı mekanik davranışları göz önüne alındığında çerçeve kapasitesindeki artışın farklı ECC karışımları için değişkenlik gösterebileceğı belirlenmiştir. Tez kapsamında karışım optimizasyonu gerçekleştirilen bir ECC tasarımıdan bu malzemenin belirlenen bir karışım için analitik modele esas mekanik parametreleri kiriş deneyleri ile belirlenmiş, bu mekanik parametreler esas alınarak ECC'nin dolgu duvarların inşasında ve güçlendirilmesinde kullanımı örnek çerçeve analizleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde ECC malzemesinin sektörde yapısal dayanım açısından dolgu duvarların güçlendirilmesi için iyi bir alternatif oluşturduğu kıyaslamalı analiz verilerinden görülmüştür.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Tez kapsamında sürdürülebilir ECC tasarımına yönelik gerçekleştirilen malzeme deneyleri, bu deneylerden elde edilen sonuçlardan karışım bileşenlerinin mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi belirlenmiştir. 49 adet farklı karışım denemesi sonucu ECC için basınç dayanımı ve eğilme dayanımı en yüksek veya birim hacim ağırlığı en düşük karışım içerikleri elde edilmiştir. Karışım bileşenlerinin basınç, eğilme ve birim hacim ağırlık üzerine etkisi ayrı ayrı değerlendirilmiştir. C25 geleneksel beton dayanımına en yakın karışım belirlenerek ECC malzemesinin deneysel gerilme-şekil değiştirme eğrisi elde edilmiştir. ECC malzemesinin yapısal elemanlardaki davranışını inceleyebilmek için dört nokta kırış eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerden ve gerilme-şekil değiştirme eğrisinin belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen çalışmalarda ECC'nin geleneksel betona göre farklılıkları irdelenmiştir. Deneysel veriler esas alınarak ECC davranışı analitik model üzerinden incelenmiştir. Deneysel verilerle kalibre edilen analiz modelleri ile ECC'nin mekanik davranışı parametreleri ortaya konmuştur. Teorik model detayları belirlenen ECC malzemesinin betonarme dolgu duvarlı çerçevelerin inşasında veya güçlendirilmesinde kullanımı analitik modeller üzerinde karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Bu kapsamda tezin bulgular ve tartışma bölümü;

- 1- Sürdürülebilir ECC karışım optimizasyonu ve efektif karışım oranları,
- 2- Kütleme koşullarının ve deney numunesi boyutlarının sonuçlara etkisi,
- 3- ECC ile geleneksel betonun mekanik açıdan farklılıkları,
- 4- ECC malzemesinin analitik olarak modellenmesi ve eğilme davranışı,
- 5- Dolgu duvarların inşasında ECC birim kargir eleman kullanımı,
- 6- Dolgu duvarların güçlendirilmesinde ECC etkisi ve kalınlık optimizasyonu,
- 7- Sürdürülebilir yapı inşasında ECC'nin rolü başlıklarından oluşmaktadır.

4.1. Sürdürülebilir ECC Karışım Optimizasyonu ve Efektif Karışım Oranları

Tez çalışmasında ECC malzemesinin dolgu duvarların inşasında veya güçlendirilmesinde kullanımının analitik olarak incelenmesi öncesinde ECC tasarımı ve mekanik özelliklerine yönelik deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda literatürden farklılaşarak atık ve doğal malzemelerden oluşan sürdürülebilir bir ECC tasarımı hedeflenmiştir. Laboratuvarda ECC davranışını anlayabilmek için küçük ölçekli karışım denemeleri yapılmıştır. Bu denemelerde ECC karışım bileşenleri ve oranlarının davranışı oldukça değiştirebileceği görülmüştür. Ön

deneylerde literatürde ECC olarak kullanılan çimento esaslı kompozitin yüksek bir enerji sönümleme kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4. 1. Ön deneylerde ECC tasarımı.

Bu aşamadan sonra bilimsel bir yaklaşımla ECC karışım optimizasyonunun gerçekleştirilmesi gerektiği görülmüştür. Bu kapsamda literatürde kabul görmüş bir optimizasyon yaklaşımı ile 49 farklı karışım oranına sahip ECC deney numuneleri üretilmiştir. Karışımlarda sürdürülebilirlik için atık beton ve atık mermer kullanılmıştır. Bununla birlikte iri pomza ve ince pomza doğal malzeme olarak tercih edilmiştir. Eğilme kapasitesini arttırmak için polipropilen lif kullanılmış, karışımın işlenebilirliği için süper akışkanlaştırıcı karışıma eklenmiştir. Karışımlarda karbon emisyonunu azaltmak ve çevreci bir yapı malzemesi elde edebilmek için çimento oranı optimize edilmiştir. Karışım oranları Tablo 3.7’ de verilmiştir. Deney numunesi olarak 40x40x160 mm, 50x50x50 mm, 150x150 mm, 150x300 mm boyutlarında ilgili standartlara göre farklı geometrilerde üretim yapılmıştır. Bu kapsamda ECC malzemesine özelleşmiş bir deney standartı bulunmadığından beton için kullanılan standartlar burada da esas alınmıştır. Bu kapsamda karışım optimizasyonuna yönelik bulgular ve öneriler çerçevesinde ilk olarak karışımın hazırlanması süreci detaylandırılmıştır. Karışım hazırlanırken farklı yöntemler kullanılmış, işlenebilir homojen bir karışım elde edebilmek için en efektif parametrenin lif oranı olduğu görülmüştür. Su/çimento oranı çok düşük olan serilerde karışım elde edilememiş, lif oranının çok yüksek olduğu serilerde ise karışımın işlenebilirliği oldukça düşmüştür. Bu kapsamda işlenebilirliği arttırmak için süper akışkanlaştırıcı miktarı artırılmış, bu ise malzemenin priz alma süresini uzatmıştır. Dolayısıyla sektörel kullanım açısından ECC’nin sadece mekanik ve fiziksel özelliklerinin değerlendirilmesi yanında karışımın işlenebilirliği, üretimi ve kalıplara yerleştirilmesi hususları da göz önüne alınmalıdır.



Şekil 4. 2. ECC karışımında işlenebilirlik ve kalıba yerleştirme.

Karışımlarda öncelikle malzemeler kuru olarak karıştırılmış ve sonrasında hedeflenen su kademeli bir şekilde karışıma eklenmiştir. Literatürde liflerin ıslak karışıma eklendiği görülmüştür. Uygulamada bu yöntem denenmiş, malzemede topaklanma sorunları meydana gelmiştir. Bunun sebebi olarak karışım toplam hacminin çok büyük olmaması değerlendirilmiştir. Liflerin karışıma eklenmesi öncesi kuru karışımda ayrıştırılarak uygulanması ve karıştırıcı çalıştırılıp kademeli olarak suyun eklenmesiyle istenilen işlenebilirlikte karışım elde edilebilmiştir. Burada süper akışkanlaştırıcı miktarının su ile birlikte uygulaması yapılmış, akışkanlaştırıcı miktarının her karışım oranı için değişkenlik gösterebileceği belirlenmiştir. Ön deneylerde, işlenebilirliği arttırmak için belirlenen miktarın yaklaşık iki katı fazla akışkanlaştırıcı eklenen karışımların iki gün priz almaması gibi sonuçlar oluşmuştur (Şekil 4.3.). Bununla birlikte ECC karışımlarında pürüzsüz bir kalıp kullanılarak mermerimsi bir yüzey elde edilebileceği belirlenmiştir (Şekil 4.4). Tüm bu değerlendirmeler neticesinde 49 farklı seri için karışımlar hazırlanmıştır. Karışımlara havada su kürü uygulanmıştır. Deney numuneleri üzerinde önce eğilme sonra basınç testi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.5). Her deney numunesinin birim hacim ağırlık değeri hesaplanmıştır. Elde edilen verilerden karışım içeriklerinin ve oranlarının mekanik-fiziksel özelliklere etkisi analiz edilmiş, en optimum karışımlar belirlenmiştir.



a)



b)



c)

Şekil 4. 3. Yüksek akışkanlaştırıcı etkisi ve yüksek lif oranlı tasarım.



Şekil 4. 4. İşlenebilir ECC karışımı ve ECC’de mermerimsi yüzey.



Şekil 4. 5. Deney numuneleri eğilme ve basınç testleri.

Deney numunelerine basınç ve eğilme testi, ilgili beton standartları esas alınarak yapılmıştır. Ancak deneylerde ECC'ye yönelik özelleşmiş bir deney yönteminin gereksinimi tespit edilmiştir. Çünkü normal betondan farklı olarak ECC içerisindeki lifler bu malzemyemeyi geleneksel beton mekanik davranışından oldukça farklılaştırmaktadır. Tez kapsamında eğilme davranışını daha iyi tespit edebilmek için kırış deneyleri gerçekleştirilmiştir. 49 seri deney numunesinin sonuçları Tablo 3.9'da verilmiştir. Tabloda basınç, birim hacim ağırlık ve eğilme değerlerinin karışıma göre oldukça farklılaştığı görülmüştür. Örneğin 6 nolu karışımda 1,85 g/cm³ birim hacim ağırlığında, 4,16 MPa eğilme mukavemeti oluşurken, 31 nolu karışımda 1,77 g/cm³ birim hacim ağırlığında, 37,17 MPa basınç dayanımı, 20,07 MPa eğilme dayanımı ortaya çıkmıştır. En hafif karışım 1,27 g/cm³ birim hacim ağırlığında 42 nolu karışımda meydana gelmiştir. En yüksek basınç dayanımı 44,16 MPa dayanım değeriyle 6 nolu karışımda oluşmuştur. En yüksek eğilme dayanımı değerine ise 36 nolu karışımda ulaşılabilmiştir. 36 nolu karışımda belirlenen diğer bir özellik ise bu karışımın eğilme ve basınç değerlerinin birbirine çok yakın olduğunun tespitidir. Karışımlardan 25 MPa geleneksel betona en yakın eğilme ve basınç dayanımına sahip 7 nolu karışımda 1,56 g/cm³ birim hacim ağırlık belirlenmiştir. Bu birim hacim ağırlık normal betona kıyaslandığında %35 oranında daha hafif bir malzemenin elde edilebildiği görülmüştür.

Bu tespit ECC'nin sadece enerji sönümleme kapasitesi açısından değil, hafif bir malzeme olması nedeniyle yapısal sistemlere etkiyecek yanal yüklerin azaltılmasında önemli bir etkiye sahiptir. Sonuçlardan karışım oranlarının değiştirilmesi ile çok farklı malzemeler ortaya çıkabileceği belirlenmiştir. Tez kapsamında kullanılan karışım parametreleri ile mekanik ve fiziksel özellikler analiz edildiğinde basınç dayanımı açısından en efektif bileşenin çimento olduğu, pomza içeriğinin ve mermer atığının basınç dayanımını azalttığı, atık betonun da atık mermer oranında basınç dayanımına negatif bir etkisinin olduğu, lif oranındaki artışın basınç dayanımı ile negatif bir korelasyon oluşturduğu görülmüştür. Aynı zamanda yukarıda da detaylandırıldığı üzere lif oranındaki artış işlenebilirliği olumsuz etkileyebilmektedir. Akışkanlaştırıcının mekanik ve fiziksel özelliklere etkisi irdelendiğinde anlamlı bir korelasyon ortaya çıkmamıştır. Akışkanlaştırıcının hedeflenenden 2 katı fazla kullanılması durumunda priz alma süresinin çok uzadığı belirlenmiştir. Eğilme dayanımı açısından çimentonun ve mermer atığının benzer oranda negatif bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Eğilme dayanımına pozitif etki açısından lif içeriği, beton atığı ve pomzanın pozitif bir etki yarattığı ancak doğal olarak fiber içeriğin daha efektif olduğu belirlenmiştir. Burada korelasyon açısından en büyük değerin lif parametrelerinde oluşmuştur. Birim hacim ağırlık açısından çimentonun birim hacim ağırlığı arttırdığı, pomzanın ise karışımı hafiflettiği, mermer atığının ise küçük oranda negatif korelasyona sahip olduğu ancak bu değerin sıfıra çok yakın olması sebebiyle birim hacim ağırlık üzerinde etkiye sahip olmadığını, beton atığının da atık mermer gibi korelasyonu çok değiştirmediğini, lif içeriğinin de atık beton ve atık mermer gibi karışımda birim hacim ağırlık açısından çok az bir etkisi olduğu belirlenmiştir. Bu kapsamda işlenebilirlik ve basınç dayanımı en yüksek olan seriler 6 ve 21 nolu karışım olarak belirlenmiştir. Bu iki karışımda da birim hacim ağırlık değeri 2 g/cm^3 'ün altındadır (Tablo 4.1). 6 nolu karışım ağırlıkça %46, 21 nolu karışım ise %36,7 doğal ve atık malzemeden oluşmaktadır. 36 nolu karışım basınç ve eğilme dayanımının birbirine yakın olması ile önemlidir.

Tablo 4. 1. Optimum değerde seçilmiş numunelerin basınç, eğilme dayanımları ve birim hacim ağırlıkları

Karışım	f_b , MPa	f_c , MPa	d , g/cm^3
6	4.16	44.16	1.85
21	13.98	44.13	1.90
36	20.94	29.18	1.64

Ayrıca 36 nolu karışımın birim hacim ağırlığı geleneksel betona göre yaklaşık %32 daha düşüktür. Ayrıca bu karışım %58,7 doğal ve atık malzemeden oluşmaktadır. Tüm bu bulgular ve değerlendirmeler neticesinde sürdürülebilir bir ECC tasarımı için önemli olan parametreler belirlenmiş, işlenebilirlik hususu değerlendirilmiş ve bilimsel bir yaklaşımla sürdürülebilir bir ECC tasarımı gerçekleştirilmiştir. Deneysel verilerle ECC malzemesinin basınç, eğilme dayanımı ve birim hacim ağırlık parametreleri açısından geleneksel betona göre farklılıkları tespit edilmiştir.

4.2. Kürleme Koşullarının ve Deney Numunesi Boyutlarının Sonuçlara Etkisi

Şekil faktörleri ve kür koşullarının numunelerin basınç dayanımı üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, 50x50x50 mm ve 150x150x150 mm boyutlarında üretilen numuneler standart laboratuvar koşullarında (24°C sıcaklık ve %50 bağıl nem) ve $24 \pm 2^\circ\text{C}$ sıcaklıktaki su içerisinde kürlenmiştir. Tablo 4.2’de verilen veriler, her iki numune boyutu için de su kürünün hava kürüne kıyasla tutarlı biçimde daha yüksek basınç dayanımı sağladığını ortaya koymaktadır. Örneğin, 50x50x50 mm boyutundaki numunelerde hava kürüne kıyasla basınç dayanımı yaklaşık %11,7 oranında artarak 30,07 MPa’dan 33,60 MPa’a yükselmiştir. Benzer şekilde, 150x150x150 mm boyutundaki numunelerde bu artış yaklaşık %12,8 olup, dayanım 36,50 MPa’dan 41,19 MPa’a ulaşmıştır. Su kürünün, çimentolu malzemelerin hidratasyon sürecini daha etkili bir şekilde destekleyerek mikro yapının gelişimini ve dolayısıyla basınç dayanımını artırdığı bilinmektedir. Bu durum, çimento matrisinin erken kurummasını engelleyen nemli ortamın korunması sayesinde sürekli hidratasyonun sağlanmasından kaynaklanmaktadır. Numune boyutuna göre yapılan değerlendirmede hem hava hem de su küründe daha büyük boyutlu numunelerin daha küçük olanlara göre daha yüksek basınç dayanımı gösterdiği görülmektedir. Hava küründe, numune boyutunun artırılmasıyla basınç dayanımı yaklaşık %21,4 oranında artarken; su küründe bu artış yaklaşık %22,6 olarak kaydedilmiştir. Daha büyük numunelerde gözlenen bu artış, daha düşük yüzey/hacim oranı sayesinde yüzey kusurlarının etkisinin azalması ve iç gerilmelerin daha homojen dağılması gibi faktörlere bağlanabilir. Ayrıca, daha büyük hacimdeki malzeme uygulanan yüklere karşı daha iyi direnç gösterebilir. Ancak literatürde, özellikle beton numunelerinde, büyük numune boyutlarının daha düşük basınç dayanımı gösterdiğine ilişkin bulgular da mevcuttur. Tüm bu veriler birlikte değerlendirildiğinde hem su kürünün hem de büyük numune boyutunun ECC numunelerinde basınç dayanımını olumlu yönde etkilediği anlaşılmaktadır. En yüksek basınç dayanımı 150x150x150 mm

boyutundaki numunelerin su küründe (41,19 MPa) gözlemlenirken; en düşük değer 50x50x50 mm boyutundaki numunelerin hava küründe (30,07 MPa) elde edilmiştir. Bu durum, kür koşulları ile numune boyutunun birlikte optimize edilmesinin, çimentolu malzemelerin mekanik performansını önemli ölçüde artırabileceğini göstermektedir. Sonuç olarak, Tablo 4.2 'nin değerlendirilmesi, su kürünün hava kürüne kıyasla basınç dayanımını anlamlı ölçüde artırdığını ve daha büyük numune boyutlarının daha yüksek basınç dayanımları sağladığını ortaya koymaktadır. Bu bulgular, malzeme bilimi ve çimento hidratasyon süreçlerine ilişkin mevcut teorilerle tutarlıdır. Uygulamada, uygun kür koşullarının sağlanması ve numune geometrisinin dikkate alınması, yapı malzemelerinin performansını artırmak açısından kritik öneme sahiptir. Bu değerlendirme, doğru kürleme tekniklerinin ve numune geometrisinin çimentolu malzemelerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır. Dolayısıyla dolgu duvarlı betonarme çerçevelerde ECC malzemesinden üretilmiş bir kargir birim eleman kullanılması durumunda, ECC'nin karışım oranlarına bağlı mekanik özelliklerindeki değişim yanında üretilecek yapı elemanın boyut etkisi de göz önüne alınmalıdır. Bununla birlikte ECC'den tuğla malzemesi gibi bir birim eleman üretilmek istenirse dayanım açısından kesinlikle su kürünün tercih edilmesi gerektiği, dolgu duvarların güçlendirilmesinde uygulanacak katman için ise en az 14 gün yüzeyin nemlendirilmesi önemlidir.

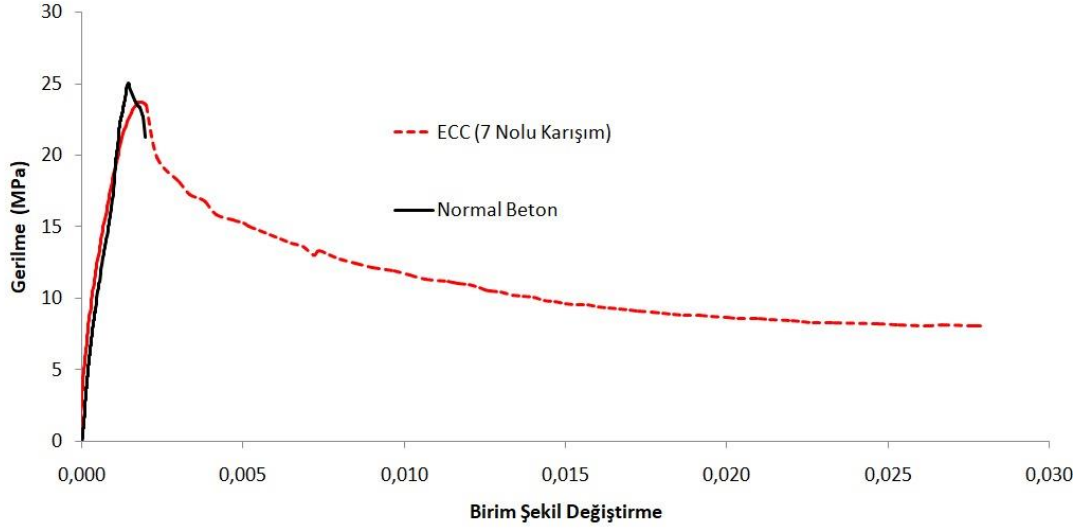
Tablo 4. 2. Numune boyutları ve kürleme koşullarının dayanıma etkisi.

Boyutlar (mm)	Kürleme durumu	Basınç Dayanımı (MPa)
50x50x50	Hava Kürü	30.07
	Su Kürü	33.60
150x150x150	Hava Kürü	36.50
	Su Kürü	41.19

4.3. ECC ile Geleneksel Betonun Mekanik Açısından Farklılıkları

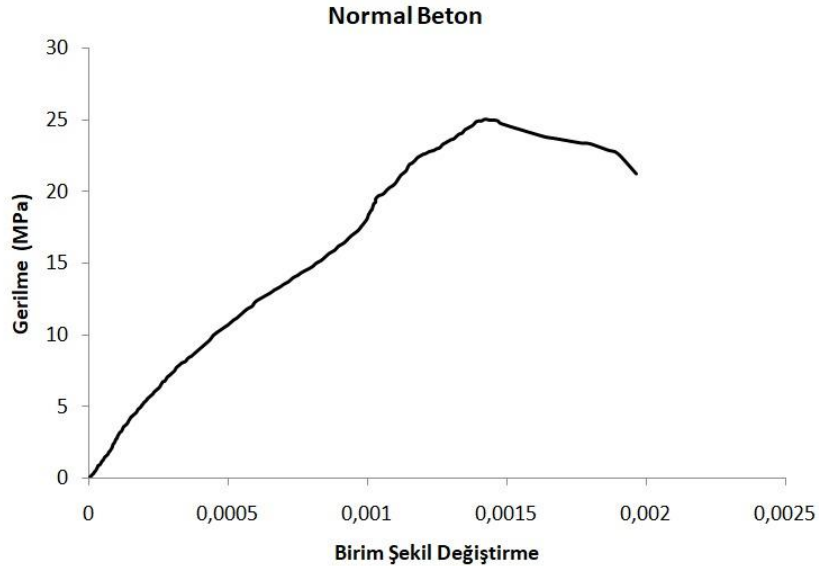
Tez kapsamında ECC ile geleneksel betonun mekanik açıdan farklarını belirleyebilmek için 150x300 mm boyutlarında silindirik numuneler üzerine dijital kompressometre cihazı takılarak silindirlerin gerilme-şekil değiştirme eğrileri belirlenmiştir. Bu eğriler kıyaslamalı olarak Şekil 4.6'da verilmiştir. Ancak bu karşılaştırma tez kapsamında deneysel olarak incelenen 49 farklı karışımdan 7 nolu karışım esas alınarak yapılmıştır. Burada 7 nolu karışımın seçilmesinde karışım mekanik özelliklerinin C25 geleneksel betona en yakın olması durumu etkili olmuştur. 4.1. 'de

detaylandırıldığı üzere her bir ECC karışımı ayrı mekanik ve fiziksel özelliklere sahiptir. Burada her bir karışımın gerilme-şekil değiştirme davranışı açısından da farklılaşabileceği düşünülmüştür. Ayrıca 7 nolu karışımın %57 oranında doğal ve atık malzemeden oluşması bu karışımın esas alınmasında ikincil parametre olarak belirlenmiştir.

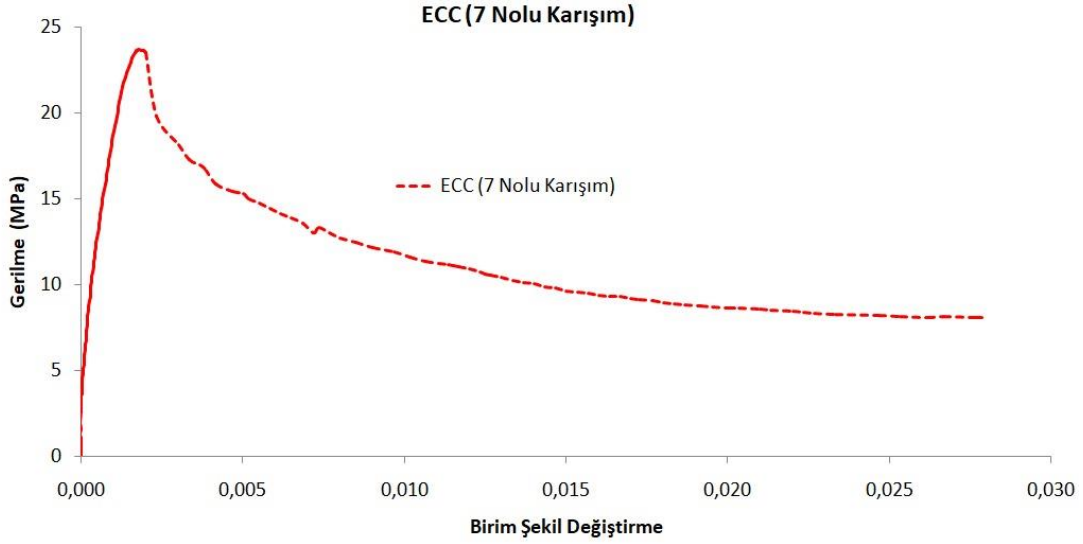


Şekil 4. 6. ECC ve normal betonun gerilme-birim şekil değiştirme grafikleri.

Şekil 4.7’de normal betonun, Şekil 4.8’de ECC betonun ayrı ayrı gerilme-şekil değiştirme grafikleri verilmiştir.



Şekil 4. 7. Normal beton gerilme-şekil değiştirme grafiği.



Şekil 4. 8. ECC beton gerilme- şekil değiştirme grafiği.

Şekil 4.7’de normal beton 0,0015 birim şekil değiştirme değerinde maksimum gerilme değerine ulaşmış, nihai birim şekil değiştirme değeri ise 0,002 seviyesinde meydana gelmiştir. ECC malzemesinde ise maksimum gerilme değerine 0,002 birim şekil değiştirme değerinde ulaşılırken nihai birim şekil değiştirme değeri 0,028 gibi geleneksel betona göre oldukça yüksek bir seviyede oluşmuştur (Şekil 4.8). Dolayısıyla nihai birim şekil değiştirme parametresi açısından ECC geleneksel betona göre 14 kat daha fazla kapasiteye sahiptir. Şekil 4.9’da basınç testi sonrası ECC ve geleneksel betonda çatlak gelişimi kıyaslanmıştır.



Şekil 4. 9. ECC ve geleneksel beton silindir numune çatlak gelişimi.

Geleneksel betonda çatlakların daha küçük olduğu ve daha fazla düşey çatlakların olduğu gözlenirken, ECC silindirde daha geniş çatlakların meydana geldiği ve çatlakların düşeyle belli bir açı yaptığı görülmüştür. ECC silindirde geleneksel betondan üretilen silindire göre çok daha geniş çatlaklar gözlenmesine rağmen numune bütünlüğünün kaybolmadığı belirlenmiştir. Bu durum, ECC'nin enerji sönümleme kapasitesinin oldukça yüksek olduğunu göstermektedir.

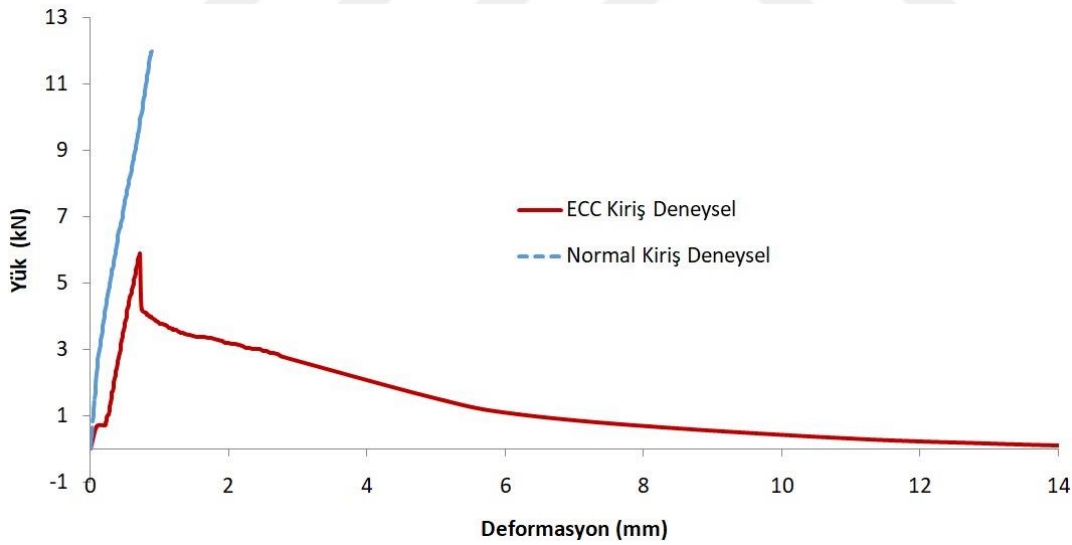
4.4. ECC Malzemesinin Analitik Olarak Modellenmesi ve Eğilme Davranışı

Tez kapsamında ECC malzemesinin yapısal elemanlarda ve sistemlerde kullanımının araştırılması için analitik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Karışım optimizasyonu ve mekanik davranışı belirlenen ECC malzemesinin eğilme altındaki davranışı kiriş deneyleriyle incelenmiştir. 7 nolu karışım esas alınarak hazırlanan 100x180x1200 mm boyutlarında ECC kirişe ve C25 betondan üretilmiş normal bir kirişe dört nokta eğilme deneyi uygulanmıştır (Şekil 4.10). Deneyler ile ECC'nin eğilme altındaki davranışı deneysel olarak gözlemlenmiş, analiz modellerinde kullanılacak parametreler belirlenmiştir. Bu kapsamda kiriş yük-deformasyon eğrileri deneysel ve analitik olarak kıyaslanmış, deney verileri ile analiz modellerinin kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Deneysel verilerle uyumlu malzeme modeli dolgu duvarlı çerçevelerin inşası ve güçlendirilmesinde ECC kullanımını esan alan analitik çalışmalarda kullanılmıştır.



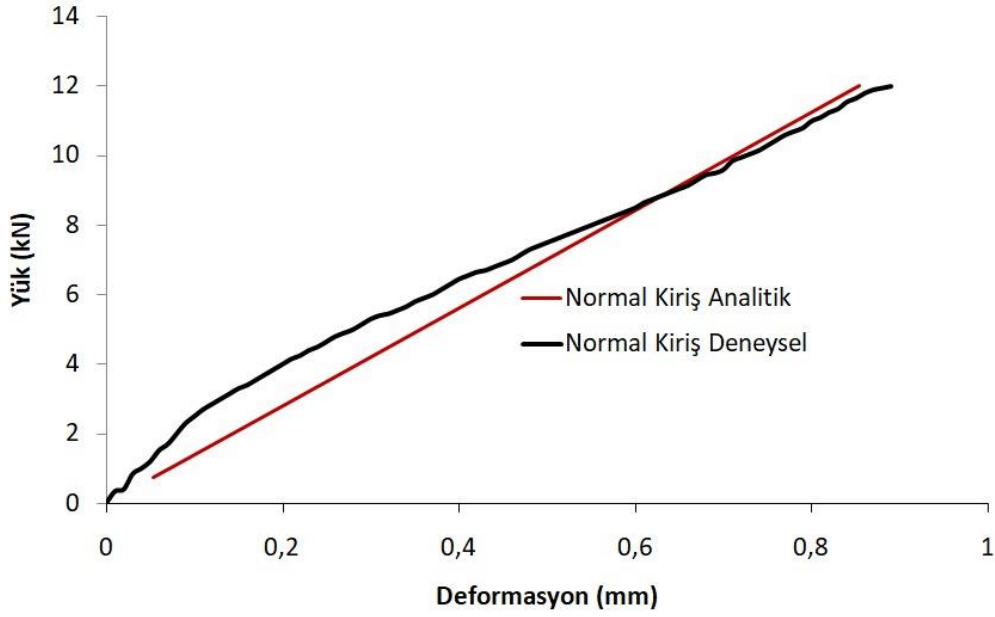
Şekil 4. 10. 100x180x1200 mm ebatlarındaki kirişe uygulanan eğilme deneyi.

Dört nokta eğilme deneyleri sonrasında ilk olarak ECC ve normal kiriş yük-deformasyon eğrileri kıyaslanmıştır. Burada ECC kirişin normal kirişe göre 14 kat daha fazla deformasyon kapasitesine sahip olduğu görülmüştür. Ancak silindir deneylerinde maksimum basınç dayanımları yakın olan kirişlerin eğilme deneyinde ECC kirişin, normal kirişin yaklaşık yarısı değerinde maksimum kapasiteye ulaştığı belirlenmiştir. Bununla birlikte ECC kirişteki ilk çatlağın normal kirişe göre daha küçük bir yük düzeyinde oluştuğu, normal kirişte çatlak gelişiminden kısa bir süre sonra gevrek bir şekilde kırılmanın gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu sonuç ECC malzemesinin yapısal bir elemanda deformasyon kabiliyeti açısından avantajını, ilk çatlak gelişimine bağlı erken dayanım kaybetmesi açısından da dezavantajını göstermiştir. Dolayısıyla ECC malzemesi ile bir yapısal eleman tasarlanırken bu parametreye dikkat edilmesi gerektiği düşünülmüştür. Örneğin burada yük deformasyon eğrisi belirlenen ECC kiriş için mekanik özellikleri daha yüksek bir karışım seçilmesi durumunda normal kirişle aynı yük kapasitesine ulaşılabilceği, ECC'nin yüksek deformasyon kabiliyeti ile performans açısından normal kirişe göre çok daha yüksek bir kapasitenin elde edilebileceği değerlendirilmiştir.



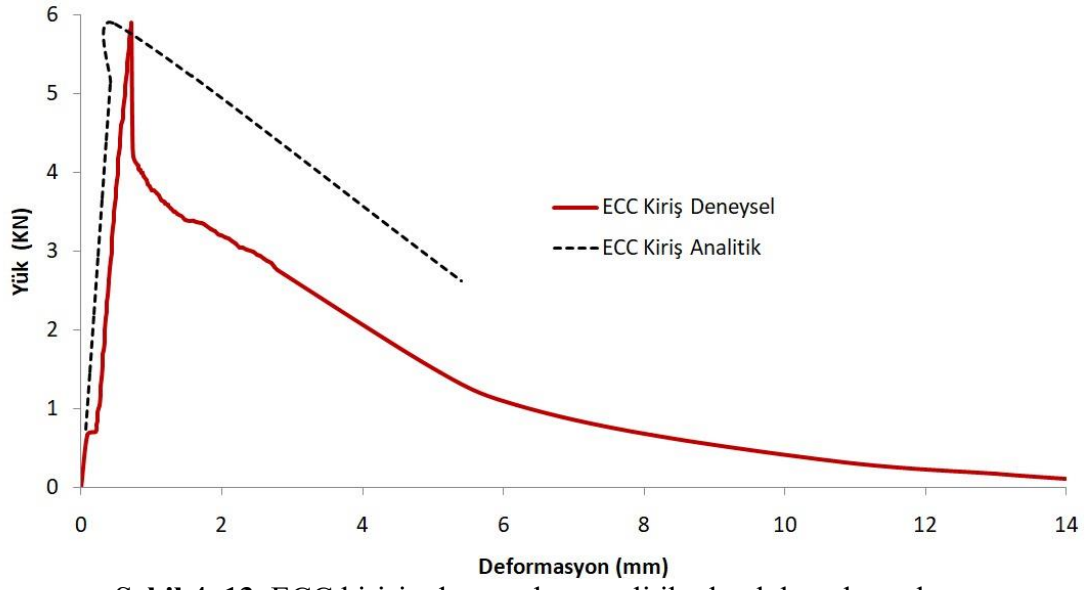
Şekil 4. 11. ECC ve normal kiriş deneysel kıyaslaması.

Tez kapsamında kiriş deneyleri tamamlandıktan sonra bu kirişler SAP2000 yazılımında analitik olarak modellenmiştir. Modellemeye öncelikle normal kiriş ile başlanmış, malzeme, kesit, yükleme koşulları tanımlanarak nonlinear time history analiz fiber mafsallı modeli ile gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda deneysel davranışa uyumlu yük-deformasyon eğrisi elde edilebilmiştir.

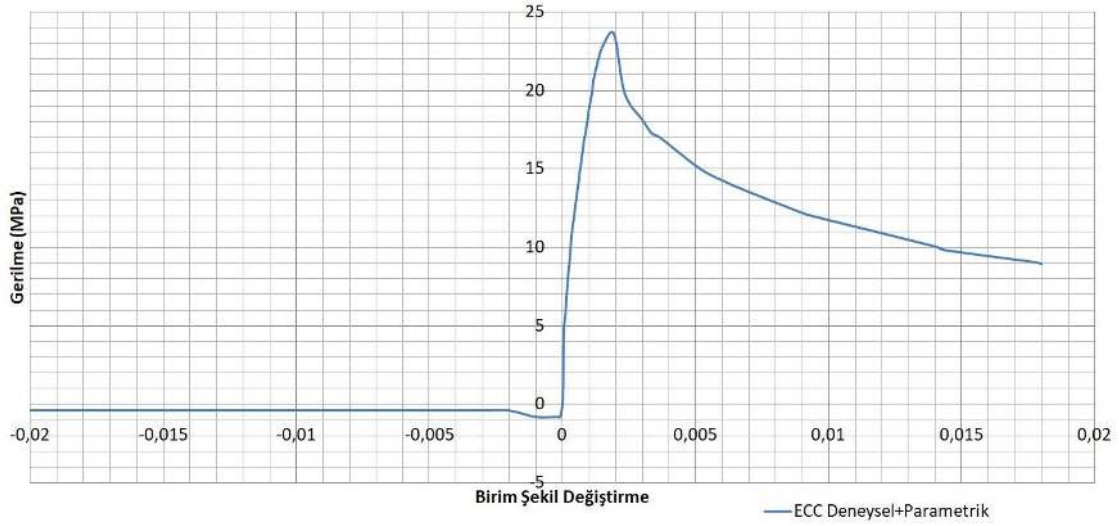


Şekil 4. 12. Normal kirişte analitik ve deneysel kıyaslaması.

Aynı kiriş modelinde malzeme özellikleri değiştirilerek ECC kiriş modellenmiştir. Onlarca farklı analiz sonucunda ECC kiriş davranışı kısmen modellenebilmiştir. ECC'nin modellenmesinde en zor parametre malzemenin çekmede gerilme-şekil değiştirme eğrisinin tanımlanması olmuştur. Burada deneysel gözlemlerle uyumlu olarak ECC için çekmede ilk çatlak dayanımı geleneksel betona göre daha düşük seçilmiştir. Burada lif etkisini tanımlayabilmek için çekmede birim şekil değiştirme parametresi normal betonun 10 katı olarak belirlenmiştir. Deneysel ve analitik ECC kiriş kıyaslamasında maksimum yük kapasitesi elde edilebilmiş ancak analizin yakınsama problemlerinden ve karmaşık malzeme mekaniği davranışından dolayı deneysel olarak ulaşılan maksimum deformasyona erişilememiştir. ECC malzemesinin analitik olarak modellenmesi birçok parametreden oluşan bir optimizasyon problemi olduğu görülmüştür. ECC'nin her bir karışım oranının farklı mekanik özellik sergilediği düşünüldüğünde bu problemin daha karmaşık hale gelebileceği söylenebilecektir. Tez kapsamında üretilen 7 nolu karışımı esas alan ECC malzemesinin deneysel verilerle uyumlu analitik modeli kısmen belirlenebilmiştir (Şekil 4.13). Burada tam olarak modellenemeyen kısım ileri çatlak oluşumundan sonra lif etkisinin modele yansıtılabilmesi olmuştur. Elde edilen parametrik model tez çalışmasındaki diğer analitik modellerde esas alınmıştır.



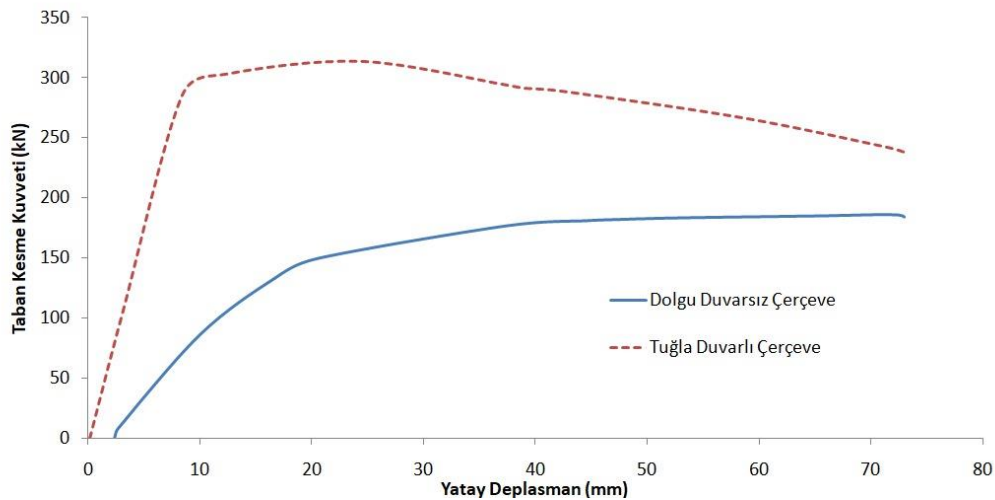
Şekil 4. 13. ECC kirişin deneysel ve analitik olarak karşılaştırılması.



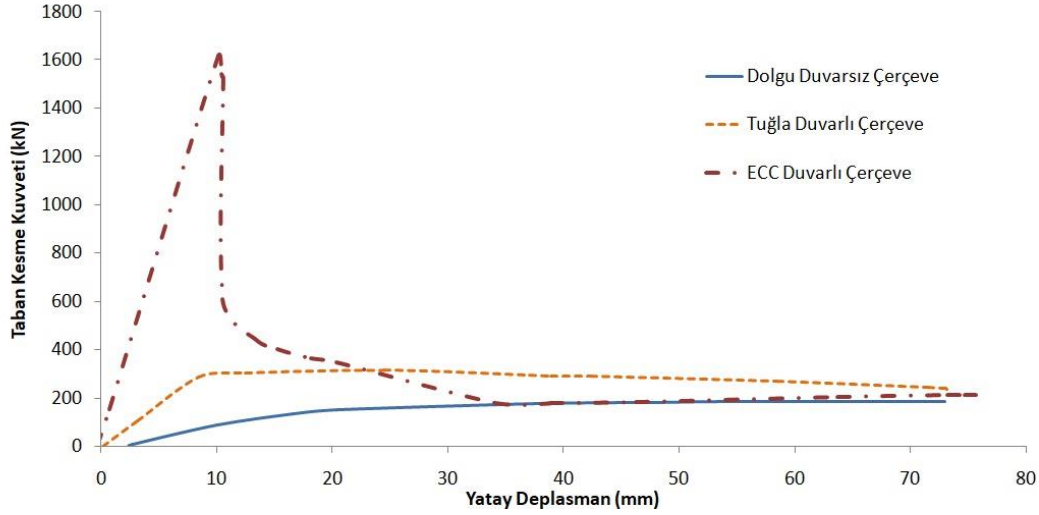
Şekil 4. 14. ECC deneysel ve parametrik malzeme modeli.

4.5. Dolgu Duvarların İnşasında ECC Birim Kargir Eleman Kullanımı

Kiriş deney sonuçları ile kalibre edilen analiz modelleri kullanılarak ECC davranışı parametrik olarak modellenmiştir. Bu model esas alınarak dolgu duvarların inşasında ECC'den üretilen kargir birim elemanların kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu kapsamda dolgu duvarsız betonarme bir çerçeve modellenmiş ve bu çerçeveye statik itme analizi uygulanmıştır. Literatürde kabul gören ve TBDY 2018 'de tanımlanan eşdeğer basınç çubuğu model yaklaşımı ile betonarme çerçeveye tuğla duvar uygulanmış ve statik itme analizi gerçekleştirilmiştir. Dolgu duvarsız ve tuğla dolgu duvarlı kapasite eğrileri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.15). Karşılaştırmada tuğla dolgu duvarlı çerçevenin boş çerçeveye oranla 2 kat daha fazla kapasiteye sahip olduğu görülmüştür. Bu veri farklı literatür araştırmalarında verilen deneysel çalışmalarda da tespit edilmiştir. Tez kapsamında kargir birim elemanları ECC malzemesinden olması durumunda dolgu duvar kapasitesinin değişimi incelenmiştir. Bu kapsamda ECC malzemesinden oluşan birim elemanlı dolgu duvar modellenmiş ve statik itme analizi uygulanmıştır. Analiz sonucunda dolgu duvarsız çerçeve, tuğla duvarlı çerçeve ve ECC birim eleman duvarlı çerçeve kapasite eğrileri karşılaştırılmıştır (Şekil 4.16.). Yapılan karşılaştırmada ECC duvarlı çerçevenin normal çerçeveye göre 5,1 kat fazla kapasiteye sahip olduğu belirlenmiştir. Ancak çalışmada dayanım parametresi açısından bir değerlendirme yapılmıştır. ECC malzemesinin üretim koşullarının tuğla malzemesine göre daha karmaşık olması maliyetleri arttırabilecektir. ECC malzemesinin betonarmeye yakın davranış sergilemesi bu malzemenin yapısal sistemlerde maliyet optimizasyonu da yapılarak efektif olarak kullanılabileceğini göstermiştir.



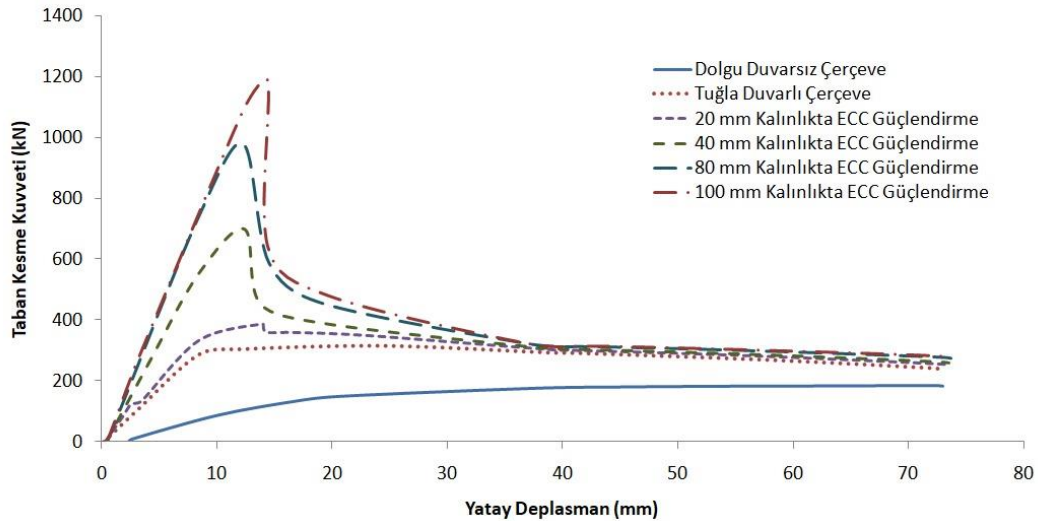
Şekil 4. 15. Dolgu duvarsız ve tuğla dolgu duvarlı çerçeve karşılaştırması.



Şekil 4. 16. Dolgu duvarsız, tuğla duvarlı ve ECC duvarlı çerçeve performansı.

4.6. Dolgu Duvarların Güçlendirilmesinde ECC Etkisi ve Kalınlık Optimizasyonu

Tez kapsamında ECC malzemesinin mevcut betonarme yapıların güçlendirilmesinde dolgu duvarlar üzerine bir katman olarak uygulanabilmesi konusu analitik olarak irdelenmiştir. Analitik yöntem bölümünde detaylandırılan tuğla dolgu duvarlı betonarme çerçeve üzerine literatürde kabul görmüş yöntemler ile 20 mm, 40 mm, 80 mm ve 100 mm kalınlığında tez kapsamında deneysel ve parametrik olarak davranışı belirlenen ECC uygulanmıştır. Her bir kalınlık için ayrı ayrı statik itme analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucunda çerçeve kapasitesindeki artış oranı incelenmiştir.



Şekil 4. 17. Dolgu duvarsız, tuğla dolgu duvarlı ve güçlendirilmiş dolgu duvarlı çerçevelerin taban kesme kuvveti-yatay deplasman eğrileri.

Şekil 4.17’de verilen kıyaslama neticesinde 20 mm kalınlığında ECC ile dolgu duvar güçlendirmesinin maksimum taban kesme kuvveti değerini 313,91 kN’dan 387,12 kN’a çıkardığı ve kapasitede %23,3 bir artış sağlandığı hesaplanmıştır. Sırasıyla 40 mm, 80 mm ve 100 mm ECC güçlendirme modellerinde kapasitede 2,2 kat, 3,12 kat ve 3,79 kat artış belirlenmiştir. Bu kapsamda 20 mm kalınlığında dahi ECC uygulaması çerçeve yatay kapasitesini ciddi oranda arttırmıştır. Dolayısıyla ECC malzemesinin mevcut betonarme yapıların güçlendirilmesinde efektif ve pratik bir çözüm olabileceği görülmüştür. Ancak burada ECC kaplama ile çerçevenin uyumlu çalışması için ilave detaylandırma gerekli olabilecektir. Eğer kapasitede daha fazla bir artış istenirse ECC kalınlığı arttırılarak yatay kapasite çok daha fazla arttırılabilecektir. Bununla birlikte daha yüksek dayanımlı ECC karışımları ile güçlendirmede farklı opsiyonlar da uygulanabilecektir. Tez kapsamında aşamalı olarak gerçekleştirilen deneysel ve analitik bulgular ECC’nin mevcut yapı stokumuzun güçlendirilmesinde efektif bir çözüm yöntemi olabileceği değerlendirilmiştir.

4.7. Sürdürülebilir Yapı İnşasında ECC’nin Rolü

Karbon nötr şehirlerin inşasına geçiş süreci, çevresel etkileri en aza indirirken yapısal performansı artıran sürdürülebilir inşaat malzemelerinin geliştirilmesini ve uygulanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda, bu çalışmada incelenen sürdürülebilir ve hafif, çimento esaslı kompozitler (ECC), geleceğin kentsel yapıları ve altyapıları için kritik bir yenilik olarak öne çıkmaktadır. ECC, mermer ve beton atığı gibi geri dönüştürülmüş malzemeleri bünyesine katarak doğal kaynaklara olan bağımlılığı azaltmakta ve çimento üretimine bağlı karbon salımını önemli ölçüde düşürmektedir. Yüksek dayanıklılığı, geliştirilmiş mekanik özellikleri ve literatürde verilen potansiyel kendi kendini iyileştirme kabiliyeti sayesinde uzun ömürlü bir malzeme olması nedeniyle bakım ve yeniden yapım gereksinimini azaltmakta ve böylece yapısal sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır. TÜRKİYE CUMHURİYETİ CUMHURBAŞKANLIĞI 12. Kalkınma Planı “Yaşanabilir Şehirler, Çevre” bölümünde sürdürülebilirliğin önemi detaylandırılmıştır. Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmanın “Şehirleşme”, “Konut”, “Kentsel Dönüşüm”, “Çevrenin Korunması”, “Afet Yönetimi” başlıklarına katkı sunması hedeflenmiştir. Sürdürülebilir malzemelerden oluşan ECC ‘nin çevreci ve inovatif özelliği ön plana çıkmaktadır. ECC ile yapısal güçlendirmenin BM Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinden 7 (Erişilebilir ve Temiz Enerji), 11 (Sürdürülebilir Şehirler ve Topluluklar), 12 (Sorumlu Üretim Tüketim), 17 (Amaçlar İçin Ortaklıklar) başlıklarına

katkı sunabileceği öngörülmüştür. Avrupa Birliği'nin yakın gelecekte en az 100 karbon nötr şehir oluşturmayı ve mevcut kentsel alanları birçok sektörün katkısıyla karbon nötr hâle dönüştürmeyi hedeflemesi, bu alandaki dönüşümün ivmesini göstermektedir. Ayrıca, çeşitli ülkeler benzer hedefler doğrultusunda çalışmalar yürütmekte olup, karbon nötr şehir sayısının küresel ölçekte artması beklenmektedir. Bu dönüşüm sürecinde ECC, hafifliği ve yüksek dayanım/ağırlık oranı ile geleneksel betona kıyasla önemli bir alternatif sunmaktadır. Bu özellik, yüksek katlı yapılar, köprüler ve yol altyapılarında malzeme tüketiminin azaltılmasına olanak tanıyarak karbon miktarını düşürmektedir. Üstün çatlak dayanımı ve sünekliği sayesinde ECC, deprem riski yüksek bölgelerde uzun ömürlü ve dayanıklı yapıların inşasına olanak sağlamaktadır. Ayrıca, prefabrikasyon tekniklerine uyumlu olması, malzeme kullanımını optimize etmekte, atık oluşumunu azaltmakta ve inşaat süreçlerinde enerji tüketimini düşürmektedir. ECC'nin mekanik ve dayanıklılık yönünden sağladığı avantajlar nedeniyle, gelecekte hem yeni yapıların tasarımında hem de mevcut yapıların güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılacağı öngörülmektedir. Bu çalışmada, ECC'nin kullanımına yönelik sektörel ve akademik çalışmalara katkı sunulabilmesi amaçlanmıştır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez kapsamında ECC malzemesinin dolgu duvarların inşasında veya güçlendirilmesinde kullanımı analitik olarak incelenmiştir. Analitik çalışmalar öncesinde sürdürülebilir bir ECC karışım tasarımı için yapı malzemesi deneyleri gerçekleştirilmiş ve kiriş deneyleriyle ECC malzemesinin eğilme davranışı belirlenmiştir. Mekanik ve fiziksel özellikleri deneysel çalışmalar ile belirlenen malzeme teorik olarak ele alınmış, deney verileri kullanılarak malzeme mekaniği modellenmesi yapılmıştır. Deneysel verilerle davranış modeli doğrulanan ECC malzemesinden tuğla gibi kargir birim eleman üretilmesi veya bu malzemenin plaka şeklinde güçlendirme elemanı olarak kullanılması durumları betonarme model bir çerçeve üzerinde statik itme analizi ile incelenmiştir. Bu bölümünde sürdürülebilir ECC karışım optimizasyonundan bu malzemenin dolgu duvarlarda kullanımına kadar elde edilen çalışma sonuçları ve öneriler verilmiştir.

5.1. Sürdürülebilir ECC Karışımı

Tez kapsamında çimento esaslı kompozit (ECC) tasarımına yönelik çok detaylı bir literatür araştırması yapılmıştır. Literatürde çok farklı malzemelerle çimento esaslı kompozit üretilebileceği görülmüştür. Birçok çalışmada ECC malzemesinin geleneksel betona oranla avantajları vurgulanırken bu malzemenin inşaat sektöründe yaygınlaşmadığı tespit edilmiştir. Bunun sebebi olarak çimento esaslı kompozitlerde kullanılan bileşenlerin erişim zorluğu, seri üretim proseslerinin özel ekipmanlar gerektirmesi ve buna bağlı olarak maliyet artışlarının etkili olduğu görülmüştür. Bu aşamada tez çalışması ile daha az maliyetli ve erişilebilir malzemelerle ECC tasarımı araştırılmıştır. Günümüzde sürdürülebilirlik her alanda önemli bir başlık olarak yer almaktadır. İnşaat sektöründe de sürdürülebilirliğin önemli olduğu görülmüştür. Atık malzemelerin geri dönüşümü ve doğal malzemelerin efektif kullanımının, üretilen malzemelerin ekonomik ömrünü tamamladığında çevreye minimum yük getirmesi hususları ele alındığında sürdürülebilir bir ECC karışımı tasarlanabileceği görülmüştür. Bu kapsamda ülkemizin sıfır atık vizyonu çerçevesinde inşaat sektöründe yer alan beton atıklarının ve mermer atıklarının bu kapsamda değerlendirilebileceği düşünülmüştür. Bu çerçevede atık beton, atık mermer, minimum çimento, polipropilen lif, pomza gibi malzemelerin karışım optimizasyonu ile hem mekanik açıdan avantajlara sahip hem de çevreci bir tasarımın yapılabileceği görülmüştür. Ayrıca sürdürülebilir ECC karışımının ekonomik olarak tasarımı ile inşaat sektöründe daha yaygın kullanımına katkı sunulabilmesi amaçlanmıştır. Sürdürülebilir ECC tasarımı için ön deneyler

gerçekleştirilmiş, karışım oranlarının malzeme davranışını ve işlenebilirliği çok etkilediği görülmüştür. Literatürde kabul gören optimizasyon yaklaşımları ile bilgisayar ortamında karışım bileşenlerinin optimum aralığı belirlenerek 49 farklı deneyin tasarımı oluşturulmuş, bu serilere mekanik deneyler uygulanmış ve karışımların basınç, eğilme dayanımları ve birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Bu deneylerden elde edilen en önemli sonuç ECC malzemesinin mekanik davranışının anlaşılabilmesi için betondan farklı bu malzemeyi esas alan özelleşmiş deney yöntemlerinin belirlenmesi gerektiği olmuştur. Çünkü lif etkisi malzeme mekaniklerini betondan farklılaştırmaktadır. Burada elde edilen diğer sonuç karışım oranları değiştirilerek çok farklı türde sürdürülebilir ECC elde edilebilmesi olmuştur. Bu çerçevede literatürde sık rastlanılamayan bir karışım içeriğine de ulaşılmıştır. Deneysel çalışmalarda 36 numaralı karışımın çok düşük birim hacim ağırlıkta, basınç ve eğilme dayanımlarının birbinine çok yakın olması ECC malzemesinin çok efektif bir yapı malzemesi olabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte karışımlarda %50'nin üzerinde atık ve doğal malzeme kullanımı karışımların %30'a varan oranlarda geleneksel betondan hafif olması ve yüksek deformasyon kapasitelerine sahip olmaları bu malzemenin günümüz inşaat sektöründe önemli bir yere sahip olabileceğini göstermiştir. Yüksek oranda atık malzemenin geri dönüşümüyle elde edilen bu yenilikçi yapı malzemesi türü fayda/maliyet açısından uzun vadeli bir ekonomik kazanç sağlayacaktır. Sürdürülebilir ECC tasarımına yönelik farklı özellikte birçok karışım elde edilmiş, bu karışımlardan basınç dayanımı en yüksek olan 6 ve 21 nolu karışımların yapısal eleman tasarımda, 7 nolu karışımın ise dolgu duvar güçlendirmesinde veya yeni dolgu duvar inşasında kullanılabileceği değerlendirilmiştir. Ancak bir saha uygulamasında ECC malzemesi kullanımı öncesinde bu malzemeden beklenen mekanik ve fiziksel özelliklerin belirlenmesi hedeflenen bu özelliklere uygun ECC'nin üretimi gerekli olabilecektir. Bununla birlikte ECC malzemesinde işlenebilirlik önemli bir parametredir. Mekanik özellikler yanında küçük denemelerle karışımın işlenebilirliği gözlenmelidir. Çünkü büyük hacimde karışımlarda yüksek lif veya düşük su oranına bağlı homojen bir karışım elde edilememesi riski ortaya çıkabilmektedir. Ayrıca çalışmada sürdürülebilir ECC ile mermerimsi yüzey parlaklığına sahip bir tasarım da elde edilebileceği görülmüştür. Bu durum inşaat sektöründe farklı mimari kullanım amaçları için etkili olabilecektir.

Tez kapsamında sürdürülebilir bir ECC tasarımına yönelik oldukça geniş bir aralıkta karışım oranları ve bu karışım oranları sonucunda elde edilen mekanik ve fiziksel özellikler tablolastırılmıştır. Sürdürülebilir ECC tasarımı ile ülkemizin sıfır atık

vizyonuna katkı sunulabilmesi, inşaat sektöründe yenilikçi bir yapı malzemesinin sahada yaygınlaşması ve fayda/maliyet oranı yüksek sürdürülebilir çevreci tasarımların inşa edilebilmesi çalışmalarına katkı sağlanması amaçlanmıştır.

5.2. Sürdürülebilir ECC Mekanik, Fiziksel Özellikleri ve Teorik Modeli

Tez kapsamında dolgu duvarların güçlendirilmesi amacıyla kullanılabileceği düşünülen 7 nolu sürdürülebilir ECC karışımı için 150x300 mm silindir 100x180x1200 mm kiriş üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde karşılaştırma için geleneksel C25 betonu seçilmiştir. Silindir numuneleri üzerinden malzemenin gerilme-şekil değiştirme eğrisi belirlenmiştir. Kiriş deneyleri üzerinden ise malzemenin eğilme davranışı altındaki yük-deformasyon değişimi incelenmiştir. Sürdürülebilir ECC malzemesinin gerilme-şekil değiştirme eğrisi incelendiğinde normal betona kıyasla 14 kat daha fazla deformasyon yeteneğine sahip olduğu deneylerde ve deney sonucu verilerde tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalarda malzemede ilk çatlak oluşuktan sonra yükte bir azalma meydana geldiği ancak uzun süre deformasyonun devam ettiği, malzemede gözle görülür seviyede boy kısalmasının olduğu, buna rağmen malzemede bütünlüğün bozulmadığı ve yük almaya devam ettiği belirlenmiştir. Bu davranış normal betona kıyasla çok farklı bir mekanik özelliği ortaya koymuştur. Dolayısıyla yapısal bir eleman tasarımında yüksek süneklik kapasitesine sahip bir ECC ile minimum donatılandırma yapılarak yüksek moment kapasitelerine ulaşılabileceği belirlenmiştir. Bu kapsamda ECC malzemesinin geleneksel betondan farklı olarak donatılı bir kesitteki davranışı ve bunun teorik formülasyonu detaylandırılmalıdır. Tez kapsamında 7 nolu karışım için gerçekleştirilen kiriş deneylerinde ECC'nin eğilme altındaki davranışı deneysel olarak gözlenmiştir. Deneylerde ECC malzemesinden üretilmiş kirişte ilk eğilme çatlaklarının normal kirişe kıyasla %50 daha düşük yük seviyelerinde olduğu bu aşamadan sonra kirişte yük azalımı meydana geldiği ancak deformasyonların uzun süre devam ettiği görülmüştür. Geleneksel donatısız beton kirişte ise ilk eğilme çatlakları meydana geldikten çok kısa bir süre sonra gevrek bir şekilde kırılma meydana gelmiştir. Bu durum ECC'den üretilmiş bir yapı elemanının yatay yükler etkisinde uzun süre enerji yutma kapasitesi sağlayabileceğini ancak burada da hedeflenen mekanik özelliğe uygun ECC tasarımının gerekli olduğu belirlenmiştir. Çalışmada kiriş eğilme deneyleri esas alınarak ECC davranışının analitik modele yansıtılabilmesi çalışmaları yapılmıştır. Normal betondan üretilen kiriş ve ECC betondan üretilen kirişler SAP2000 yazılımında (Computers and Structures Inc., 2025) modellenmiş, yapısal modellerde deney

yüklemesine uygun olarak nonlinear time history analizi yapılmıştır. Fiber mafsallı yaklaşımının kullanıldığı bu analizlerde deneysel verilerle uyumlu grafikler elde edilmiş, ECC davranışı kısmen analitik olarak modellenenmiştir. Modellemede ECC davranışının belirlenmesinde en önemli parametrelerin malzemenin çekme gerilme-şekil değiştirme eğrisi olduğu görülmüştür. Basınç altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrisi deneysel verilerden elde edilmiş, çekme altındaki gerilme-şekil değiştirme eğrisi ise yük-deformasyon eğrileri kullanılarak kalibre edilmiştir. Sonuç olarak kiriş deneyleri analitik olarak modellenenmiş, dolgu duvar güçlendirmesine esas modele ulaşılabilmiştir. Modellemede elde edilen diğer bir sonuç ise ECC malzemesinin çekme altındaki ilk çatlama dayanımının betona oranla çok düşük seviyede olmasıdır. Ancak burada da ECC'nin nihai şekil değiştirme kapasitesi betondan en az 10 kat daha fazla dikkate alınarak modellenmelidir. Tez kapsamında ECC'nin pratik olarak modellenenmesine yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Burada ilk çatlak sonrası lif etkisini esas alan daha ileri modelleme yaklaşımları kullanılarak malzemenin daha detaylı mekanik teorik modeli ortaya konabilmektedir. Ancak burada her ECC karışımının farklı bir mekanik özellik sergileyebileceği hususu unutulmamalıdır. Yapısal sistemde yapı elemanından beklenen mekanik davranış esas alınarak uygun ECC karışımı tasarlanmalıdır. Bu karışıma yönelik deneysel çalışmalar ile malzemenin teorik davranışı modellenmelidir.

5.3. Sürdürülebilir ECC'nin Dolgu Duvarların İnşası veya Güçlendirilmesinde Kullanımı

Tez çalışmasında sürdürülebilir ECC karışım tasarımı ve bu tasarımın deneysel ve analitik mekanik davranışı tespit edildikten sonra bu malzemenin dolgu duvarların inşası ve güçlendirilmesinde kullanımı araştırılmıştır. Bu kapsamda betonarme bir çerçeve modellenmiş, bu çerçeveye statik itme analizi uygulanmıştır. Literatürde kabul gören yaklaşımlarla çerçeveye tuğla dolgu duvar modellenmiş ve dolgu duvarsız çerçeve ile kapasite kıyaslanmıştır. Bu aşamada çerçeve içerisinde tuğla dolgu duvar yerine ECC'den üretilmiş bir yapısal eleman bulunması durumu modellenmiş çerçeve kapasitesinde 5,1 kat artış görülmüştür. Bu kapsamda ECC'den üretilmiş birim kargir elemanların yüksek dayanım hedeflenen betonarme çerçeveler içerisinde efektif bir çözüm olacağı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda uygulamada fayda/maliyet analizi yapılması gerekmektedir. Analitik çalışmanın diğer aşamasında ECC malzemesinin dolgu duvarlarda güçlendirmede kullanımı araştırılmıştır. Analitik modele literatürden belirlenen yöntemlerle 20 mm, 40 mm, 80 mm ve 100 mm kalınlığında ECC kaplamalar

modellenmiş, 20 mm kalınlığında güçlendirme ile %23,3 kapasitede artış belirlenmiştir. Bu sonuç sürdürülebilir ECC malzemesinin mevcut betonarme yapıların güçlendirilmesinde dayanım açısından efektif bir çözüm sunacağını göstermiştir. Sürdürülebilir bir ECC karışım tasarımı optimizasyon yaklaşımı ile gerçekleştirilmiş, bu karışımın deneysel ve teorik mekanik davranışı modellenmiş ve malzemenin dolgu duvarların inşasında ve güçlendirilmesinde etkili bir çözüm olabileceği analitik çalışmalar ile gösterilmiştir. Tez çalışması ile sürdürülebilir ECC malzemesinin günümüz inşaat sektöründe daha efektif kullanımına yönelik çalışmalara, ülkemizdeki sıfır atık ve sürdürülebilir üretim vizyonuna ve bu alanda gerçekleştirilen akademik araştırmalara katkı sunulabilmesi amaçlanmıştır.





KAYNAKLAR

- Abdalah, A. N. A. (2018). *Polipropilen Elyaf Takviyeli Betonarme Kirişlerin Süneklik Davranışlarının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Gaziantep, 78s.
- Ahmed, T. W., Ali, A. A. M., & Zidan, R. S. (2020). Properties Of High Strength Polypropylene Fiber Concrete Containing Recycled Aggregate. *Construction and Building Materials*, 241, 118010. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118010>
- Akça, K. R., Çakır, Ö., & İpek, M. (2015). Properties Of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete Using Recycled Aggregates. *Construction and Building Materials*, 98, 620-630. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.133>
- Akkuzu, A. V. (2007). *Betonarme Çerçevesiz Dolgu Duvarların Deprem Etkisi Altındaki Dinamik Davranışının İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 149s.
- Akoğuz, H. (2023). Mikrobiyal Aracılı Kalsit Çökmesi (MICP) Tekniğinde Çimentolama Solüsyonu Enjeksiyonuna Sodyum Aljinat Yoğunluğunun Etkisinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11(3), 1241-1249. <https://doi.org/10.29130/dubited.1143123>
- Avcıalp, A. (2024). *Ultra Yüksek Performanslı Betonda Sentetik Lif Kullanımının Mekanik Özelliklere Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 74s.
- Altalabani, D., Bzeni, D. K. H., & Linsel, S. (2020). Mechanical Properties And Load Deflection Relationship Of Polypropylene Fiber Reinforced Self-Compacting Lightweight Concrete. *Construction and Building Materials*, 252, 119084. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119084>
- Anadut, H. O., & Köksal, F. (2023). Çelik Tellerin Yapısal Hafif Betonların Eksenel Basınç Altındaki Davranışına Etkisi. *Beton 2023 Kongresi Bildirileri*, 300-309.
- Arslantürk, Y. E. (2021). *Atık Metal Liflerin Betonda Kullanımı*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya, 88s.
- Bal, E. (2018). *Bir Cephesi Kapalı Yapılarda Dolgu Duvar Çerçeve Etkileşiminin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 120s.

- Balaguru, P. N., & Shah, S. P. (1992), Fiber Reinforced Cement Composites, *McGraw-Hill International Editions*.
- Banthia, N., & Gupta, R. (2004). Hybrid Fiber Reinforced Concrete (HyFRC): Fiber Synergy İn High Strength Matrices, *Materials and Structures*, 37(274), 707–716. doi: [10.1617/14095](https://doi.org/10.1617/14095)
- Baran, M., Canbay, E., & Tankut, T. (2010). Beton Panellerle Güçlendirme-Kuramsal Yaklaşım. *Teknik Dergi*, 21(101), 4959-4978.
- Başlı, D., & Çağatay, İ. H. (2011). 2007 Deprem Yönetmeliği'ne Göre Yapı Düzensizliklerinin Betonarme Binaların Deprem Davranışlarına Olan Etkilerinin İncelenmesi. *Ç.Ü Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*. 26(2), 163–172.
- Bayrak, O. F., Bikçe, M., Erdem, M., Emsen, E. (2020). Dolgu Duvarların Düzlem İçi ve Düzlem Dışı Davranışına Esnek Derzli Bağlantı Elemanının Etkisi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 3(1), 24-28.
- Bayrak, O. F., Yedek, S., Erdem, M. M., & Bikce, M. (2018). Investigating the effect of infill walls on steel frame structures. *Challenge Journal of Structural Mechanics*, 4(1), 27. <https://doi.org/10.20528/cjsmec.2018.01.005>
- Bayülke, N. (2003). Betonarme Yapının Dolgu Duvarı. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 4(426), 85-98.
- Bentur, A., & Mindess, S. (2006). *Fibre reinforced cementitious composites*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781482267747>
- Beycioğlu, A., Başıyigit, C., & Kılınçarslan, Ş. (2010). Pomza Agregalı Hafif Beton Özelliklerine Silis Dumanının Etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 14, 200-205.
- Bikçe, M., & Bayrak, O. F. (2019). Dolgu Duvarın Yapısal Düzensizliklere ve Performansa Etkisinin Mevcut Bir Yapı Üzerinde İncelenmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 241-254. <https://doi.org/10.17482/uumfd.477760>
- Bilir, T., Karadağ, Ö., & Aygün, B. F. (2022). Waste marble powder. İçinde *Sustainable Concrete Made with Ashes and Dust from Different Sources* (ss. 479-506). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824050-2.00015-2>
- Brito, J., & Saikia, N. (2013). Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste. *Springer London*. Vol.54. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4540-0>

- Bui, L., Nguyen, T., Tran, H., & Pham, Q. (2025). Factors affecting the selection of sustainable construction materials. *Buildings*, 15(5), 834. <https://doi.org/10.3390/buildings15050834>
- Caglar, N., & Mutlu, M. (2009). Failure analysis of reinforced concrete frames with short column effect. *Computers & concrete*, 6(5), 403-419. <https://doi.org/10.12989/cac.2009.6.5.403>
- Chung, D. D. L. (2017). Cement-Matrix Composites. *Carbon Composites* (ss. 333-386). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804459-9.00006-3>
- Computers and Structures Inc. (2025). *SAP2000* v.26.2. <https://www.csiamerica.com/products/sap2000>.
- Corinaldesi, V. (2010). Mechanical And Elastic Behaviour Of Concretes Made Of Recycled-Concrete Coarse Aggregates. *Construction and Building Materials*, 24(9), 1616-1620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.031>
- Coza, H. (2023). Dolgu Duvarlı Çerçevelerde Sıvanın Deprem Davranışına Katkısı. *Mimarlık ve Yaşam Dergisi*, 8(2), 327–356. <https://doi.org/10.26835/my.1200840>
- Çakır, Ö., & Dilbas, H. (2021). Durability properties of treated recycled aggregate concrete: Effect of optimized ball mill method. *Construction and Building Materials*, 268, 121776. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121776>
- Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2024). *Kamu ihale sözleşmelerinde düşük karbon emisyonuna sahip yeşil çimento kullanımının yaygınlaştırılmasına ilişkin Tebliğ. (2004, Mart 16)*. Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. <https://webdosya.csb.gov.tr/db/yfk/icerikler/yes-l-c-mento-kullaniminin-yayginlastirilmasina-il-sk-n-tebl-g-1-x-20240709140306.pdf>
- Das, C. S., Dey, T., Dandapat, R., Mukharjee, B. B., & Kumar, J. (2018). Performance evaluation of polypropylene fibre reinforced recycled aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 189, 649-659. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.036>
- Daşkiran, M. M. (2018). *Çimento Esaslı Kompozitlerden Üretilen Yapı Elemanlarının Mekanik Davranışlarının DeneySEL Olarak İncelenmesi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 328s.
- De Schepper, M., De Buysser, K., Van Driessche, I., & De Belie, N. (2013). The regeneration of cement out of Completely Recyclable Concrete: Clinker production evaluation. *Construction and Building Materials*, 38, 1001-1009. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.061>

- Demir, T., Demirel, B., & Demirbilek, A. (2022). Farklı Su Bağlayıcı ve Kimyasal Katkı Oranlarına Sahip Yüksek Dayanımlı Betonların İşlenebilirlik ve Dayanım Özellikleri. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34(1), 161-170. <https://doi.org/10.35234/fumbd.990036>
- Demir, T., Demirel, B., & Demirbilek, A. (2022). Farklı Su Bağlayıcı ve Kimyasal Katkı Oranlarına Sahip Yüksek Dayanımlı Betonların İşlenebilirlik ve Dayanım Özellikleri. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34(1), 161-170. doi: 10.35234/fumbd.990036
- Dhand, V., Mittal, G., Rhee, K. Y., Park, S.-J., & Hui, D. (2015). A short review on basalt fiber reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 73, 166-180. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.011>
- Dilbas, H., & Çakır, Ö. (2021). Physical and Mechanical Properties of Treated Recycled Aggregate Concretes: Combination of Mechanical Treatment and Silica Fume. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003658](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003658)
- Dilbas, H., Çakır, Ö., & Atış, C. D. (2019). Experimental investigation on properties of recycled aggregate concrete with optimized Ball Milling Method. *Construction and Building Materials*, 212, 716-726. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.007>
- Ding, M., Xu, W., Wang, J., Chen, Y., & Fang, R. (2023). Analytical study on seismic performance of ECC shell-RC column and its plastic hinge forming mechanism. *Structures*, 58. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105489>
- Döndüren, M. S. (2008). *Bağlayıcı Özelliği Artırılan Duvar Ve Sıva Harcının Düzlem Dışı Yüklenen Tuğla Duvarların Mekaniksel Davranışına Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Konya, 230s.
- Dönmez, D. (2021). *Tekrarlı Yükler Etkisindeki Bölme Duvarların Çimento Esaslı Tekstil Kompozitlerle İyileştirme Yöntemlerinin Geliştirilmesi*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 238s
- Durğut, İ., Tunaboyu, O., & Avşar, Ö. (2020). Dolgu Duvar Modelleme Tekniklerinin Standart-Altı Betonarme Bir Çerçeve Üzerinde İrdelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36(1), 147-162. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.673866>

- Erdal, B. (2011). *Geri Kazanılmış Agregaya İle Üretilen Polipropilen Lif Katkılı Betonların Özellikleri*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, 126 s.
- Erdoğan, T. Y. (2007). *Beton*. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş.: Ankara.
- European Environment Agency. (2020, January 16). *Construction and demolition waste: Challenges and opportunities in a circular economy* (Briefing No. 14/2019; PDF TH-AM-19-016-EN-N; ISBN 978-92-9480-202-6).
<https://www.eea.europa.eu/publications/construction-and-demolition-waste-challenges/construction-and-demolition-waste-challenges>
- Fedakar, B. (2023). *Eğilme Etkisindeki Betonarme Kirişlerde Tasarlanmış Çimentolu Kompozit (ECC) Kullanımının Deneysel Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, 184s.
- Fırat, M. T. (1996). *Silis Dumanı İçerken Yüksek Mukavemetli Betonların Enerji Tutma Kapasitelerinin Artırılmasında Çelik Lif Kullanımının Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Garip, Z. Ş., & Dibekoğlu, Ş. (2022). Deprem Etkisindeki Betonarme Binalarda Dolgu Duvarların Davranışa Etkilerinin İncelenmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*. <https://doi.org/10.29137/umagd.1178219>
- Govindan, P., & Santhakumar, A., R. (1986). Ductility of Infilled Frames. *ACI Journal*. 3(4), 567–576. <https://doi.org/10.14359/10450>
- Gür, M. (2017). *Çimento Esaslı Kompozit Plakalarla Güçlendirilmiş Bölme Duvarlarının Kayma Dayanımının Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Deprem Mühendisliği ve Afet Yönetimi Enstitüsü, İstanbul, 136s.
- Ismail, M. K., & Hassan, A. A. A. (2021). Structural performance of large-scale concrete beams reinforced with cementitious composite containing different fibers. *Structures*, 31, 1207-1215. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.02.028>
- Jalaeefar, A., (2020). Effect of infill walls on behavior of reinforced concrete special moment frames under seismic sequences, *Structures*, 28, 766-773. Doi:[10.1016/j.istruc.2020.09.029](https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.09.029)
- Ji, J., Zhang, Z., Lin, M., Li, L., Jiang, L., Ding, Y., & Yu, K. (2023). Structural application of engineered cementitious composites (ECC): A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials* (v.406). Elsevier <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133289>

- Kaplan, S. A. (2008). Dolgu Duvarların Betonarme Taşıyıcı Sistem Performansına Etkisi. *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 6(452), 49–62.
- Kazem Sharbatdar, M., & Tajari, A. (2021b). Experimental in-plane seismic strengthening of masonry infilled reinforced concrete frames by engineered cementitious composites (ECC). *Construction and Building Materials*, 293, 123529. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123529>
- Kılınç, C. (2012). Kendiliğinden yerleşen beton. *THBB Hazır Beton Dergisi*, 112, 70-75.
- Kızıloğlu, M. Y. (2006). *Deprem Etkisi Altında Dolgu Duvarların Betonarme Çerçeve Yapılar Üzerindeki Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 106s.
- Koç, V., & Birinci, F. (2012). Lifli Betonda Boyut Etkisi Tokluk ve Kırılma Enerjisi. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, 4(3), 24-40.
- Kojima, S., Sakata, N., Kanda, T., & Hiraishi, T. (2004). Application of Direct Sprayed ECC for Retrofitting Dam Structure Surface -Application for Mitaka-Dam. *Concrete Journal*, 42(5), 135-139.
- Lepech, M. D., & Li, V. C. (2009). Application of ECC for bridge deck link slabs. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 42(9), 1185-1195. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9544-5>
- Li, V. C. (2018). ECC Applications in Buildings and Civil Infrastructures. *University of Michigan*, https://acemrl.engin.umich.edu/wp-content/uploads/sites/412/2018/11/ECCApplications.pdf?utm_source=chatgpt.com
- Li, V. C., & Kanda, T. (1998). INNOVATIONS FORUM: Engineered Cementitious Composites for Structural Applications. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(2), 66-69. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(1998\)10:2\(66\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(1998)10:2(66))
- Li, V. C., & Leung, C. K. Y. (1992). Steady-State and Multiple Cracking of Short Random Fiber Composites. *Journal of Engineering Mechanics*, 118(11), 2246-2264. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1992\)118:11\(2246\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1992)118:11(2246))
- Li, Y., Zhu, J., & Wang, Z. (2019). Investigation on Mechanical Properties of Masonry Infill Wall Strengthened with ECC. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(1), 295-306. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-5424-2>.
- Ling, Y., Wang, K., Li, W., Shi, G., & Lu, P. (2019). Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash-based engineered geopolymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 164, 747-757. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.092>

- Liu, Y., Wang, L., Cao, K., & Sun, L. (2021). Review on the Durability of Polypropylene Fibre-Reinforced Concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2021(1). <https://doi.org/10.1155/2021/6652077>
- Mboya, H. A., Njau, K. N., Mrema, A. L., & King'onde, C. K. (2019). Influence of scoria and pumice on key performance indicators of Portland cement concrete. *Construction and Building Materials*, 197, 444-453. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.228>
- Mehta, D., Paliwal, D., Sankhla, V. S., & Tege, S. (2020). Study Of Marble Waste And Its Utilization. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 07(07), 1-5.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2006). *Monteiro, Concrete: Microstructure, Properties and Materails* (3rd edition, C. 2). McGraw-Hill.
- Mercedes, L., Bernat-Maso, E., & Gil, L. (2020). In-plane cyclic loading of masonry walls strengthened by vegetal-fabric-reinforced cementitious matrix (FRCM) composites. *Engineering Structures*, 221, 111097. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111097>
- Mitamura, H., Sakata, N., Shakushiro, K., Suda, K., & Hiraishi, T. (2005). Application of Overlay Reinforcement Method on Steel Deck Utilizing Engineered Cementitious Composites . *Bridge and Foundation Engineering*, 39, 88-91.
- Negro, P., & Verzeletti, G. (1996). Effect of Infills on the Global Behavior of R/C Frames; Energy Considerations from Pseudodynamic Tests. *Eartquake Engineering and Structural Dynamics*, 25, 753-773.
- Oreiby, H., El-Kateb, M., & Hussein, A. (2022). The Effect Of Infill Walls On The Seismic Response Of Irregular R.C Frames. *International Journal Of Creative Research Thoughts*, 10(10).
- Öner, B. (2013). *Lif takviyeli çimento esaslı kompozit üretiminde polimer atıkların değerlendirilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 228s.
- Özkan, C. (2012). *Çimento Esaslı Kompozitlerle Güçlendirilen Dolgu Duvarlı Betonarme Çerçevelerin Tersinir Tekrarlı Yükler Altında Davranışı*, Yüksek Lisans Tezi], İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 164s.
- Özkaynak, H. (2010). *Dolgu Duvarları Lifli Polimerler ile Sargılanmış Betonarme Çerçeve Sistemlerin Deprem Davranışı ve Yapısal Sönüm Özellikleri*, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 312s.

- Öztürk, M. (2016). *Etriyersiz Polipropilen Lifli Betonarme Kirişlerin Kesme Mukavemeti*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 56s.
- Özyurt, M. Z., & Kadioğlu, Ö. F. (2023). Çelik Yapılarda Farklı Dolgu Duvar Tasarımlarının Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Deprem Analiz Yöntemleri ile Araştırılması. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(2), 330-344. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.1207693>
- Qin, F., Zhang, Z., Yin, Z., Di, J., Xu, L., & Xu, X. (2020). Use Of High Strength, High Ductility Engineered Cementitious Composites (ECC) To Enhance The Flexural Performance Of Reinforced Concrete Beams. *Journal of Building Engineering*, 32, 101746. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101746>
- Ranjbar, N., & Zhang, M. (2020). Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. *Cement and Concrete Composites*, 107, 103498. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103498>
- Rokugo, M. Kunieda, & S. C. Lim. (2005). Patching repair with ECC on cracked concrete surface, *ConMat05, Canada*
- Samal, S., & Blanco, I. (2021). An Application Review of Fiber-Reinforced Geopolymer Composite. *Fibers*, 9(4), 23. <https://doi.org/10.3390/fib9040023>
- Sancioğlu, S., Soydoğan, H. F., & Can, H. (2022). The Effect of Different Infill Wall Materials and Their Location in Plan on the Behaviour of a Reinforced Concrete Building. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, 14(2), 457-474. <https://doi.org/10.29137/umagd.1028494>
- Santos, P., Martins, C., & Júlio, E. (2015). Enhancement of the thermal performance of perforated clay brick walls through the addition of industrial nano-crystalline aluminium sludge. *Construction and Building Materials*, 101, 227-238. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.058>
- Sarı, M. (2013). *Farklı Tipteki Liflerin Betonun Mekanik Davranışına Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 94s.
- Sevil, T., Baran, M., & Canbay, E. (2010). Tuğla Dolgu Duvarların B/A Çerçevesi Yapıların Davranışına Etkilerinin İncelenmesi; Deneysel ve Kuramsal Çalışmalar. *International Journal Of Engineering Research And Development*, 2(2), 35-42.
- Shan, S., Li, S., & Wang, S. (2019). Effect of infill walls on mechanisms of steel frames against progressive collapse. *Journal of Constructional Steel Research*, 162, 105720. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105720>

- Shanour, A. S., Said, M., Arafa, A. I., & Maher, A. (2018). Flexural performance of concrete beams containing engineered cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 180, 23-34. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.238>
- Sim, J., Park, C., & Moon, D. Y. (2005). Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, 36(6-7), 504-512. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2005.02.002>
- Song, P. S., & Hwang, S. (2004). Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 18(9), 669-673. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027>
- Stat-Ease, Inc. (2024). *Design-Expert® software (Version 13)* [Computer software]. Minneapolis, MN: Stat-Ease, Inc. <https://www.statease.com/software/design-expert>
- Şahmaran, M., & Li, V. C. (2016.). *Suppressing Alkali-Silica Expansion Using ECC for extended infrastructure service life*. ACI Concrete International, 38 (5), 47
- Şahmaran, M., & Li, V. C. (2008). Durability of mechanically loaded engineered cementitious composites under highly alkaline environments. *Cement and Concrete Composites*, 30(2), 72-81. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.09.004>
- Şahmaran, M., Özbay, E., Yücel, H. E., Lachemi, M., & Li, V. C. (2012). Frost resistance and microstructure of Engineered Cementitious Composites: Influence of fly ash and micro poly-vinyl-alcohol fiber. *Cement and Concrete Composites*, 34(2), 156-165. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.10.002>
- Talaat Mohammed, D., & Yaltay, N. (2024). Strength and elevated temperature resistance properties of the geopolymer paste produced with ground granulated blast furnace slag and pumice powder. *Ain Shams Engineering Journal*, 15(3), 102483. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102483>
- Tayanç, M., & Erdil, B. (2020). Betonarme Yapılarda Sıva ve Kaplama Çatlakları. *Yapı Teknolojileri Dergisi*, 5(2), 45-60.
- Tazzini, A., Gambino, F., Casale, M., & Dino, G. A. (2024). Managing Marble Quarry Waste: Opportunities and Challenges for Circular Economy Implementation. *Sustainability*, 16(7), 3056. <https://doi.org/10.3390/su16073056>
- Toker, A. (2007). *Betonarme Bir Yapıda Dolgu Duvar Etkisinin Doğrusal Olmayan Dinamik Hesap Yöntemiyle İncelenmesi*, Yüksek Lİsans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 106s.
- Türkiye Hazır Beton Birliği. (2025, Temmuz 23). *Beton Nedir?* Türkiye Hazır Beton Birliği. <https://www.thbb.org/teknik-bilgiler/beton-nedir>

- Wang, F., Kyriakides, N., Chrysostomou, C., Eleftheriou, E., Votsis, R., & Illampas, R. (2021). Experimental Research on Bond Behaviour of Fabric Reinforced Cementitious Matrix Composites for Retrofitting Masonry Walls. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 15(1), 22. <https://doi.org/10.1186/s40069-021-00460-1>
- Wongsa, A., Sata, V., Nuaklong, P., & Chindaprasirt, P. (2018). Use of crushed clay brick and pumice aggregates in lightweight geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 188, 1025-1034. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.176>
- Wu, J. (2023). Impact Performance of RC Beams Reinforced by Engineered Cementitious Composite. *Buildings*, 13(7), 1688. <https://doi.org/10.3390/buildings13071688>
- Xu, L., Pan, J., & Chen, J. (2017). Mechanical Behavior of ECC and ECC/RC Composite Columns under Reversed Cyclic Loading. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 29(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001950](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001950)
- Yadollahi, M. M., BENLİ, A., & VAROLGÜNEŞ, S. (2016). Masonry Infill Walls Effect In Short Column Formation In Rc Buildings: A Case Study. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 19(2), 78. <https://doi.org/10.17780/ksujes.16070>
- Yıldırım, M. (2014). *Lif Donatılı Çimentolu İnce Kompozitler – Mimaride Kullanımı*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, 161s.
- Yüksel, H. (2010). Gazbetonun Yapısal Özellikleri ve Kullanım Alanları. *İnşaat Teknolojileri Dergisi*, 45-52.

EKLER

EK-1 Kongre Kabul Mektubu

SIVAS II. International Conference on Scientific and Innovation Research



Ref : AFHRU5780011
opic : Letter of Acceptance

30/08/2023

Dear: "Erkam KÖSEÖMÜR

Furkan BİRDAL

Hasan DİLBAS"

Herewith, the international scientific committee is happy to inform you that the peer-reviewed entitled < Analytical Investigation Of Rc Frames Lateral Load Capacities Made With Sustainable Engineered Cementitious Composite (Ecc) > has been accepted for oral presentation as well as inclusion in the conference proceedings of SIVAS II. INTERNATIONAL CONFERENCE ON SCIENTIFIC AND INNOVATION RESEARCH to be held in Sivas, Turkey during September 15-17, 2023 that will take place at the Sivas University of Science and Technology conference room and Zoom Online Meeting Program.

We are looking forward to hearing from you.
With Warmest Regards

Prof. Dr. Tolga KARAKÖY
Head of Conference
(Sivas University of Science and Technology)

www.iksadkongre.com
instituteispec@gmail.com



EK-2 Kongre Katılım Belgesi





ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER	
Adı Soyadı	Erkam Köseömr
Uyruğu	T.C.
Orcid Numarası	0009-0000-7888-1221

EĞİTİM BİLGİLERİ	
Lisans	
Üniversite	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik ve Mimarlık
Bölümü	İnşaat Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2022
Yüksek Lisans	
Üniversite	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi
Enstitü	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	İnşaat Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2025

Tezden Üretilen Makaleler ve Bildiriler	
Uluslararası Konferans ve Sempozyumlarda Sunulan Bildiriler	
Köseömr, E., Birdal, F., & Dilbas, H. (2023, 15-17 Eylül). Sürdürülebilir çimento esaslı kompozit (ECC) ile üretilmiş betonarme çerçevelerin yatay yük kapasitelerinin analitik olarak incelenmesi. <i>Sivas 2. Uluslararası Bilimsel Araştırmalar ve İnovasyon Kongresi</i> . Sivas, Türkiye.	