



Tane boyutu optimizasyonunun lif donatılı yüksek performanslı çimentolu kompozitlerin mekanik ve kendiliğinden iyileşme davranışına etkisi

Program Kodu: 3501

Proje No: 116M202

Proje Yürütücüsü:
Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Bahadır KESKİN

Araştırmacı:

Dr. Öğr. Üyesi Özlem KASAP KESKİN

Bursiyerler:

Hüseyin KARACA

Kamil TEKİN

Okan İlter TAŞ

MART 2019
MUĞLA



ÖNSÖZ

Geleneksel beton her ne kadar ilk üretim maliyeti olarak yüksek performanslı betonlara kıyasla daha ekonomik görünse de performans ve servis ömrü bakımından bir takım dezavantajlara sahiptir. Geleneksel betonun kırılğan yapısı sebebiyle betonarme yapılardaki çekme ve eğilme yükleri altında deformasyon kontrolü sadece çelik donatılar ile sağlanmaktadır. Bu durum geleneksel betonun deprem yükleri altındaki hasar toleransının yetersiz olmasına neden olmaktadır. Ayrıca dayanıklılık bakımından şiddetli çevresel etkilere karşı direnci, yüksek performanslı betonların gerisinde kalmaktadır. Tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda, geleneksel beton kullanımı, daha fazla bakım/onarım müdahalesi gerektiren ancak daha kısa servis ömrüne sahip yapıların inşa edilmesine neden olmaktadır. İlk üretim maliyeti olarak daha ekonomik görünen geleneksel beton servis ömrü ve bakım/onarım maliyetleri düşünüldüğünde uzun vadede ekonomikliğini yitirmektedir. Geleneksel betonun bu dezavantajları göz önünde bulundurulduğunda alternatif yapı malzemelerinin tasarım ve üretim gerekliliği kendini göstermektedir.

Tasarlanmış Çimentolu Kompozitler (TÇK) yüksek performanslı betonlar içerisinde en yüksek teknoloji düzeyini temsil etmektedir. TÇK tasarım prensibi gereği ve içerdiği yüksek oranda bağlayıcı malzemeler sayesinde üstün hasar toleransı, dayanıklılık ve ayrıca kendiliğinden iyileşme özellikleri göstermektedir. TÇK'da kendiliğinden iyileşme davranışı, çeşitli yüklemeler altında oluşan çatlakların mikron düzeyinde kalmasıyla ve üretiminde kullanılan yüksek miktarda bağlayıcı malzemelerin suyun varlığında çeşitli kimyasal tepkimelere devam etmesiyle sağlanmaktadır. Ayrıca TÇK'nın içeriğindeki bağlayıcı malzemelerin yüksek oranda endüstriyel atıklardan oluşması bu malzemeye çevreci bir nitelik kazandırmaktadır.

Bu proje kapsamında, literatürde sıklıkla kullanılan TÇK karışımları dikkate alınarak modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen modeliyle tane boyutu optimizasyonu metodu uygulanarak daha sıkı bir yapıya sahip olan TÇK'lar tasarlanmış ve üretilmiştir. TÇK'ların yeniden tasarım sürecinde malzemeye üstün özelliklerini sağlayan mikro-mekanik tabanlı tasarım prensibi göz önünde bulundurulmuştur. Yeniden tasarlanan bu karışımların üretiminde ise büyük oranda yerel malzemeler kullanılmıştır. Daha sonraki süreçte Andreasen ve Andersen modeliyle tane boyutu optimizasyonu metodu uygulanarak üretilen bu karışımların mekanik ve kendiliğinden iyileşme davranışları çeşitli deneysel metotlar uygulanarak incelenmiştir.

Çalışma aynı zamanda, proje bursiyerlerinden İnş. Müh. Hüseyin Karaca ve İnş. Müh. Kamil Tekin'in halen devam etmekte olan tez çalışmalarını da kapsamaktadır.

Proje ekibi olarak araştırma boyunca gerçekleştirilen analizler sırasında sağladıkları katkılar için Dr. Burhan Aleessa ALAM ve İnş. Yük. Müh. Tuğhan Delibaş'a teşekkür ederiz. Bununla



birlikte, proje kapsamında kullanılan çimentonun teminindeki desteklerinden dolayı OYAK Denizli Çimento San. Türk A.Ş.'ye, uçucu kül teminindeki desteklerinden dolayı Yatağan Termik Enerji Üretim A.Ş.'ye, öğütülmüş yüksek fırın cürufu teminindeki desteklerinden dolayı Çimsa Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye, silis dumanı teminindeki desteklerinden dolayı Eti Elektrometalurji A.Ş.'ye ve son olarak kullanılan kimyasal katkıların teminindeki desteklerinden dolayı BASF Yapı Kimyasalları'na en içten teşekkürlerimizi sunarız.

Son olarak ise, proje ekibi olarak projeyi destekleyen ve gerçekleştirilmesini mümkün kılan TÜBİTAK'a katkılarından dolayı teşekkür ederiz.



İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER.....	iii
TABLO LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Genel	1
1.2 Amaç ve Kapsam	4
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	6
2.1 Tasarlanmış Çimentolu Kompozitler.....	6
2.2 Çimentolu Kompozitlerde Kendiliğinden İyileşme	10
2.3 Tane Boyutu Optimizasyonu	14
3. DENEYSEL PROGRAM.....	19
3.1 Malzeme Karakterizasyonu	19
3.2 Standart Tasarlanmış Çimentolu Kompozit Karışımları	23
3.3 Silis Dumanı İçermeyen Karışımlar İçin Tane Boyutu Optimizasyonu	23
3.3.1 Agregası Optimizasyonu (i.a)	26
3.3.2 Bağlayıcı Optimizasyonu (i.b)	28
3.3.3 Agregası Ve Bağlayıcısının Birlikte Optimizasyonu (ii)	32
3.4 Silis Dumanı İçeren Karışımlar İçin Tane Boyutu Optimizasyonu (s).....	39
3.4.1 Bağlayıcı Optimizasyonu (i.bs)	40
3.4.2 Agregası Ve Bağlayıcısının Birlikte Optimizasyonu (ii.s)	41
3.5 Tane Boyutu Optimizasyonu ile Tasarlanmış Çimentolu Kompozit Karışımları.....	44
3.6 TÇK Karışımlarının Üretilmesi.....	46
3.7 TÇK Karışımlarının Özelliklerin Belirlenmesi	48
3.7.1 Basınç Dayanımı Testi	49
3.7.2 Eğilme Deneyi	49
3.7.3 Civalı Porozimetre ile Boşluk Dağılımının Belirlenmesi.....	50
3.8 TÇK Karışımlarının Kendiliğinden İyileşme Performansının Belirlenmesi	50
3.8.1 Eğilme Deneyi	52
3.8.2 Ultrases Dalga Hızı Deneyi.....	53



3.8.3 Elektriksel Özdirenç Ölçüm Deneyi.....	54
3.8.4 Hızlı Klor İyonu Geçirimsizliği Deneyi	57
3.8.5 Kılcal Su Emme Deneyi	58
3.8.6 Çatlakların Görsel Muayenesi.....	59
3.8.7 Çatlak Karakterizasyonu.....	60
4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	61
4.1 Taze Haldeki Özellikler	62
4.1.1 Mini Çökme Hunisi.....	62
4.1.2 Boşluk Hacmi	64
4.2 Mekanik Özellikler.....	65
4.2.1 Basınç Deneyi	65
4.2.2 Eğilme Deneyi	67
4.2.3 Civalı Porozimetre Sonuçları	69
4.3 Kendiliğinden İyileşme Özellikleri.....	72
4.3.1 Eğilme Deneyi	72
4.3.2 Ultrases Dalga Hızı.....	77
4.3.4 Hızlı Klor İyonu Geçirgenliği	82
4.3.4 Elektriksel Özdirenç.....	86
4.3.5 Kılcal Su Emme.....	92
4.3.6 Çatlakların Görsel Muayenesi.....	95
4.3.7 Çatlak Karakterizasyonu.....	105
5. SONUÇ	115
REFERANSLAR.....	118

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Standart TÇK karışımında bileşenlerin karışım oranları	9
Tablo 3.1. TÇK üretiminde kullanılan bağlayıcı malzemelerin kimyasal kompozisyonları ve fiziksel özellikleri.....	19
Tablo 3.2. TÇK üretiminde kullanılan agregaların kimyasal kompozisyonları.....	20
Tablo 3.3. PVA liflerin özellikleri	22
Tablo 3.4. Standart TÇK karışım oranları	23
Tablo 3.5. Silis dumanı içermeyen TÇK karışımları için optimizasyon ile hesaplanan karışım oranları	44
Tablo 3.6. Silis dumanı içeren TÇK karışımları için optimizasyon ile hesaplanan karışım oranları	44
Tablo 3.7. TÇK karışımları için optimizasyon parametreleri	45
Tablo 4.1. Karışımların lifli ve lifsiz halde mini çökme hunisi yayılma değerleri.....	64
Tablo 4.2. Mekanik olarak sıkıştırılmış TÇK'ların boşluk miktarı	64
Tablo 4.3. Normal sıkıştırma şartlarında matris ve TÇK'daki boşluk oranı	65
Tablo 4.4. TÇK karışımlarının basınç dayanımları	67
Tablo 4.5. TÇK karışımlarının eğilme altında özellikleri	68
Tablo 4.6. Karışımların ortalama boşluk çapı ve poroziteleri.....	72
Tablo 4.7. Sağlam numunelerden elde edilen eğilme deneyi sonuçları.....	73
Tablo 4.8. Hasarlı numunelerden elde edilen eğilme deneyi sonuçları	73
Tablo 4.9. Sağlam numuneler için ultrases hızları	78
Tablo 4.10. Hasarlı numuneler için ultrases hızları	78
Tablo 4.11. TÇK karışımlarında kendiliğinden iyileşme ürünlerinin EDS analiz sonuçları ...	111



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. TÇK'nin çekme yükleri altında gerileme-şekil değiştirme davranışı (Şahmaran ve Li, 2009-a).....	6
Şekil 2.2. TÇK'nin eğilme yükleri altında davranışı (Yang ve Li, 2010)	7
Şekil 2.3. Çekme gerilmesi (σ) - çatlak açıklığı (δ) eğrisi üzerinden tamamlayıcı enerji kavramının ifadesi (Yang ve Li, 2007)	8
Şekil 2.4. Çimentolu kompozitlerde içsel kendiliğinden iyileşme mekanizmaları (Reinhardt vd., 2013).....	12
Şekil 2.5. Taneler arasındaki boşluk miktarının azaltılması (Andersen ve Johansen, 1991) .	14
Şekil 2.6. Tane boyutu optimizasyonu modelleri (Kumar and Santhanam, 2003).....	15
Şekil 2.7. Modifiye Andreasen ve Andersen optimizasyon modeli parametrelerinin dağılıma etkisi.....	17
Şekil 3.1. Atık kuvars ile üretilen harç çubuklarının boy değişimi.....	20
Şekil 3.2. TÇK karışımlarında kullanılan bağlayıcı malzemelerin tane boyutu dağılımları	21
Şekil 3.3. TÇK karışımlarında kullanılan bağlayıcı olmayan malzemelerin tane boyutu dağılımları	22
Şekil 3.4. Optimizasyonla elde edilen toz karışımların boşluk oranının belirlenmesi	24
Şekil 3.5. Agregat optimizasyonu için başlangıç dağılım modülünün belirlenmesi	26
Şekil 3.6. Agregat optimizasyonu için en düşük RSS değerinin belirlenmesi	27
Şekil 3.7. Agregat optimizasyonu için en düşük boşluk hacminin belirlenmesi.....	28
Şekil 3.8. Bağlayıcı malzemeler için başlangıç dağılım modülünün belirlenmesi	29
Şekil 3.9. Sınır koşulları tanımlanmadan elde edilen bağlayıcı karışımı ve hedef eğri	30
Şekil 3.10. Bağlayıcı optimizasyonu için en düşük RSS değerinin belirlenmesi	31
Şekil 3.11. Bağlayıcı optimizasyonu için en düşük boşluk hacminin belirlenmesi.....	32
Şekil 3.12. F1.2 karışımı için dağılım modülünün belirlenmesi.....	33
Şekil 3.13. Sabit agregat miktarı ile optimizasyon için en düşük RSS değerinin belirlenmesi.	34

Şekil 3.14. Sabit agrega miktarı ile optimizasyon için en düşük boşluk hacminin belirlenmesi	35
Şekil 3.15. Sabit bağlayıcı miktarı ile optimizasyon için en düşük RSS değerinin belirlenmesi	36
Şekil 3.16. Sabit bağlayıcı miktarı ile optimizasyon için en düşük boşluk hacminin belirlenmesi	37
Şekil 3.17. Sabit agrega/bağlayıcı oranı ile optimizasyon için en düşük RSS değerinin belirlenmesi	38
Şekil 3.18. Sabit agrega/bağlayıcı oranı ile optimizasyon için en düşük boşluk hacminin belirlenmesi	39
Şekil 3.19. Bağlayıcı optimizasyonu için en düşük boşluk hacminin belirlenmesi.....	41
Şekil 3.20. Sabit agrega miktarı ile optimizasyon için en düşük boşluk hacminin belirlenmesi	42
Şekil 3.21. Sabit bağlayıcı miktarı ile optimizasyon için en düşük boşluk hacminin belirlenmesi	42
Şekil 3.22. Sabit agrega-bağlayıcı oranı ile optimizasyon için en düşük boşluk hacminin belirlenmesi	43
Şekil 3.23. TÇK karışımlarında kullanılan toz malzemeler	46
Şekil 3.24. TÇK bileşenlerinin karışım süreci.....	47
Şekil 3.25. Ultrasonik ayrıştırıcı ile silis dumanının ayrıştırılması	48
Şekil 3.26. Basınç dayanımı test cihazı	49
Şekil 3.27. 4-noktalı eğilme deney düzeneği.....	50
Şekil 3.28. Kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesi prosedürü	52
Şekil 3.29. Dolaylı iletim yöntemi ile UPV sonuçlarının ölçülmesi	54
Şekil 3.30. Beton elektriksel özdirenç ölçüm cihazı.....	54
Şekil 3.31. Ön yüklenmiş numunelerin elektriksel empedans test düzeneği ile test edilme biçimleri.....	56

Şekil 3.32. Sağlam numunelerin elektriksel empedans test düzeneği ile test edilmesi.....	56
Şekil 3.33. HKİG deney düzeneği HKİG deney düzeneği	57
Şekil 3.34. Kılcal su emme deney düzeneği	59
Şekil 3.35. Kamera düzeneği ve kullanılan ağ kamerası.....	60
Şekil 4.1. Mini çökme hunisi ölçüleri	62
Şekil 4.2. Örnek mini çökme hunisi testi a. Lifli, b. Lifsiz karışım.....	62
Şekil 4.3. Liflerin çatlağın iki yakasını köprülemesi	69
Şekil 4.4. Silis dumanı içeren karışımlarda lif kopması	69
Şekil 4.5. Standart TÇK karışımlarının boşluk dağılımları	70
Şekil 4.6. Agregada ve bağlayıcının ayrı optimizasyonu için boşluk dağılımları	70
Şekil 4.7. Agregada ve bağlayıcının birlikte optimizasyonu için boşluk dağılımları.....	71
Şekil 4.8. Silis dumanı içeren karışımların boşluk dağılımları	71
Şekil 4.9. Standart karışımlar için iyileşme yüzdeleri	75
Şekil 4.10. Ayrı optimizasyon karışımları için iyileşme yüzdeleri	75
Şekil 4.11. Birlikte optimizasyon için iyileşme yüzdeleri	76
Şekil 4.12. Silis dumanı içeren karışımları için iyileşme yüzdeleri	77
Şekil 4.13. Standart karışımların ultrases hızındaki iyileşme yüzdesi.....	79
Şekil 4.14. Ayrı optimizasyon karışımlarının ultrases hızında iyileşme yüzdesi.....	80
Şekil 4.15. Birlikte optimizasyon karışımlarının ultrases hızında iyileşme yüzdesi	81
Şekil 4.16. Silis dumanı içeren karışımların ultrases hızında iyileşme yüzdesi.....	82
Şekil 4.17. Standart karışımlardan geçen elektrik yükü değişimi.....	83
Şekil 4.18. Ayrı optimizasyon karışımlarından geçen elektrik yükü değişimi	84
Şekil 4.19. Birlikte optimizasyon karışımlarından geçen elektrik yükü değişimi	85
Şekil 4.20. Silis dumanı içeren karışımlardan geçen elektrik yükü değişimi	86
Şekil 4.21. Suyu doymuş standart karışımlardaki elektriksel özdirenç değişimi	87
Şekil 4.22. Hava kurusu standart karışımlarda elektriksel özdirenç değişimi.....	88
Şekil 4.23. Suyu doymuş ayrı optimizasyon karışımlarında elektriksel özdirenç değişimi	89

Şekil 4.24. Hava kurusu ayrı optimizasyon karışımlarında elektriksek özdirenç değişimi	89
Şekil 4.25. Suya doymuş birlikte optimizasyon karışımlarında elektriksel özdirenç değişimi .	90
Şekil 4.26. Hava kurusu birlikte optimizasyon karışımlarında elektriksel özdirenç değişimi...	91
Şekil 4.27. Suya doymuş silis dumanı içeren karışımlarda elektriksel özdirenç değişimi.....	91
Şekil 4.28. Hava kurusu silis dumanı içeren karışımlarda elektriksel özdirenç değişimi	92
Şekil 4.29. Standart TÇK karışımlarının kılcal su emme indekslerindeki değişim.....	93
Şekil 4.30. Agregatör ve bağlayıcıların ayrı optimizasyonu ile hazırlanan TÇK karışımlarının kılcal su emme indekslerindeki değişim	93
Şekil 4.31. Agregatör ve bağlayıcıların birlikte optimizasyonu ile hazırlanan TÇK karışımlarının kılcal su emme indekslerindeki değişim.....	94
Şekil 4.32. Silis dumanı içeren TÇK karışımlarının kılcal su emme indekslerindeki değişim .	94
Şekil 4.33. Çatlak görünümündeki zamana bağlı değişimler	97
Şekil 4.34. TÇK karışımlarda çatlak kapanma oranı	98
Şekil 4.35. F 1.2 numunesinin eğilme altında görüntüsü.....	99
Şekil 4.36. F 2.2 numunesinin eğilme altında görüntüsü.....	100
Şekil 4.37. S 1.2 numunesinin eğilme altında görüntüsü.....	100
Şekil 4.38. S 2.2 numunesinin eğilme altında görüntüsü.....	101
Şekil 4.39. i.a numunesinin eğilme altında görüntüsü	101
Şekil 4.40. i.b numunesinin eğilme altında görüntüsü	102
Şekil 4.41. ii.a numunesinin eğilme altında görüntüsü	102
Şekil 4.42. ii.b numunesinin eğilme altında görüntüsü	103
Şekil 4.43. ii.c numunesinin eğilme altında görüntüsü	103
Şekil 4.44. iii numunesinin eğilme altında görüntüsü	104
Şekil 4.45. i.bs numunesinin eğilme altında görüntüsü	104
Şekil 4.46. ii.as numunesinin eğilme altında görüntüsü.....	105
Şekil 4.47. Standart TÇK karışımlarının SEM görüntüleri	107

Şekil 4.48. Agregata ve bağlayıcıların ayrı ayrı optimizasyonu ile elde edilen TÇK karışımlarının SEM görüntüleri.....	108
Şekil 4.49. Agregata ve bağlayıcıların birlikte optimizasyonu sonucu elde edilen TÇK karışımlarının SEM görüntüleri	109
Şekil 4.50. Silis dumanı içeren TÇK karışımlarının SEM görüntüleri.....	110
Şekil 4.51. Standart TÇK karışımlarının XRD analizleri (Q : Kuvars ve C : Kalsit).....	113
Şekil 4.52. Agregata ve bağlayıcıların ayrı ayrı optimizasyonu ile elde edilen TÇK karışımlarının XRD analizleri (Q : Kuvars ve C : Kalsit).....	113
Şekil 4.53. Agregata ve bağlayıcıların birlikte optimizasyonu sonucu elde edilen TÇK karışımlarının XRD analizleri (Q : Kuvars ve C : Kalsit)	114
Şekil 4.54. Silis dumanı içeren TÇK karışımlarının XRD analizleri (Q : Kuvars ve C : Kalsit)	114



ÖZET

Tasarlanmış Çimentolu Kompozitler (TÇK) tasarımlarından kaynaklanan çoklu mikro çatlaklanma davranışları ve bünyelerinde bulunan yüksek miktardaki bağlayıcılar sayesinde kendiliğinden iyileşme özelliğine sahip yüksek performanslı lif donatılı çimentolu kompozitlerdir. Ancak bu kompozitler tasarımları gereği özel malzemeler ve belirli karışım oranlarında üretilebilmektedir. Bu projenin amacı tane boyutu optimizasyonu yöntemi ile TÇK tasarımı yapmaktır. Proje kapsamında literatürdeki TÇK tasarımları referans olarak alınarak, modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen modeli uygulanarak yerel malzemelerle TÇK tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, tane boyutu optimizasyonu ile tasarlanan 8 TÇK karışımı ile literatürde sıklıkla karşılaşılan 4 standart TÇK karışımı olmak üzere toplam 12 farklı TÇK'nın mekanik özellikleri ve kendiliğinden iyileşme performansları incelenmiştir.

Proje kapsamında literatürdeki TÇK karışımları dikkate alınarak, bu karışımlar içerisindeki granüler malzemelerin tane boyutu dağılımlarına bağlı olarak, modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen yöntemiyle bağlayıcı olan ve olmayan kısım ayrı ayrı ve birlikte olmak üzere çeşitli şekillerde optimize edilmiştir. Bu amaçla kullanılan toz malzemeler çimento, uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve farklı boyutlardaki kuvars kumlarıdır. Böylece hem bağlayıcı malzemelerin daha etkin kullanımının sağlanması, hem de optimizasyonla elde edilmiş sıkı içyapının mekanik ve kendiliğinden iyileşme davranışına etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir.

Tüm TÇK karışımlarının 7, 28 ve 90. günlerde olmak üzere basınç dayanımı ve eğilme özellikleri belirlenmiştir. Kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesi için ise 28.günde ön yükleme ile hasara uğratılan numunelerin eğilme altındaki davranışları, ultrases geçiş hızları, elektriksel özdirenç değerleri, hızlı klor iyonu geçirimsizliği, kılcal su emme indeksleri ve çatlak genişlikleri ön yüklemeyi takip eden 0, 15, 30, 60 ve 90. günlerde belirlenmiştir. Proje sonucunda tüm ECC karışımlarında kendiliğinden iyileşme özelliği elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tasarlanmış Çimentolu Kompozitler, tane boyutu optimizasyonu, modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen modeli, kendiliğinden iyileşme.



ABSTRACT

Engineered Cementitious Composites (ECC) are high performance cementitious composites which have multiple micro-cracking property due to their design and possess self-healing property due to their high cementitious material content. However, these composites can be produced only with specific materials and fixed mixture proportions. The aim of this project is to design ECC through particle size optimization method. Within the scope of this project, design and production of ECC with local materials were performed by taking the mixtures in the literature as the reference and applying modified Andreasen and Andersen model. For this purpose, mechanical properties and self-healing performances of 12 different ECC mixtures 4 of which were the standard ECC from the literature and 8 of which were designed according to particle size optimization were investigated.

Within the scope of the project, by considering ECC mixtures from the literature, depending on the particle size distribution of granular materials of those mixtures, cementitious and non-cementitious parts were optimized together and separately according to modified Andreasen and Andersen method. Powder materials used for this purpose are cement, fly ash, ground granulated blast furnace slag, silica fume, and quartz sands of different sizes. By this way, it is aimed to provide more effective use of binding materials as well as to investigate the effect of compact internal structure due to particle size optimization on the mechanical and self-healing behavior.

The compressive strength and bending properties of all ECC mixtures were determined at 7, 28 and 90th days. In order to determine the self-healing performance, bending properties, ultrasonic pulse velocity, electrical resistivity, rapid chloride ion penetration, sorptivity index and crack width change were determined on the specimens for the following 0, 15, 30, 60 and 90th days after preloading. As a result of the project, self-healing property were obtained in all ECC mixtures.

Keywords: Engineered Cementitious Composites, particle size optimization, modified Andreasen and Andersen model, self-healing.

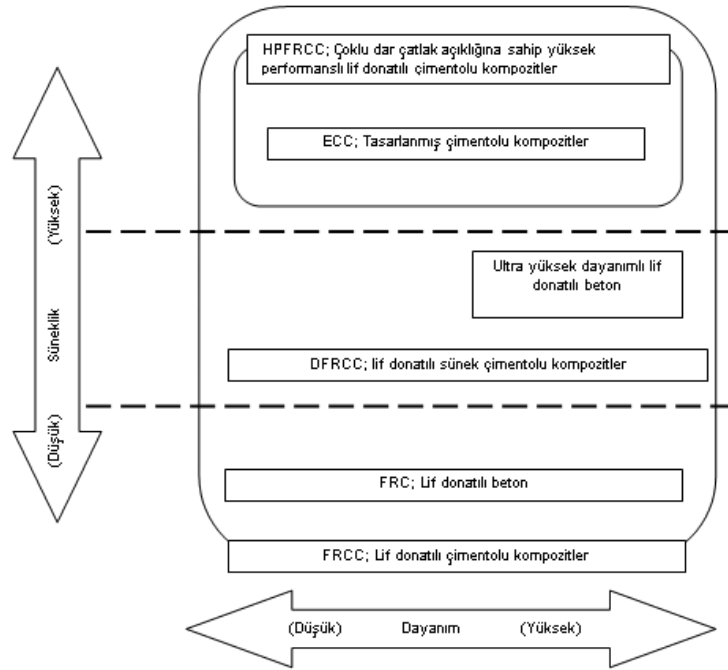
1. GİRİŞ

1.1 Genel

Çevremizdeki binaların büyük çoğunluğunun betonarme yapılar olduğu ve tüm dünya üzerinde en çok kullanılan yapı malzemesinin beton olduğu aşikârdır. Beton bu kadar popüler kılan özelliklerine rağmen, çekme yükleri altında düşük dayanıma sahip, kırılğan özellikte ve çatlak oluşumuna elverişli yapıda olması en belirgin dezavantajları olarak sıralanabilir. Betonarme yapılarda çekme bölgelerine çelik donatı çubuklarının yerleştirilmesi ile çekme gerilmelerine karşı dayanım elde edilebilmesine rağmen, kırılğan yapı ve çatlak oluşumu hala betonun servis ömrünü kısaltmakta veya bakım/onarım maliyetlerini arttırmaktadır. Bu durum yapı malzemeleri konusunda uzman araştırmacıları, deformasyon kapasitesi daha yüksek beton benzeri yapı malzemeleri üretimi ve kendiliğinden iyileşen yani çatlaklarını onarabilen beton benzeri yapı malzemeleri üretimi gibi özel beton tipleri konularında çalışmalar yapmaya yönlendirmiştir. Karışımlara çeşitli liflerin eklenmesi ile elde edilen ve yüksek deformasyon ve enerji emme kapasitesine sahip lif donatılı betonlar/çimentolu kompozitler ile ilgili literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur. Kendiliğinden iyileşme özelliğinin beton/çimentolu kompozitlerde geliştirilmesi için bakteri ve çeşitli bileşenlerin kapsüller içerisinde karışıma eklenmesi gibi farklı yöntemler literatürde yer bulmuştur. Lif donatılı çimentolu kompozitler arasında ise Tasarlanmış Çimentolu Kompozitler (TÇK) hem çekme ve eğilme yükleri altında gösterdikleri sünek davranış hem de yüksek miktarda bağlayıcı içeriği ve dar açıklıklı çatlak oluşumu özelliği sebebiyle gösterdiği içsel kendiliğinden iyileşme ile her iki özelliği de içinde barındırmaktadır.

TÇK mikromekanik tabanlı tasarım prensibine göre meydana getirilmiş, yüksek performanslı, şekil değiştirme sertleşmesi gösteren lif donatılı çimentolu kompozitleri ifade etmektedir. İlk olarak Michigan Üniversitesinden Prof. Dr. Victor Li tarafından tasarlanmış tek bir karışım olarak ortaya çıkmış olsa da, zamanla farklı bağlayıcıların kullanımı ve içeriğindeki malzeme oranlarının değiştirilmesiyle günümüzde TÇK tasarım prensipleri dikkate alınarak tasarlanmış bir kompozit ailesi olarak karşımıza çıkmaktadır. Şu ana kadar çeşitli TÇK'ların özellikle çekme ve eğilme yükleri altındaki üstün mekanik özellikleri pek çok araştırmacı tarafından ortaya konmuştur. TÇK'nın diğer bütün lif donatılı kompozitlerden farkı Şekil 1.1'de de görüleceği üzere, geniş bir dayanım aralığında yüksek deformasyon kabiliyetine sahip olmasıdır. Özellikle çekme ve eğilme yükleri altında adeta metal malzemeler gibi uzama ve sehim göstermesi bu kompoziti diğer lif donatılı kompozitlerden ayırmaktadır. Çekme altında şekil değiştirme sertleşmesi ve eğilme altında eğilme sertleşmesi davranışı gösteren TÇK, bu özelliğini dar

açıklıklı çok sayıda çatlak oluşumuna borçludur. Malzeme üzerinde yükleme sırasında çatlak genişlikleri 100 μm 'nin altında kalmaktadır. Bu durum TÇK'ya iki önemli özellik kazandırmaktadır: İlk olarak, TÇK karışımlarının dayanıklılık özellikleri birçok araştırmacı tarafından ele alınmış ve diğer çimentolu kompozitlere göre üstünlükleri gösterilmiştir. Bunun esas nedeninin malzemenin üzerinde oluşan çatlak genişliklerinin çok dar olması ve çekme altındaki davranışı sayesinde malzemenin hasar toleransının yüksek olması olduğu vurgulanmıştır. (Kanda vd., 2003; Li vd., 2003; Li vd., 2007; Li ve Lepech, 2004; Miyazato and Hiroishi, 2005; Şahmaran vd., 2007; Şahmaran vd., 2008; Şahmaran and Li, 2008; Şahmaran ve Li, 2009-b;)



Şekil 1.1. Lif donatılı çimentolu kompozitlerin sınıflandırılması ve özellikleri (JSCE, 2008)

İkinci olarak da, özellikle son yıllarda TÇK'ların kendiliğinden iyileşme özellikleriyle ilgili dikkate değer miktarda çalışma göze çarpmaktadır. TÇK'daki kendiliğinden iyileşme, herhangi ilave katkı maddesi veya özel bir işlem gerektirmeden yani içsel olarak meydana gelmektedir. Bunun temel sebebi ise TÇK'da oluşan çok sayıda dar çatlakların kendiliğinden kapanma yeteneğidir. TÇK içerisindeki yüksek miktarda çimento, uçucu kül ve cüruf gibi ilave bağlayıcılar ileri yaşlarda bile ikincil hidratasyon ve kalsiyum karbonat oluşumuyla dar çatlakların kolayca kapanmasını mümkün kılmaktadır. (Alyousif vd., 2015; Kan vd., 2010; Li ve Herbert, 2012; Li ve Li, 2011; Özbay vd., 2013-a; Qian vd., 2009; Şahmaran vd., 2013; Şahmaran vd., 2014; Wu vd., 2012; Yang vd., 2009; Yıldırım vd., 2015-a;)

Öte yandan, farklı boyutlarda taneciklerin bir araya gelmesiyle oluşan malzemelerde, tanecikler arasındaki boşluk miktarını azaltarak en sıkı yapıyı elde etmek tane boyutu optimizasyonu ile mümkün olmaktadır. Tane boyutu optimizasyonu farklı boyutlardaki tanelerin aralarında en az boşluk kalacak şekilde bir araya gelme oranlarını belirlemek için kullanılan bir yöntemdir. Belirlenen bir modele göre tanelerin sahip olması gereken hedef boyut dağılımını tespit ettikten sonra, bu hedef dağılıma en yakın tane boyutu dağılımına sahip karışımı elde etmek bu yöntemin iki temel basamağını oluşturmaktadır. Beton üretiminde agregalar arasındaki boşluk miktarını minimuma indirerek çimento hamuru ve dolayısıyla çimento ihtiyacını azaltmak için uzun yıllardır kullanılan yöntemlerden bir tanesidir (Fuller ve Thompson, 1907). Modifiye Andreasen ve Andersen yönteminde ise karışımın sahip olduğu en büyük ve en küçük tane boyutu göz önünde bulundurularak hedef tane boyutu dağılımı eğrisi elde edilmektedir (Fung and Dinger, 1994). Beton ve çimentolu kompozitlerde tane boyutu optimizasyonu yapılarak boşluk miktarının azaltılmasıyla hem dayanım hem dayanıklılık hem de ekonomik açılarından olumlu etkiler elde edilmesi mümkün görülmektedir.

Karışım oranlarının belirlenmesinde tane boyutu optimizasyonu yönteminin kendiliğinden yerleşen betonlar (Mueller vd. 2014) ve yüksek performanslı fiber donatılı betonlar (Yu vd., 2014; 2015-a; 2015-b) için son yıllarda çeşitli çalışmalarda kullanıldığı görülmektedir. Bununla birlikte, bu yöntemin TÇK üretimi için kullanımına literatürde rastlanmamıştır. TÇK çimento, bağlayıcı malzeme ve silis kumu olmak üzere yüksek oranda toz halinde tanecikli malzeme içermektedir. Bu toz haldeki malzemelerin karışım oranlarının belirlenmesinde tane boyutu optimizasyonu kullanılması ile daha boşluksuz yapıya sahip TÇK'nın daha az çimento kullanılarak daha ekonomik bir şekilde üretilmesinin mümkün olabileceği düşüncesi ile söz konusu yöntemin TÇK karışım oranlarının belirlenmesinde kullanılması hedeflenmiştir. Böylelikle birden fazla puzolanik malzemenin ikili veya üçlü sistemler şeklinde kullanılması da söz konusu olabilecektir.

Bu projede, modifiye Andreasen ve Andersen modeline göre tane boyutu optimizasyonu uygulayarak TÇK karışım oranlarının yeniden belirlenmesi hedeflenmiştir. Bu şekilde kompozit içindeki malzemelerin dağılımı optimize edilerek daha ekonomik, ekolojik ve kararlı bir kompozit elde edilmesi amaçlanmıştır. Tane boyutu optimizasyonu ile karışım oranları belirlenen ve yeniden tasarlanan TÇK'ların mekanik ve kendiliğinden iyileşme özellikleri araştırılmıştır.

Bu proje ile literatürde ilk defa tanecik boyut dağılımı optimizasyonu ile farklı karışım oranlarında Tasarlanmış Çimentolu Kompozitler üretilerek tane boyutu dağılımının TÇK'ların mekanik ve kendiliğinden iyileşme özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca TÇK karışımlarında uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanı gibi farklı

bağlayıcıların birlikte etkileri gözlemlenmiştir. Bunlara ek olarak, farklı boyutlarda ve atık özellikteki kuvars kumlarının da TÇK üretiminde agrega olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir. Tane boyutu optimizasyonunun TÇK'ların mekanik ve kendiliğinden iyileşme özellikleri üzerinde olumlu etkileri olduğu görülmüştür.

1.2 Amaç ve Kapsam

Bu projenin amacı, tanecik boyutu dağılımı optimizasyonunun TÇK'larda kendiliğinden iyileşme performansına etkisini incelemektir. Bu amaçla TÇK'ları oluşturan bileşenlerin karışım oranları tane boyutu dağılımı optimizasyonu ile belirlenerek daha boşluksuz ve sıkı yapıya sahip kompozitlerin üretilmesi gerçekleştirilmiştir. Üretilen kompozitlerin mekanik özellikleri ile kendiliğinden iyileşme performansları belirlenmiştir.

Bu amaç doğrultusunda;

- i. İlk olarak kendiliğinden iyileşme performansı literatür bilgisiyle sabit olan 4 farklı TÇK karışımı üretilmiştir. Literatürde sıklıkla çalışılan uçucu kül/çimento ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu/çimento oranları 1,2 ve 2,2 olan 4 karışım kontrol karışımları olarak belirlenmiştir. Yerel malzemeler kullanılarak üretilen bu kontrol karışımlarının mekanik ve kendiliğinden iyileşme özellikleri tespit edilmiştir.
- ii. Daha sonra modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen modeli ile tane boyutu dağılımı optimizasyonu yapılarak yeni karışım oranları belirlenmiştir. Tane boyutu optimizasyonu bağlayıcı olmayan bileşenlerin optimizasyonu, bağlayıcı bileşenlerin optimizasyonu ve bağlayıcı olan ve olmayan bileşenlerin birlikte optimizasyonu olmak üzere 3 farklı şekilde uygulanmıştır. Bağlayıcı olan ve olmayan bileşenlerin birlikte optimizasyonu ise bağlayıcı miktarının sabit tutulması, agrega miktarının sabit tutulması ve agrega/bağlayıcı oranının sabit tutulması olmak üzere 3 farklı şekilde tasarlanmıştır. Bu tane boyutu optimizasyonu uygulamaları ile 6 farklı TÇK karışımı tasarlanmıştır. Optimizasyon ile tasarlanan karışımların mekanik ve kendiliğinden iyileşme özellikleri belirlenmiştir.
- iii. Silis dumanının karışımların işlenebilirlik özelliklerini olumsuz etkileyebilme özelliği sebebiyle ve çok küçük tanecik yapısına sahip olması sebebiyle yukarıda bahsi geçen karışımlarda silis dumanı kullanılmamıştır. Bağlayıcı malzemelerin içerisinde silis dumanı varlığında tane boyutu optimizasyonu prosedürü ayrı olarak uygulanmış ve



optimizasyon uygulaması ile 2 farklı karışım daha tasarlanarak üretilmiştir. Bu karışımların da mekanik ve kendiliğinden iyileşme özellikleri incelenmiştir.

Sonuç olarak, proje kapsamında 4 kontrol karışımı, 2 silis dumanı içeren ve tane boyutu optimizasyonu ile tasarlanan karışım ve 6 adet silis dumanı içermeyen ve tane boyutu optimizasyonu ile üretilen karışım olmak üzere toplam 12 farklı TÇK karışımı tasarlanarak test edilmiştir.

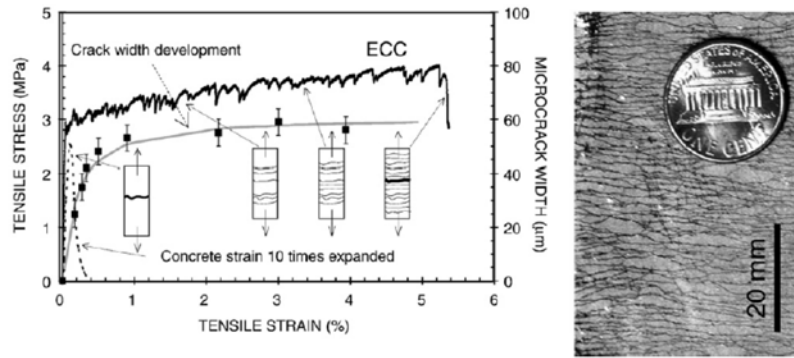
Mekanik özelliklerin belirlenmesinde 7, 28 ve 90.günlerde basınç ve 4-noktalı eğilme deneyleri uygulanmıştır. Tüm karışımların basınç dayanımları ve 4-noktalı eğilme altında eğilme dayanımı ve orta nokta sehim miktarları belirlenmiştir. Ayrıca tüm karışımların 28 gün yaşta civalı porozimetre ile sertleşmiş haldeki boşluk miktarları belirlenmiştir.

Kendiliğinden iyileşme performanslarının belirlenmesi için ise 28. günde bir grup numune sağlam bırakılmış, diğer bir grup numune ise ön yüklemeye uğratarak hasara maruz bırakılmıştır. Ön yüklemenin uygulandığı günden itibaren 15, 30, 60 ve 90. günlerde hem sağlam hem de hasarlı numuneler çeşitli testlere tabi tutularak özelliklerin gelişimi tespit edilmiş ve kendiliğinden iyileşme performansları belirlenmiştir. Tüm numunelerin 4-noktalı eğilme deneyleri ile eğilme dayanımları ve sehim kapasiteleri incelenmiştir. Ayrıca tahribatsız deney yöntemleri ile aynı yaşlarda sağlam ve hasarlı numunelerde ultrases geçiş hızı, elektriksel özdirenç değeri, kılcal su emme kapasitesi, hızlı klor iyonu geçirimsizliği değerleri de belirlenmiştir. Ön hasara uğratarak çatlak oluşturulmuş ve daha sonra kendiliğinden kapanan çatlaklardan 28+90 günde taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını spektroskopisi (EDS) ile içyapı incelemesi yapılmıştır. Yine aynı yaşta çatlak içinden kazınarak alınan toz numunelerin karakterizasyonu X-ışını kırınımı (XRD) ile gerçekleştirilmiştir. Çatlaklarda zaman içerisinde meydana gelen değişiklikler görsel olarak da takip edilmiştir.

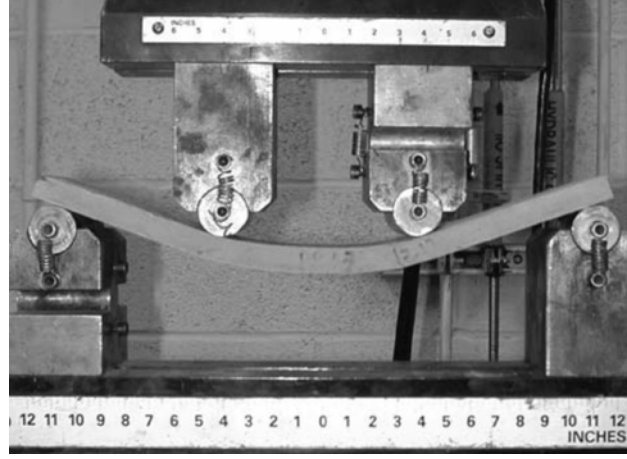
2. LİTERATÜR ÖZETİ

2.1 Tasarlanmış Çimentolu Kompozitler

Tasarlanmış çimentolu kompozitler (TÇK) çekme ve eğilme yükleri altında birim şekil değiştirme sertleşmesi gösteren sünek davranışlı lif donatılı çimentolu kompozitleri ifade etmektedir. Esas olarak TÇK, ilk zamanlarında literatürde karışım oranları ve kullanılan bileşenlerin sabit olduğu tek bir karışım olarak karşımıza çıksa da, zamanla yerel malzemelerin kullanılması, daha çevreci bir yaklaşım için yüksek miktarda atık malzeme kullanımı ve farklı bileşenlerin tasarımda kullanılması ile günümüzde şekil değiştirme sertleşmesi gösteren çimentolu kompozitler ailesini ifade etmektedir. TÇK malzemesinin mekanik özellikleri ve durabilitesi birçok araştırmacı tarafından detaylı bir şekilde incelenmiştir. TÇK'nın genel anlamda deneysel olarak belirlenmiş özellikleri ele alındığında, basınç dayanımının 30 ila 100 MPa arasında değiştiği görülmektedir. Normal yükler altında normal ve yüksek dayanımlı beton ile eşdeğer mekanik özellikler sergileyen TÇK'nın aşırı yükleme altında gösterdiği sıra dışı performansla diğer çimentolu kompozitlerden farklılaşmaktadır. TÇK aşırı yükleme altında, lif donatılı beton, lif donatılı sünek beton ve ultra yüksek dayanımlı lif-donatılı beton gibi lif donatılı çimentolu kompozitlerle kıyaslandığında bile çok daha yüksek süneklik göstermektedir (JSCE, 2008). Doğrudan tek eksenli çekme yükleri altında, Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi normal betonun yaklaşık olarak 300 ila 500 katı çekme birim şekil değiştirmesi kapasitesine sahiptir (Li, 1998; Li vd., 2001). Eğilme yükleri altında sergilediği sünek davranış ise Şekil 2.2.'de görülmektedir (Li ve Kanda, 1998; Li vd., 1994; Li, 1998).

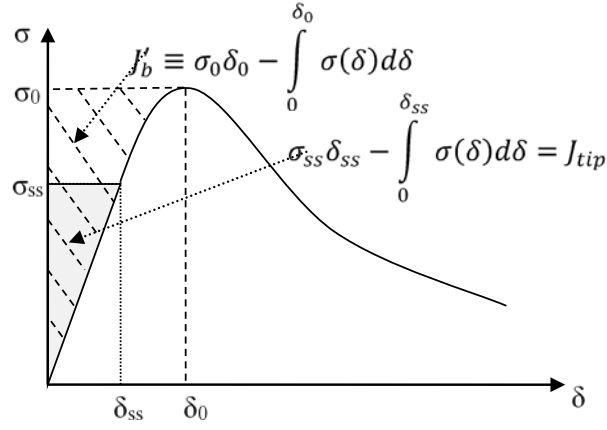


Şekil 2.1. TÇK'nın çekme yükleri altında gerileme-şekil değiştirme davranışı (Şahmaran ve Li, 2009-a)



Şekil 2.2. TÇK'nin eğilme yükleri altında davranışı (Yang ve Li, 2010)

TÇK'nın bu sünek yapısı esas olarak metalik malzemelerdeki sünek davranıştan farklı olarak, mikro mekanik tabanlı tasarım sayesinde, yükleme sırasında meydana gelen çok sayıda ve dar çatlak oluşumuyla mümkün olmaktadır. Yükleme miktarından bağımsız olarak TÇK üzerinde oluşan çatlak açıklıkları genel olarak 100 μm değerinin altında kalmaktadır. Yükleme sırasında ilk olarak matris çatlama daha sonra lifler çatlak üzerinde oluşan bu yükü köprü vazifesi görerek çatlak boyunca aktarmaktadır. Yükün artırılmasıyla ilk çatlak boyunca yük hala lifler tarafından taşınırken, matris başka bir noktadan tekrar çatlama ve ilk çatlakta olduğu gibi ikinci çatlakta da lifler yükü taşımaya devam etmektedir. Bu şekilde çoklu ve kontrollü çatlak oluşumu mekanizması şekil değiştirme sertleşmesi davranışını sağlamaktadır (Li ve Kanda, 1998). Kullanılan malzemeler açısından lif donatılı normal betona benzemesine rağmen, çoklu mikro çatlak oluşumu, dayanım ve enerji kriterleri koşullarının yerine getirilmesi gerekmektedir. Dayanım kriterine göre çoklu çatlak oluşumu ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışının gerçekleşmesi için kompozitin çatlak dayanımının (ilk çatlakın oluştuğu gerilme değeri), çatlak köprüleme dayanımından düşük olması gerekmektedir. Yani çekme yükleri altında önce matris kırılmalı, yük arttırıldığında ise çatlakın iki tarafı arasındaki yük aktarımı lifler tarafından gerçekleştirilmelidir (Li, 2003). Enerji kriterinin anlaşılabilmesi için ise Şekil 2.3'de verilen çekme gerilmesi-çatlak açıklığı ilişkisinin dikkate alınması gerekmektedir.



Şekil 2.3. Çekme gerilmesi (σ) - çatlak açıklığı (δ) eğrisi üzerinden tamamlayıcı enerji kavramının ifadesi (Yang ve Li, 2007)

Çekme gerilmesi-çatlak açıklığı ilişkisinde en önemli nokta matris ve lif arasındaki bağın kuvvetidir. Eğer matris ve lif arasındaki bağ kuvveti düşük olursa lif çok düşük kuvvetlerde bile sıyrılır ve çatlak köprüleme dayanımı (σ_0) azalır. Matris ve lif arasındaki bağın çok yüksek olması durumunda ise, gerilme altında matris ve lif birlikte hareket ederler ve liflerin kopmasıyla kritik çatlak açıklığı (δ_0) küçük olur. Her iki durumda da Şekil 2.3'de gösterilen ve tamamlayıcı enerji olarak adlandırılan taralı alanın değeri küçük kalacaktır. Li ve Leung (1992) tarafından yapılan analizler, tamamlayıcı enerjinin, çatlağın açılmasını sağlayacak, çatlak ucundaki malzemenin kırılması için gerekli olan enerjiden yani çatlak ucu tokluğundan daha büyük olması gerektiğini göstermiştir. Bu bilgiler ışığında enerji kriteri aşağıdaki gibi formüle edilmiştir:

$$J'_b \equiv \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta \geq J_{tip} \quad (2.1)$$

Burada J'_b maksimum tamamlayıcı enerjiyi ve J_{tip} çatlak ucu tokluğunu göstermektedir. Çatlak ucu tokluğu, düşük miktarda lif içeren kompozitlerde çimentolu kompozitin tokluğuna eşit kabul edilebilir. Bu durumda LDÇK de %3'ün altında lif içerdiği için denklem;

$$J'_b \equiv \sigma_0 \delta_0 - \int_0^{\delta_0} \sigma(\delta) d\delta \geq \frac{K_m^2}{E_m} \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada K_m matris kırılma tokluğunu ve E_m matris elastiklik modülünü göstermektedir (Li 1998; Lin vd. 1999; Li 2001; Li, 2002; Li vd. 2002; Yang ve Li 2007). Bu durumda dayanım ve enerji kriterlerine göre, kompozitin çatlak dayanımının, çatlak köprüleme dayanımına oranı, bununla birlikte matris kırılma tokluğunun tamamlayıcı enerjiye oranı ne

kadar düşük olursa çoklu çatlak oluşumu ve şekil değiştirme sertleşmesi davranışının elde edilmesi ihtimali yükselir (Yang ve Li, 2010). Sonuç olarak, matris kırılma tokluğunun, ilk çatlak oluşma gerilmesinin ve matris lif ara yüzündeki kimyasal bağın düşük ve fiber matris ara yüzündeki sürtünmeden kaynaklı bağın yeterince güçlü olması gerekmektedir. Bunlara ek olarak, malzemenin homojen yapısını olumsuz etkilememesi ve matris tokluğunun arttırmaması için TÇK karışımlarında iri agrega kullanılmamaktadır (Li, 1998; Wang ve Li, 2007; Li vd., 1995; Li vd., 2002). TÇK ile ilgili çalışmalarda referans olarak alınan ve standart TÇK karışımı olarak literatürde sıklıkla karşımıza çıkan karışımın bileşimi Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1. Standart TÇK karışımında bileşenlerin karışım oranları

Portland çimentosu	1
Su/ bağlayıcı	0,27
Uçucu kül	1,2
Kum/bağlayıcı	0,36
Su azaltıcı katkı (kg/m ³)	5,1
Lif (hacimce)	%2

Tablo 2.1'de de görüldüğü gibi, standart TÇK karışımında ASTM standardına göre Tip 1 portland çimentosu ve portland çimentosunun kütlece 1,2 katı F sınıfı uçucu kül kullanılmaktadır. Kum olarak ise ortalama tane boyutları 110 μm ve en büyük tane boyutu 200 μm olan silika kumu kullanılmaktadır. TÇK tasarımında lif olarak malzemenin şekil değiştirme sertleşmesi göstermesi için gerekli olan özelliklere sahip hacimce %2 oranında polivinil alkol (PVA) tipi lif kullanılmaktadır.

Standart TÇK karışımı belirli malzemelerin belirli oranlarda kullanılmasıyla üretilse de, çeşitli çalışmalarda TÇK'nın şekil değiştirme sertleşmesi göstermesini sağlayan genel tasarım özellikleri korunduğu takdirde farklı malzemeler ve karışım oranlarıyla da başarılı şekilde üretilebileceği gösterilmiştir. Örneğin, en büyük ve ortalama tane boyutu sırasıyla 200 ve 110 μm olan silika kumu kullanmak yerine, en büyük agrega çapı 1,19 ve 2,28 mm olan iki farklı boyutta kırma dolomitik kireç taşı ve iki farklı boyutta silisli dere kumu kullanılarak çok daha büyük tane boyutlarındaki ince agregalarla da başarılı bir şekilde TÇK üretilmiştir (Şahmaran vd., 2009). Çalışma sonunda agrega boyutundaki değişimin genel davranışa çok önemli ölçüde etki etmediği ve oluşabilecek sorunların uçucu kül ikamesiyle çözülebileceği gösterilmiştir. Bununla birlikte, standart TÇK karışımında agrega, bağlayıcı malzeme oranı 0,36 olarak belirlenmiş olsa da, daha yüksek oranlarda agrega içeren TÇK karışımları da, eğilme altında önemli ölçüde sehim göstermişlerdir. Bu tür karışımlarda kullanılan uçucu külün

çimentoya göre miktarı artırıldığında ise, standart karışıma eşdeğer sehim değerleri elde etmek mümkün olmuştur (Keskin, 2012).

Standart TÇK karışımında bağlayıcı malzeme olarak portland çimentosu ve portland çimentosunun 1,2 katı kadar F sınıfı uçucu kül kullanılmaktadır (Tablo 2.1). Ancak çok yüksek oranda uçucu kül ikamesiyle de, her ne kadar dayanımlarda bir miktar düşme olsa da, yüksek deformasyon kapasitesine sahip TÇK karışımları başarılı bir şekilde üretilmiştir. Bunun yanı sıra uçucu kül miktarının kontrollü çatlak açıklığının küçülmesinde faydalı olduğu ifade edilmektedir (Wand ve Li, 2007). Uçucu kül miktarının belli bir sınıra kadar artırılmasının faydalı olacağı vurgulanmıştır (Şahmaran ve Li, 2009-a). Farklı türlerde uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı gibi bağlayıcı malzemelerin de TÇK üretiminde kullanılabilirliği ve üretilen TÇK'nın özellikleri çeşitli çalışmalarda ele alınmıştır. Bununla birlikte, kireçtaşı tozu gibi malzemelerin agrega veya bağlayıcı malzemeye ikame olarak kullanılabilirliği ile ilgili çalışmalar da literatürde mevcuttur (Qian vd., 2009; Şahmaran vd., 2013; Lepech vd., 2008). Bu malzemelerin bağlayıcı olarak ikili ve üçlü sistemlerde birlikte kullanıldığı çalışmalar da literatürde yer almaktadır (Zhu vd., 2014, Siad vd., 2015). Bununla birlikte standart TÇK, mikromekanik tasarım kısıtlamalarından dolayı her ne kadar hep aynı karışım oranlarında üretilse de, üretimin yapıldığı ülkedeki yerel malzemelerin fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri dikkate alındığında, TÇK özelliklerinde ve karışımlarında farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Kullanılan malzemeler ve karışım oranları farklılık göstermesine rağmen şu ana kadar hiçbir TÇK karışımında tanecik boyut dağılımı optimizasyonu yöntemi kullanılmamıştır. Bu çalışmada, tane boyutu optimizasyonu uygulaması ile TÇK'yu oluşturan malzemelerin daha etkin kullanımı sayesinde daha ekonomik ve çevreye daha duyarlı bir kompozit oluşturulması hedeflenmiştir.

2.2 Çimentolu Kompozitlerde Kendiliğinden İyileşme

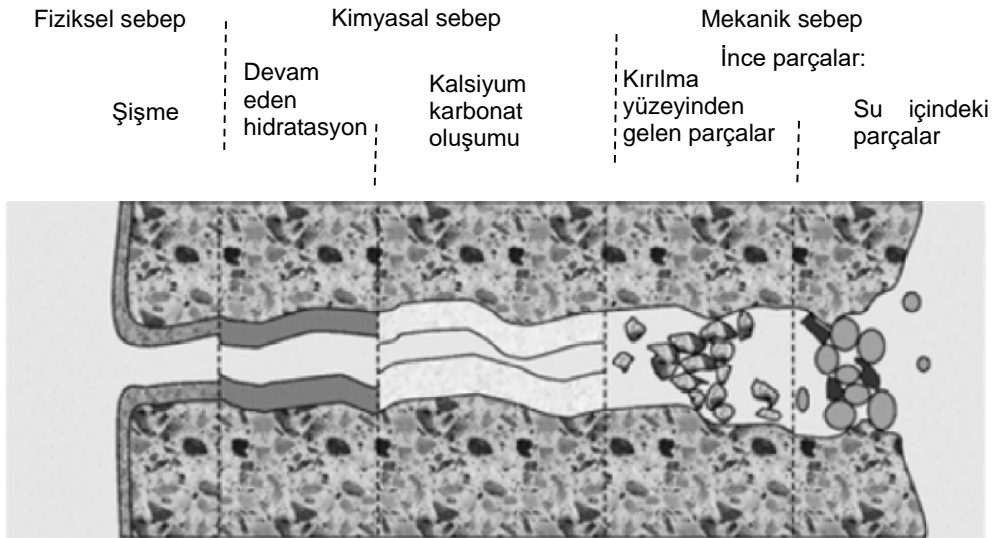
Kendiliğinden iyileşme kapasitesine sahip malzemeler, üzerlerinde oluşan hasarı zaman içinde tamir edebilme özelliği göstermektedirler. Esasen içerisinde yeterince hidrate olmamış bağlayıcı malzeme bulunan, konvansiyonel beton da dahil bütün çimentolu kompozitler bir miktar kendiliğinden iyileşme yeteneğine sahiptir. Bununla birlikte, kendiliğinden iyileşme ile betonun özelliklerini geri kazanması için sadece hidrate olmamış bağlayıcı malzeme ve kür yeterli değildir. Bu yüzden zaman içinde betonun kendiliğinden iyileşme özelliklerini iyileştirmek için birçok araştırmacı yeni yöntem ve tekniklerle karşımıza çıkmıştır. Bunlardan bazıları, beton veya çimentolu kompozitin bileşenleri arasında olmayan ama sadece kendiliğinden iyileşme özelliğinin kazandırılması amacıyla eklenen ilave bazı malzemelerin yerleştirilmesiyle

meydana getirilen tekniklerdir. Bunlar arasında içi boş lifler, kimyasal kapsülleme, bakteri esaslı iyileşme, genleşici kimyasal, şekil hafızalı malzemeler sayılabilir (Yıldırım vd., 2015-a). Bunun dışında çimentolu kompozit malzemelerde mineral katkı kullanımı ve çatlak genişliklerinin sınırlandırılması ile kendiliğinden iyileşme içsel olarak sağlanabilmektedir. İçsel kendiliğinden iyileşme bütün çimentolu kompozitler için verimli bir kendiliğinden iyileşme tekniği değildir. Bunun sebebi çimentolu kompozitlerdeki içsel kendiliğinden iyileşmenin her zaman dar çatlak açıklıkları, matrisin kimyasal kompozisyonu, çatlağın oluşum zamanı gibi birçok etkene bağlı olmasıdır. Ancak günümüzde diğer yöntemlere göre hala en kararlı kendiliğinden iyileşme yöntemi içsel kendiliğinden iyileşmedir (Li ve Herbert, 2012).

TÇK içsel kendiliğinden iyileşme bakımından mükemmel bir mekanik davranışa ve kimyasal kompozisyona sahiptir. Öncelikle TÇK'nın kendiliğinden sınırlandırılmış ve sürekli mikron mertebesinde kalan çatlak genişlikleri kendiliğinden iyileşmeye müsaittir. Burada şunu belirtmekte fayda bulunmaktadır; geniş çatlaklarda kendiliğinden iyileşme mekanizması, yeni kendiliğinden iyileşme ürünlerinin oluşması için daha geniş alana sahip oldukları ve kendiliğinden iyileşme için gerekli malzemenin çatlak içine nüfuz etmesi daha kolay olduğu için daha hızlı gelişir (Gagne ve Argouges, 2012). Ancak bu durumda çatlak malzemenin mekanik ve geçirimsizlik özelliklerini geri kazanmasına yeterli olacak miktarda kapanmayabilir. İçsel kendiliğinden iyileşme ile tamamen kapanabilecek çatlak genişliği için farklı araştırmacılar tarafından farklı öneriler ileri sürülmüştür. Jacobsen vd. (2015)'e göre içsel kendiliğinden iyileşme ile kapanabilecek en büyük çatlak açıklığı 10 µm olarak ifade edilirken Ismail vd. (2004)'e göre 53 µm, Reinhardt ve Joos (2003)'a göre ise 100 µm olarak ileri sürülmüştür. Edvardsen (1999) ve Aldea vd. (2000) ise çalışmalarında bu değerini sırasıyla 200 ve 205 µm olduğunu görmüşlerdir. Clear (1985) ise 300 µm açıklığına kadar olan çatlakların içsel kendiliğinden iyileşme ile kapanabileceğini iddia etmiştir.

Çimentolu kompozitlerde içsel kendiliğinden iyileşmenin fiziksel, kimyasal ve mekanik olmak üzere üç temel kaynağı bulunmaktadır. Fiziksel, kimyasal ve mekanik olarak isimlendirilen bu üç mekanizma Şekil 2.4'de şematik olarak açıklanmaktadır. Fiziksel olarak çatlaklar hidrate olmuş çimento hamurunun şişmesi ve bileşenleri arasındaki boşluğa suyu çekmesi ile kapanabilir. Ancak bu etki oldukça sınırlıdır ve bu şekilde bir kapanma ile çatlaktan sıvı akışı ancak %10 oranında azaltılabilir (Reinhardt vd., 2013). Kimyasal olarak ise devam eden hidrasyon ve kalsiyum karbonat oluşumu ile çatlaklar kapanabilir. Devam eden hidrasyon, hidrate olmamış bağlayıcı bileşenlerin su varlığında hidrate olmasıyla gerçekleşir. Ancak tek başına devam eden hidrasyon etkisiyle çatlak iyileşmesi pek mümkün değildir. Etkili bir kendiliğinden iyileşme, şişme ve devam eden hidrasyon mekanizmalarınının 100 µm altındaki genişliklere sahip çatlaklara birlikte etki etmesiyle mümkündür. Kalsiyum karbonat oluşumu

kendisini çatlak kenarlarında beyaz izler şeklinde gösterir. Bu izler çatlaklardaki hidratasyon ürünlerinden süzülen kalsiyum iyonları ile su ve atmosferik karbondioksitin reaksiyonu sonucu oluşan bikarbonat ve karbonat iyonlarının birleşmesinden meydana gelmektedir. Ayrıca kalsiyum hidroksitin doğrudan karbondioksit ile temas ederek karbonatlaşması da çatlaklardaki kapanmaya katkı sağlayabilir. Kalsiyum karbonat oluşum hızı, sıcaklık, reaksiyona girenlerin konsantrasyonu, boşluk çözeltisinin pH değeri gibi birçok parametreye bağlıdır (Edvardsen, 1999). Devam eden hidratasyon kendiliğinden iyileşmede ancak erken yaşlardaki betonda etkili olabilirken, özellikle ileri yaşlarda karbonatlaşma belirli çatlak açıklıklarının tıkanarak kapanmasında daha etkindir (Lepech ve Li, 2009). Bununla birlikte, düşük bir olasılık dahilinde kırılma yüzeyinden ayrılan veya su içerisinde bulunan ince malzemelerle çatlakların mekanik olarak tıkanmaları da mümkündür. Genel olarak içsel kendiliğinden iyileşme performansı üzerine hem devam eden hidratasyon mekanizması hem de kalsiyum karbonat oluşumu etkili olmasına rağmen, iletim özelliklerinin geri kazanılmasında karbonatlaşmanın, mekanik özelliklerin geri kazanılmasında devam eden hidratasyonun daha etkili olma olasılığı yüksektir.



Şekil 2.4. Çimentolu kompozitlerde içsel kendiliğinden iyileşme mekanizmaları (Reinhardt vd., 2013)

Literatürdeki birçok çalışmada çeşitli TÇK karışımlarının değişik şartlar altında kendiliğinden iyileşme özellikleri ele alınmıştır. Bu çalışmalardan birinde çeşitli miktarlarda ön deformasyona uğratılmış standart TÇK numunelerinin iletkenlik katsayısı zamana bağlı olarak belirlenmiş ve zamanla kendiliğinden iyileşme sayesinde katsayının sürekli olarak düştüğü ve ilk uygulanan deformasyondan bağımsız olarak yaklaşık 60 günlük bir süre sonunda sabitlendiği görülmüştür. Ayrıca görsel olarak da çatlaklarda beyaz kalıntılar halinde karbonatlaşma

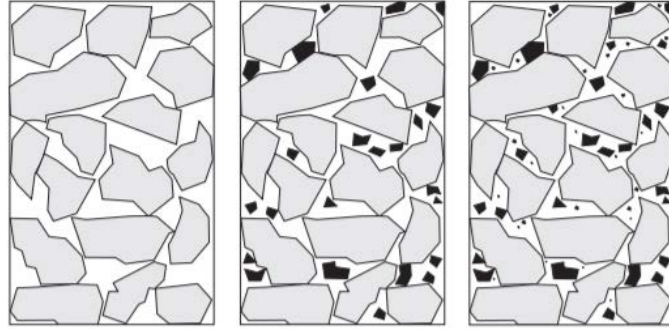
belirlenmiştir (Lepech ve Li, 2009). Yang vd. (2009) da bu şekilde 50 μm altındaki çatlak genişlikleri için iletkenlik özelliklerinin kendiliğinden iyileşme ile tamamen hasarsız numuneler seviyesine çıkabileceğini göstermiştir. Özbay vd. (2013-a) iki farklı oranda uçucu kül içeren TÇK karışımlarının kendiliğinden iyileşme özelliklerini hızlı klor iyonu geçirgenliği testi yardımıyla incelemiş ve daha fazla uçucu kül içeren karışımın daha dar çatlak açıklıklarına sahip olması ve daha çok hidrate olmamış bağlayıcı içermesi sebebiyle daha iyi kendiliğinden iyileşme performansı gösterdiğini belirlemiştir. Kendiliğinden iyileşmenin ise çatlaklarda oluşan C-S-H jeli ve kalsiyum karbonat vasıtasıyla oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Başka bir çalışmada (Şahmaran vd., 2013) ise F-sınıfı uçucu kül, C-sınıfı uçucu kül ve cüruf içeren TÇK karışımları ele alınmış ve her bir karışım için sırasıyla 30, 50 ve 100 μm çatlak genişliğinin tamamen kapanmasının mümkün olduğu belirlenmiştir. Bu çalışmanın önemli bir sonucu da cüruf içeren TÇK karışımında kendiliğinden iyileşmenin daha çok kalsit oluşumu ile mümkünken, uçucu kül içeren karışımlarda hem C-S-H jeli hem de kalsit oluşumunun birlikte kendiliğinden iyileşmeyi sağladığının vurgulanmasıdır. Mekanik yükleme altında da kendiliğinden iyileşmenin etkisini incelemek mümkündür. Doğrudan çekme altında %3'e kadar yüksek oranlarda birim deformasyona uğratarak çatlatılmış TÇK numunelerinde, kendiliğinden iyileşme sonrasında tekrar yüklendiğinde %3'e kadar birim deformasyon değerlerine yeniden ulaşılabilmiştir (Yang vd., 2009). Başka çalışmalarda ağır NaCl etkisi altında bir anlamda deniz ortamında bile TÇK'da kendiliğinden iyileşme mekanizmasının verimli bir şekilde çalıştığı gösterilmiştir. Doğrudan çekme yükleri altında test edilen numunelerde elastik rijitlik ve çekme altındaki birim deformasyon değerlerinde önemli ölçüde iyileşme sağlanmıştır (Li ve Li, 2011; Şahmaran ve Li, 2007). Aynı şekilde alkali ortamda da TÇK'nın kendiliğinden iyileşme performansı doğrudan çekme altında elastik rijitliğin tamamen geri kazanılmasını sağlasa da, NaOH etkisiyle lif-matis arayüzündeki bozulma sebebiyle zamanla çekme dayanımı değerlerinde hem sağlam hem de çatlaklı numunelerde azalma gözlenmiştir (Şahmaran ve Li, 2008).

Doğrudan çekme altında olduğu gibi, eğilme altında da TÇK'nın kendiliğinden iyileşme davranışı belirlenmektedir. Genellikle değerlendirme dört noktalı eğilme düzeneği kullanılarak, sehim kapasitesi ve rijitlik dikkate alınarak yapılmaktadır. Genel olarak, TÇK'da ön yükleme yaşının erken olması, su altında kütleme gibi etkenler daha iyi bir kendiliğinden iyileşme performansına imkan vermektedir (Qian vd., 2010). Diğer taraftan, ön yükleme ile çatlak oluşturduktan sonra numunenin sürekli olarak yük altında tutulması, yükün kaldırıldığı durumda çatlak genişliğinin büyük ölçüde tekrar daralması nedeniyle, kendiliğinden iyileşme performansını olumsuz etkilemektedir (Özbay vd., 2013-b). Buna rağmen kalıcı eğilme yüklerinin sürekli olarak arttırılması her ne kadar kendiliğinden iyileşme performansını etkilese de, yine de numuneler yeniden yükleme sırasında önemli ölçüde sehim göstermektedir (Yıldırım vd., 2015-b).

Bu çalışmada tane boyutu optimizasyonu yöntemi ile tasarlanan ve daha sıkı yapıya sahip çeşitli TÇK karışımlarının mekanik özelliklerinin yanında kendiliğinden iyileşme performansları da incelenmiştir.

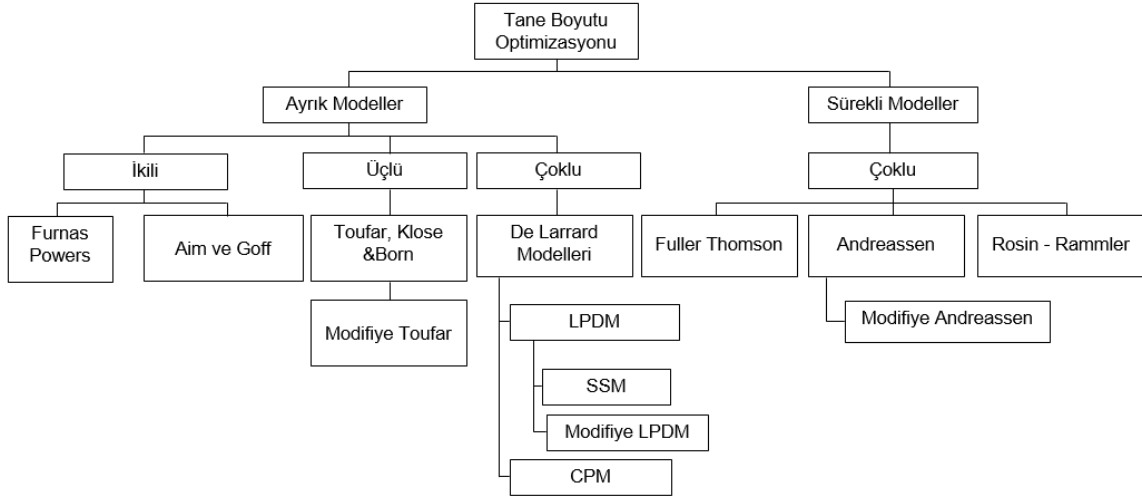
2.3 Tane Boyutu Optimizasyonu

Taneciklerden oluşan kuru malzemelerin aralarında bulunan toplam boşluk miktarının en aza indirilmesi tane boyutu optimizasyonu ile mümkündür. İri tanelerin arasını daha ince taneciklerin doldurması ile hacim içerisindeki toplam boşluk miktarı düşürülebilir, böylece daha sıkı ve yoğun bir yapı elde edilebilir (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Taneler arasındaki boşluk miktarının azaltılması (Andersen ve Johansen, 1991)

Literatürde tane boyutu optimizasyonu ile ilgili birçok farklı model bulunmaktadır. Bu modellerin sınıflandırılması Şekil 2.6'da görülmektedir. Ayrık ve sürekli modeller olmak üzere iki ana sınıfa ayrılan tane boyutu optimizasyonu modellerin genel amacı, iri taneler arasındaki boşlukların doldurulması için uygun boyuttaki tanelerin miktarını tespit etmektir (Kumar ve Santhanam, 2013).



Şekil 2.6. Tane boyutu optimizasyonu modelleri (Kumar and Santhanam, 2003)

Ayrık modeller esas olarak tek boyuttaki parçacıklarından oluşan iki veya daha fazla malzemenin optimizasyonuna uygundur. Bu tip modellerde, en iri tanelere sahip malzeme temel olarak kabul edilir ve boşluklar daha ince tanecikli malzeme ile doldurulmaya çalışılır. Daha sonra, ortamda kalan boşluklar daha da ince malzemeler ile doldurulur ve bu şekilde en sıkı yapıya ulaşılması hedeflenir (Dinger ve Funk, 1997).

Öte yandan, tek bir boyut yerine tüm boyutlarda tanelere sahip olan malzemeler için ise sürekli modeller geliştirilmiştir (Kumar ve Santhanam, 2003). Örneğin, beton agregalarında optimum tane boyutu dağılımının belirlenmesi için Fuller ve Thomson eğrisi uzun zamandır kullanılan bir optimizasyon metodudur ve denklem (2.3)'de verilen formüle göre belirlenir (Fuller ve Thompson, 1907).

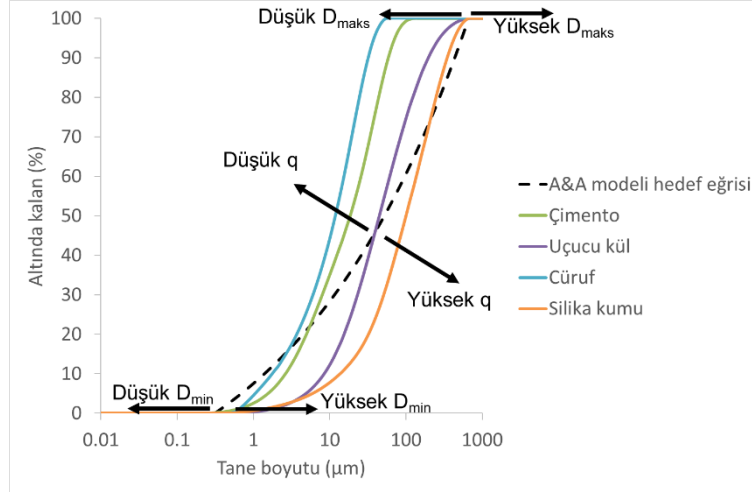
$$P(D) = \left(\frac{D}{D_{maks}} \right)^q \quad (2.3)$$

Denklem (2.3)'de $P(D)$ boyutu D 'den küçük olan taneciklerin toplam malzeme içerisindeki oranını, D_{maks} en büyük tane çapını, q ise dağılım modülünü ifade etmektedir. Talbot and Richard (1923) Fuller eğrisi için dağılım modülünü 0,5 olarak önermişlerdir. Andreasen ve Andersen (1930), ise sabit bir q dağılım modülü yerine 0,33 ile 0,5 aralığında deneysel olarak belirlenen bir değer olması gerektiğini ileri sürmüşlerdir.

Bu projede kullanılan modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen modeli ise sadece en büyük tane boyutunu değil aynı zamanda en küçük tane boyutunu da dikkate alarak en uygun tane boyutu dağılımını belirlemektedir. Funk ve Dinger (1994)'in önerdiği modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen denklemi aşağıda verilmiştir:

$$P(D) = \frac{D^q - D_{min}^q}{D_{maks}^q - D_{min}^q} \quad (2.4)$$

Denklem (2.4)'de $P(D)$; D boyutundan daha küçük olan taneciklerin toplam katı malzeme içindeki oranını, D_{min} minimum tane boyutunu, D_{maks} en büyük tane boyutunu ve q ise dağılım modülünü ifade etmektedir. Dağılım modülünün aldığı farklı değerler toplam karışım içerisindeki ince ve iri malzemelerin birbirlerine oranını belirlemektedir. Bu sayede farklı amaçlar için farklı dağılım modülü kullanarak, belirli bir amaca uygun beton tasarımı yapmak mümkündür. Bu denklemde minimum tane boyutu sıfır ve dağılım modülü 0,5 olarak kabul edildiğinde, denklem betonda agrega dağılımını optimize etmekte kullanılan Fuller Thomson modeline (Denklem 2.3) dönüşmektedir. Literatürde çimentolu sistemlere uygun q dağılım modülünün değeri ile ilgili çeşitli öneriler bulunmaktadır. Kendiliğinden yerleşen beton için Hunger (2010) dağılım modülünün 0,22 -0,25 arasında olmasını önerirken, Mueller vd. (2014) 0,27 değerinin düşük toz malzeme ile üretilmesi hedeflenen kendiliğinden yerleşen betonda tane dağılımı için daha uygun olduğunu ifade etmektedir. Başka bir çalışmada (Wang vd., 2014) ise dağılım modülünün 0,23-0,29 arasındaki değerlerinin uygun olduğu belirtilmektedir. Yüksek performanslı lif donatılı çimentolu kompozitler için ise 0,23 değeri kullanılmıştır (Yu vd., 2014; Yu vd., 2015-a; Yu vd., 2015-b). Dağılım modülünün sayısal değeri arttıkça karışım daha iri, azaldıkça daha ince bir karışıma dönüşür. Karışım modülü ile en büyük ve en küçük tane boyutlarının, modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen modeline göre (Denklem 2.4), tane boyutu dağılımını nasıl etkilediği Şekil 2.7'de açıklanmaktadır. Şekil 2.7'de modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen modeline göre elde edilmiş dağılım eğrisinin 2.4 denklemindeki parametrelere bağlı olarak nasıl değiştiği, çeşitli granüler malzemelerin dağılımları ile birlikte örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Modifiye Andreasen ve Andersen optimizasyon modeli parametrelerinin dağılıma etkisi

Belirlenen modele göre (bu çalışmada modifiye Andreasen ve Andersen modeli), hedef tane boyutu dağılımı belirlendikten sonra, hedef eğriye en yakın karışım için mevcut bileşenlerin hangi oranlarda karıştırılması gerektiği belirlenir. En küçük artık kareler toplamı (RSS) yöntemi ile hedef eğriye en yakın eğri belirlenebilir. Denklem 2.5’de görülen artık kareler toplamı formülünde $P_{karışım}$ karıştırılan malzemelerin, P_{hedef} ise (2.4) numaralı denklem yardımıyla belirlenen D boyutundan daha küçük malzemelerin optimum miktarını göstermektedir. En küçük artık kareler toplamını veren karışım oranları hedef eğriye en yakın sonucu vermektedir.

$$RSS = \sum_{i=1}^n \left(P_{karışım}(D_i^{1-i}) - P_{hedef}(D_1^{i-1}) \right)^2 \quad (2.5)$$

Görüldüğü üzere, tane boyutu optimizasyonu için ilk olarak uygun q dağılım modülü değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Uygun q dağılım modülü ve kullanılması planlanan malzemelere göre en küçük ve en büyük tane boyutu belirlendikten sonra, Denklem (2.4)’e göre hedef tane boyutu eğrisi elde edilir. Daha sonra ise en küçük artık kareler toplamını verecek şekilde mevcut bileşenlerin karışım oranları belirlenir. Böylece mevcut bileşenler ile en boşluksuz yapıya ulaşılabilecek şekilde toz malzemeler karıştırılabilir.

Bu projede, tane boyutu optimizasyonu 3 farklı şekilde uygulanmıştır; bağlayıcı olmayan kısmın optimizasyonu, bağlayıcı kısmın optimizasyonu ve bağlayıcı olan ve olmayan kısmın birlikte optimizasyonu. Her durum için q değeri deneysel veriler de kullanılarak ayrı olarak



belirlenmiş ve modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen modeline göre TÇK karışımlarına uygulanmıştır. Bu çalışmada optimizasyon uygulaması ile 8 farklı TÇK karışımı üretilmiştir.

Standart TÇK'larda bağlayıcı malzeme olarak uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve portland çimentosu, agrega olarak ise belirli boyuttaki silika kumu kullanılmaktadır. Bu projede bu bileşenlere ilaveten bağlayıcı olarak silis dumanı ve agrega olarak farklı boyutlardaki silika kumu ile ticari değeri olmayan ve kuvars madenlerinde atık olarak ortaya çıkan silika tozu kullanılmıştır. Tane boyutu optimizasyonu uygulamalarının tanecikler arasındaki boşluk oranının azaltılabilmesi için bu tür ince malzeme ihtiyacını artırma potansiyeli bulunmaktadır. Bu çalışma hem ticari değeri olmayan atık silika tozunun TÇK üretiminde değerlendirilebilirliği hem de puzolanik bileşenlerin TÇK içerisinde ikili ve üçlü sistemler olarak kullanılabilirliği açısından önem taşımaktadır. Böylece hem daha ekonomik hem de daha üstün özelliklere sahip TÇK'ların üretilmesi mümkün olabilecektir.

3. DENEYSEL PROGRAM

3.1 Malzeme Karakterizasyonu

TÇK üretiminde konvansiyonel beton üretiminde de kullanılan çimento, agrega, su, puzolanik malzemeler ve akışkanlaştırıcı kimyasal katkıya ilaveten lifler kullanılmaktadır. Bu projede farklı TÇK karışımlarının üretimi için bağlayıcı olarak CEM I 42,5 R tipi normal portland çimentosu, uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve silis dumanı kullanılmıştır. Bağlayıcı malzemelerin kimyasal kompozisyonları ile fiziksel özellikleri Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. TÇK üretiminde kullanılan bağlayıcı malzemelerin kimyasal kompozisyonları ve fiziksel özellikleri

	Çimento	Uçucu Kül	Cüruf	Silis Dumanı
Kimyasal Kompozisyon (%)				
SiO ₂	18,69	50,04	38,40	91,96
CaO	61,87	11,21	34,48	0,62
Al ₂ O ₃	4,74	22,85	10,96	1,20
Fe ₂ O ₃	3,37	8,02	0,81	0,84
MgO	3,36	2,23	7,14	1,02
SO ₃	2,93	0,78	1,48	0,12
K ₂ O	0,63	2,50	0,86	1,16
Na ₂ O	0,19	0,27	0,18	0,67
Fiziksel Özellikler				
Özgül Ağırlık	3,15	2,28	2,79	2,20
Blaine İnceliği (m ² /kg)	342	285	425	-

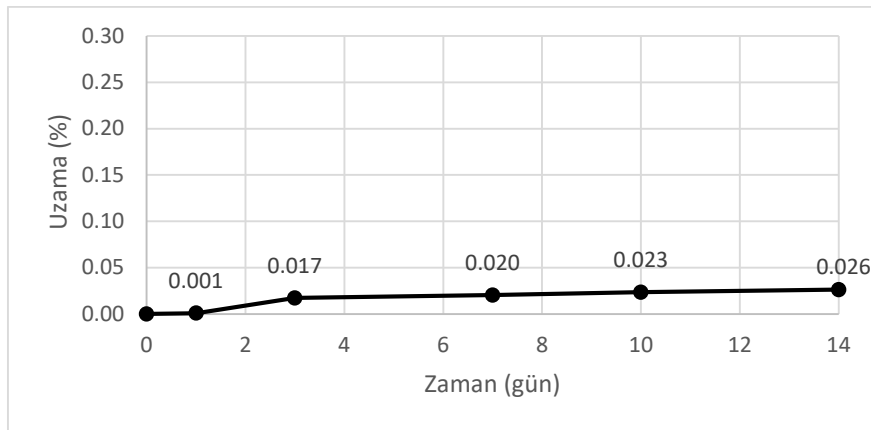
TÇK üretiminde agrega olarak ise ortalama tane çapı ve en büyük tane çapı sırasıyla 110 ve 200 µm olan silika kumu kullanılmaktadır. Optimizasyon uygulamasında farklı boyuttaki tanelerin bir araya getirilerek boşluk miktarının en aza indirilmesi amaçlanmaktadır. Bu sebeple, bu projede 0-45µm, 0-200 µm (standart TÇK karışımında kullanılan boyuta uygun) ve 100-300 µm olmak üzere üç farklı boyut ve tane dağılımına sahip kuvars agregaları ile ticari değeri olmayan ve 0-70 µm aralığında tanımlanan atık kuvars tozu kullanılmıştır. Projenin başlangıç aşamasında toz malzeme olarak mermer atığının da kullanılması planlanmıştır. Fakat yapılan çalışmalarda mermer parçalarının topaklandığı, işlenebilirliği olumsuz etkilediği ve zayıf bölgeler oluşturduğu, bunun da çatlak lokalizasyonuna ve deformasyon kapasitesinin düşmesine yol açtığı görülmüş ve TÇK üretiminde kullanılmasının uygun olmadığı sonucuna

varılmıştır. Projede kullanılan silika kumları ile atık kuvars tozunun kimyasal kompozisyonları ve özgül ağırlıkları Tablo 3.2’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. TÇK üretiminde kullanılan agregaların kimyasal kompozisyonları

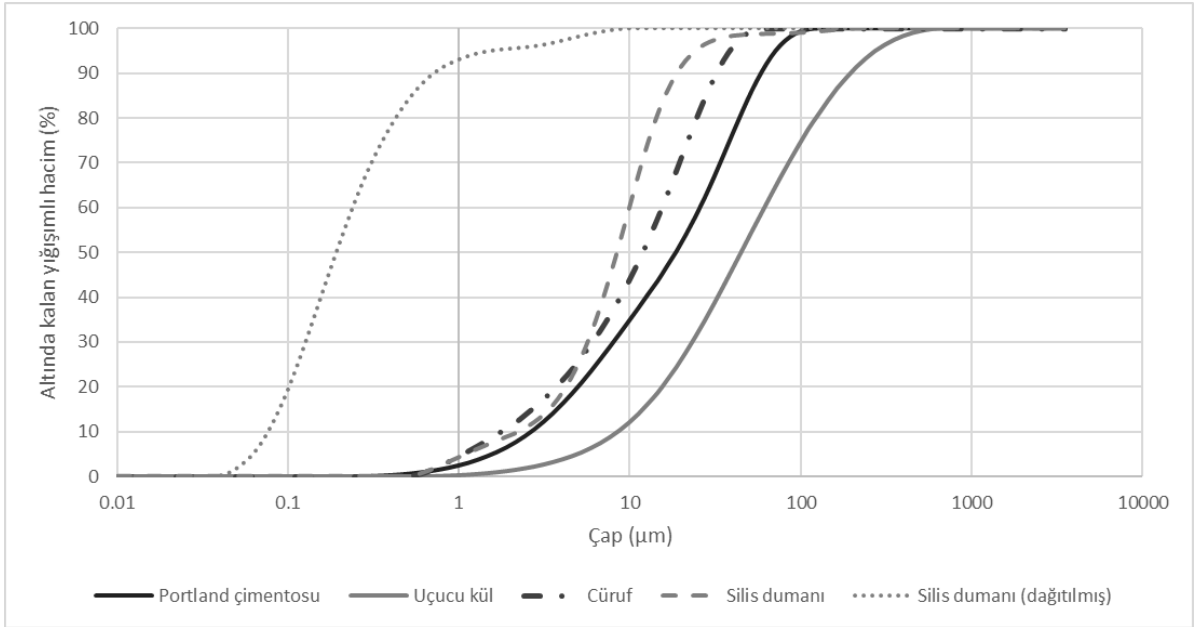
	Kuvars Kumu	Atık Kuvars Tozu
	Kimyasal Kompozisyon (%)	
SiO ₂	99,37	91,98
CaO	0,14	0,12
Al ₂ O ₃	0,16	4,94
Fe ₂ O ₃	0,028	0,08
MgO	-	0,02
SO ₃	-	-
K ₂ O	0,03	0,04
Na ₂ O	0,03	2,77
Fiziksel Özellikler		
Özgül Ağırlık	2,60	2,60

Görüldüğü gibi atık kuvars tozunun silis içeriği ticari değeri olan silis kumlarına göre daha düşük, alkali ve alüminyum oksit içeriği ise daha yüksektir. Atık kuvarsın kimyasal kompozisyonundaki yüksek alkali muhtevası nedeniyle, potansiyel olarak alkali silis reaksiyonu oluşabileceği düşünülmüş, bu nedenle harç çubukları hazırlanarak ASTM C1260 (2014) standardına göre alkali silis reaktivitesi test edilmiştir. Ancak kullanılan atık kuvars tamamen toz halinde olduğu için agrega gradasyonu standartta belirtilenden farklı olarak harç çubukları, kumun gradasyonu değiştirilmeden hazırlanmıştır. Şekil 3.1’de atık kuvars kumu kullanılarak üretilen harç çubuklarının boylarının zamana göre değişimi gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, kullanılan atık kuvars kumu alkali silis bakımından zararlı reaksiyon göstermemektedir.



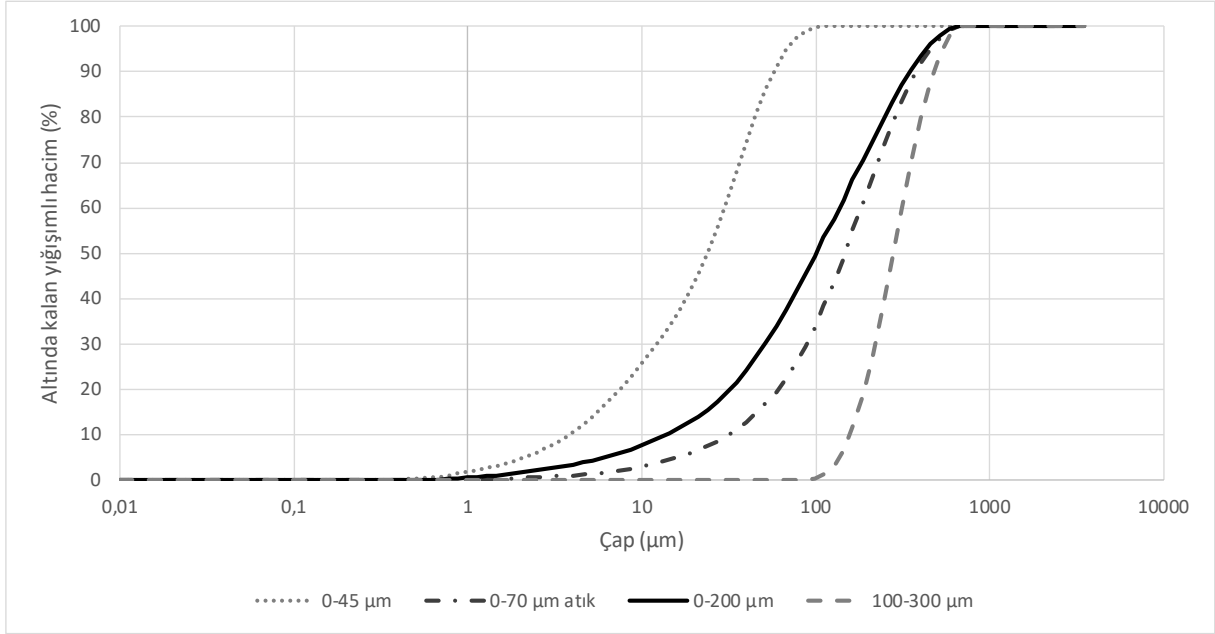
Şekil 3.1. Atık kuvars ile üretilen harç çubuklarının boy değişimi

Tane boyutu optimizasyonu yapılarak toz tanecikler arasındaki boşluk miktarının azaltılıp daha boşluksuz yapıya sahip TÇK'lar üretilmesi projenin asıl amaçlarından birisidir. Tanecik boyutu optimizasyonunun uygulanabilmesi için çalışmada kullanılması planlanan tüm toz malzemelerin tane boyutu dağılımlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm toz malzemelerin tane boyutu dağılımları lazer kırınımı yöntemi ile elde edilmiştir. Tüm toz malzemelerin gradasyon eğrileri Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'de sırasıyla bağlayıcı malzemeler ve bağlayıcı olmayan malzemeler için ayrı ayrı verilmiştir.



Şekil 3.2. TÇK karışımlarında kullanılan bağlayıcı malzemelerin tane boyutu dağılımları

Silis dumanı doğal haliyle çok ince bir malzeme olduğu için, taneleri kümelenmiş olarak bulunmaktadır. Lazer kırınımı yöntemiyle doğrudan tanecik boyut dağılımı belirlendiğinde silis dumanı tanecikleri bir arada buldukları için, taneler olduklarından daha büyük bir çapa sahipmiş gibi bir dağılım elde edilmektedir (Diamond ve Sahu, 2006). Bu nedenle silis dumanının doğrudan temin edilmiş haliyle tanecik boyut dağılımı belirlendikten sonra, silis dumanı tanelerinin uygulanabilir seviyede mümkün olan gerçeğe en yakın dağılımını elde etmek amacıyla 250 W gücündeki ultrasonik dağıtıcıda, %40 gücünde 10 dakika ultrasonik işlem uygulandıktan sonra tanecik boyut dağılımı belirlenmiştir. Tane boyutu optimizasyonu yapılırken silis dumanının dağıtılmış hali dikkate alınmıştır ve dökümler sırasında silis dumanı bir miktar karışım suyu içerisinde ultrasonik dağıtım uygulanarak kullanılmıştır.



Şekil 3.3. TÇK karışımlarında kullanılan bağlayıcı olmayan malzemelerin tane boyutu dağılımları

Projede üretilen tüm karışımlarda istenilen işlenebilirlik özelliklerini sağlamak için %40 katı madde oranına sahip polikarboksilik eter esaslı yüksek oranda su azaltıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Tüm TÇK karışımları yüzeyleri ağırlıkça %1,2 oranında su itici yağ ile kaplanmış polivinil alkol (PVA) lif içermektedir. PVA liflerin özellikleri Tablo 3.3’de listelenmiştir.

Tablo 3.3. PVA liflerin özellikleri

Özellik	Değer
Çap (µm)	39
Boy (mm)	8
Nominal Dayanım (MPa)	1620
Görünür Dayanım (MPa)	1092
Elastisite Modülü (GPa)	42,8
Uzama Miktarı (%)	6
Yoğunluk (kg/m ³)	1300
Erime Sıcaklığı (°C)	230

3.2 Standart Tasarlanmış Çimentolu Kompozit Karışımları

Proje kapsamında öncelikli olarak literatürde sıklıkla karşılaşılan 4 adet TÇK karışımının tasarlanması ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu dört karışım sırasıyla uçucu kül/çimento oranları 1,2 ve 2,2 olan bağlayıcı olarak çimentonun yanı sıra uçucu kül içeren karışım ve cüruf/çimento oranı sırasıyla 1,2 ve 2,2 olan bağlayıcı olarak çimentoya ilave olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren karışımlardır. Bu 4 farklı TÇK karışımı için karışım oranları Tablo 2.1’de verilen su/bağlayıcı ve kum/bağlayıcı oranlarına göre hesaplanarak Tablo 3.4’de verilmiştir. Karışımlarda kullanılan su azaltıcı katkı miktarına karışım oranlarının hesaplanmasından sonra bir deneme dökümü yapılarak deneysel olarak karar verilmektedir.

Tablo 3.4. Standart TÇK karışım oranları

Karışım oranları (kg/m ³)	Karışım kodu			
	F 1.2	F 2.2	S 1.2	S 2.2
Çimento	560	377	592	405
Uçucu kül	672	830	-	-
Cüruf	-	-	711	890
Su	333	326	352	350
PVA lif	26	26	26	26
Kuvars kumu (0-200 µm)	442	435	469	466

3.3 Silis Dumanı İçermeyen Karışımlar İçin Tane Boyutu Optimizasyonu

Proje kapsamında tane boyutu optimizasyonu uygulaması ile toplam sekiz adet farklı karışıma sahip TÇK üretilmiştir. Bu 8 karışımdan 2 tanesi silis dumanı içerirken diğerleri içermemektedir. Silis dumanının beton karışımlarında özellikle işlenebilirliğe etkileri sebebiyle kullanım miktarının kısıtlı olması ve en küçük tane boyutunun diğer bağlayıcılara kıyasla oldukça küçük olması sebepleri ile silis dumanı ayrı olarak ele alınmış ve silis dumanı içeren karışımlara optimizasyon ayrı olarak uygulanmıştır. Bu bölümde öncelikle bağlayıcı olarak silis dumanı kullanılmadan yapılan optimizasyon uygulaması açıklanmış, silis dumanı kullanılarak yapılan optimizasyon uygulaması ise ayrı bir alt başlık (3.4) altında detaylandırılmıştır.

Tane boyutu optimizasyonu için denklem (2.4)’de verilen modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen modeli, hedef tane boyutu dağılımı eğrisinin belirlenmesinde kullanılmıştır. Literatürde yer alan çalışmalara göre dağılım modülü değerinin karışım içerisindeki ince ve iri malzemelerin birbirlerine oranını belirlediği görülmektedir. Şekil 2.7’de de açıklandığı gibi, genel olarak, yüksek dağılım modülü kullanıldığında karışımı oluşturan malzemelerin iri, düşük

dağılım modülü kullanıldığında ise ince olduğu çeşitli çalışmalarda belirtilmektedir. Toz halindeki malzemelerin çok olduğu kendiliğinden yerleşen beton ve yüksek performanslı betonlar için 0,23 değerinin kullanıldığı literatürde rapor edilmektedir. Modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen modeline uygun olarak hedef tane boyutu dağılımı belirlendikten sonra, mevcut bileşenlerle en küçük artık kareler (RSS) toplamı yöntemi kullanılarak (denklem 2.5) hedeflenen dağılıma en yakın dağılım elde edilmeye çalışılmıştır. TÇK tasarımında tane boyutu optimizasyonu, agregaların ve bağlayıcı malzemelerin ayrı ve birlikte değerlendirilmesi ile 3 farklı şekilde uygulanmıştır.

Optimizasyon çalışmaları sırasında bağlayıcı malzeme ve agregaların ayrı ayrı optimizasyonu için dağılım modülü başlangıç değeri 0,23 alınarak, en uygun dağılım modülü değerinin belirlenmesi planlanmıştır. Bağlayıcı ve agregaların birlikte optimizasyonu için ise 0,23 değerinin literatürden alınan bilgiler ışığında uygun olacağı düşünülmüştür. Ancak yapılan optimizasyon çalışmaları ve ardından gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonunda literatürdeki değerlerin TÇK için uygun olmadığı ortaya çıkmıştır. Toz malzeme karışımlarının mümkün olan en sıkı yapıda dizilip dizilmediklerini değerlendirmek için Yu vd. (2014) tarafından kullanılan hesaplama yönteminin kullanılması için deneysel bir yöntem geliştirilmiştir. Bu deney yönteminde, ağırlıkları ve hacimleri bilinen toz malzemeler karıştırıldıktan sonra hacim ölçümü için kullanılan bir metal kaba yerleştirilmiş, toz malzeme karışımının üzeri sabit ağırlıkla kapatıldıktan sonra 1 dakika boyunca titreşim uygulanarak toz malzemelerin sıkışması sağlanmıştır. Daha sonra, sabit ağırlık kaldırılarak karışımın kapladığı hacim hesaplanmış, elde edilen sıkıştırılmış hacim değerinden tanecikler arasındaki toplam boşluk miktarı belirlenmiştir. Optimizasyonun başarısını değerlendirmekte kullanılan bu düzenek Şekil 3.4'de görülmektedir.



a. Deney düzeneği



b. Ölçüm metodu

Şekil 3.4. Optimizasyonla elde edilen toz karışımların boşluk oranının belirlenmesi

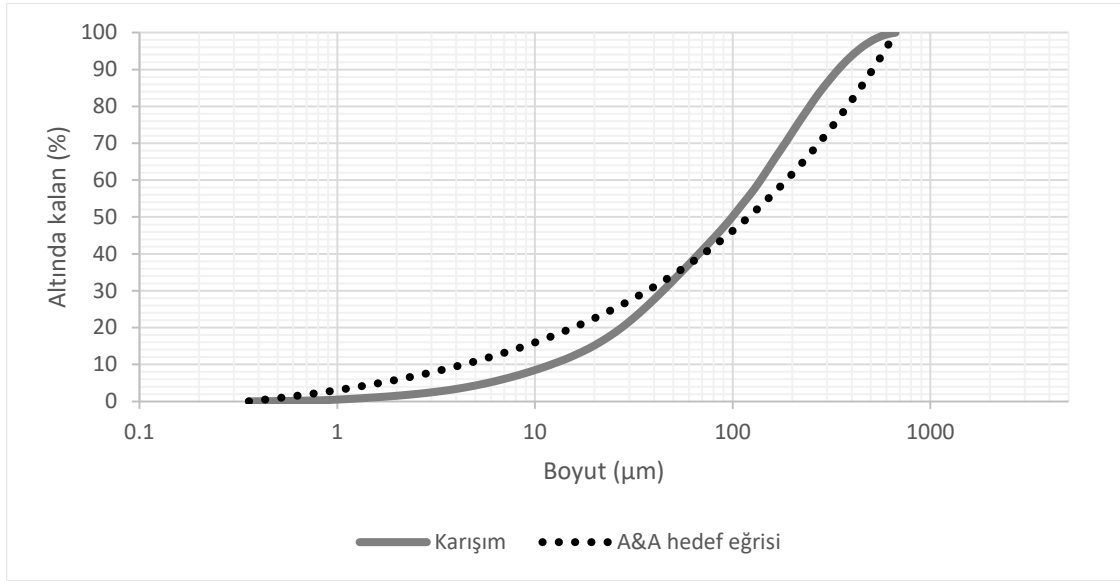
Laboratuvarda uygulanan çalışmalar sonucunda, dağılım modülü 0,23 olarak kabul edildiğinde gerçekten daha sıkı bir yapıya ulaşılamayacağına anlaşılması üzerine, optimizasyon çalışmalarına dağılım modülünün belirlenmesi ile başlanması kararlaştırılmıştır. Bütün optimizasyon çalışmaları için aşağıda açıklanan prosedür uygulanmıştır:

1. İlk olarak standart F1.2 karışımı için RSS'nin en küçük değerini veren dağılım modülü değeri belirlenmiştir. Optimizasyon ile yapılan işlem tersine çevrilerek hedeflenen eğriye uygun karışımın belirlenmesi yerine, bilinen bir karışım için en yakın hedef eğriyi sağlayan q değeri bulunmuştur. Bu değer başlangıç dağılım modülü olarak belirlenmiştir.
2. Dağılım modülünün başlangıç değeri alınarak, kullanılacak olan malzemelerin de en büyük ve en küçük tane boyutları dikkate alınarak, optimizasyonda kullanılacak hedef eğriyi belirlemek için Andreasen ve Andersen modeli (denklem (2.4)) oluşturulmuştur.
3. RSS'nin en küçük değerine ulaşarak, belirlenen modele en yakın dağılımı elde etmek amacıyla doğrusal olmayan genelleştirilmiş azaltılmış gradyanlar yöntemi ile bir optimizasyon gerçekleştirilmiştir.
4. Optimizasyon ile elde edilen karışımın taneleri arasındaki boşluk miktarı deneysel olarak belirlenmiştir (Şekil 3.4).
5. Başlangıç q değerinin altında ve üstünde farklı q değerleri ile optimizasyon denemeleri gerçekleştirilmiştir. Her bir optimizasyondan elde edilen karışımın deneysel olarak boşluk miktarları belirlenmiştir. Bu noktada q değerinin artırılması ile boşluk miktarı azalıyorsa, q değeri artırılarak; boşluk miktarı artıyorsa q değeri azaltılarak deneysel olarak mümkün olan en az boşluklu yapı elde edilmiştir. Bu sırada çok sayıda karışım test edilmiştir.
6. En düşük boşluk oranına sahip olan karışım seçilmiş ve bu karışım oranlarına uygun TÇK karışımı, optimum karışım olarak kabul edilmiştir.

Daha önce de bahsedildiği gibi, tane boyutu optimizasyonu kuru toz malzemelere uygulanmıştır. Kuru toz malzemeler, bağlayıcı olan ve olmayan bileşenler olarak sınıflandırılmış, optimizasyon yöntemi her bir gruba ayrı ayrı ve birlikte olmak üzere üç farklı şekilde uygulanmıştır. Şekil 3.5 ile Şekil 3.22 arasındaki şekillerde "karışım", optimizasyon sonucu hesaplanan toz malzeme karışımının tane boyutu dağılımını, "A&A hedef eğrisi" ise modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen modeline göre hedeflenen tane boyutu dağılımını ifade etmektedir.

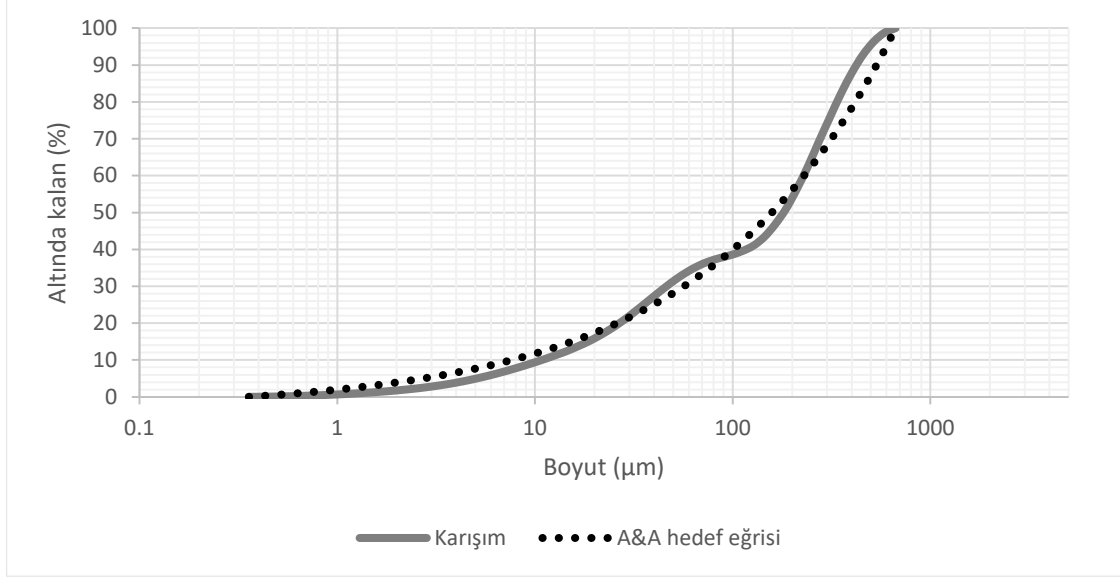
3.3.1 Agrega Optimizasyonu (i.a)

Standart TÇK tasarımında en büyük agrega boyutu 200 μm olan kuvars kumu kullanılmaktadır. Optimizasyonun bu aşamasında boyut aralıkları 0-45 μm , 0-70 μm (atık), 0-200 μm , ve 100-300 μm olan kuvars kumlarının en sıkı dizilime sahip olacağı şekilde karışım oranlarının belirlenmesi hedeflenmiştir. Başlangıç q değeri 0,37 olarak bulunmuştur. 0-200 μm kuvars kumu ile Andreasen ve Andersen modeline göre 0,37 dağılımına uygun hedef tane boyutu dağılımı eğrisi Şekil 3.5'de verilmiştir. 0-200 μm kuvars kumu ile hedef eğri arasındaki RSS değeri 2650 olarak hesaplanmıştır. 0-200 μm kuvars kumunda taneler arasında %36,1 boşluk bulunduğu deneysel olarak belirlenmiştir.



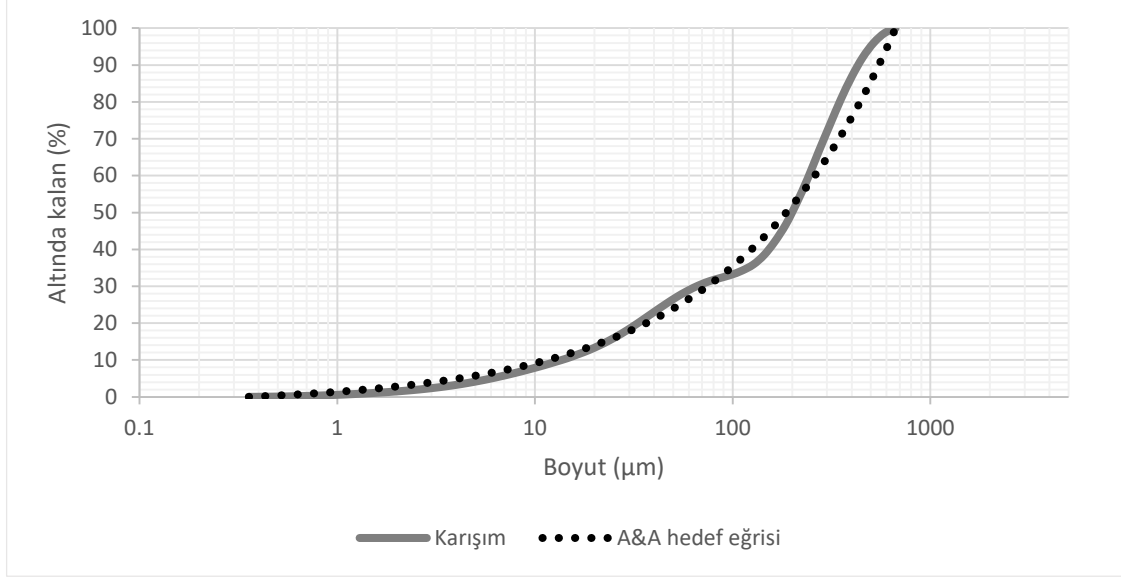
Şekil 3.5. Agrega optimizasyonu için başlangıç dağılım modülünün belirlenmesi

Belirlenen bu değerden başlanılarak, q değeri ve kullanılan kuvars kumlarının en küçük ve en büyük tane boyutları kullanılarak yapılan optimizasyonlar sonunda en düşük RSS değeri olan 638 değerine 0,45 μm , 0-200 μm ve 100-300 μm aralığındaki kuvars kumlarından sırasıyla, %33,7, %9,6 ve %56,8 hacim oranlarında kullanılmasıyla, dağılım modülü 0,46 olduğunda ulaşılmıştır. Bu optimizasyonla elde edilen karışımın ve dağılım modülüne göre belirlenen hedef eğrinin grafiği Şekil 3.6'da verilmektedir.



Şekil 3.6. Agrega optimizasyonu için en düşük RSS değerinin belirlenmesi

Bu karışımın hazırlandıktan sonra deneysel olarak taneler arası boşluk miktarı %32,5 olarak belirlenmiştir. Buradan da anlaşılacağı üzere optimizasyon ile daha sıkı bir dağılıma ulaşma hedefi başarılı olmuştur. Ancak, optimizasyon ile minimum RSS değerine ulaşılmış olmasına rağmen, optimizasyonun temel hedefinin deneysel olarak elde edilebilecek en düşük boşluk miktarına ulaşmak olduğu düşünülerek, farklı q değerleri için de deneysel olarak boşluk miktarı belirlenmiştir. Bu aşamada yapılan çalışmalar sonrasında, her ne kadar RSS değeri 691,9 olarak belirlense de dağılım modülünün 0,53 değeri için deneysel olarak %29,5 boşluk oranına inilebilmiştir. Yapılan optimizasyon ile 0,45 µm, 0-200 µm ve 100-300 µm aralığındaki kuvars kumlarından sırasıyla, %27,2 %11,7 ve %61,1 hacim oranlarında kullanılması gerektiği belirlenmiştir. Bu optimizasyonla elde edilen karışımın ve dağılım modülüne göre belirlenen hedef eğrinin grafiği Şekil 3.7'de verilmektedir.

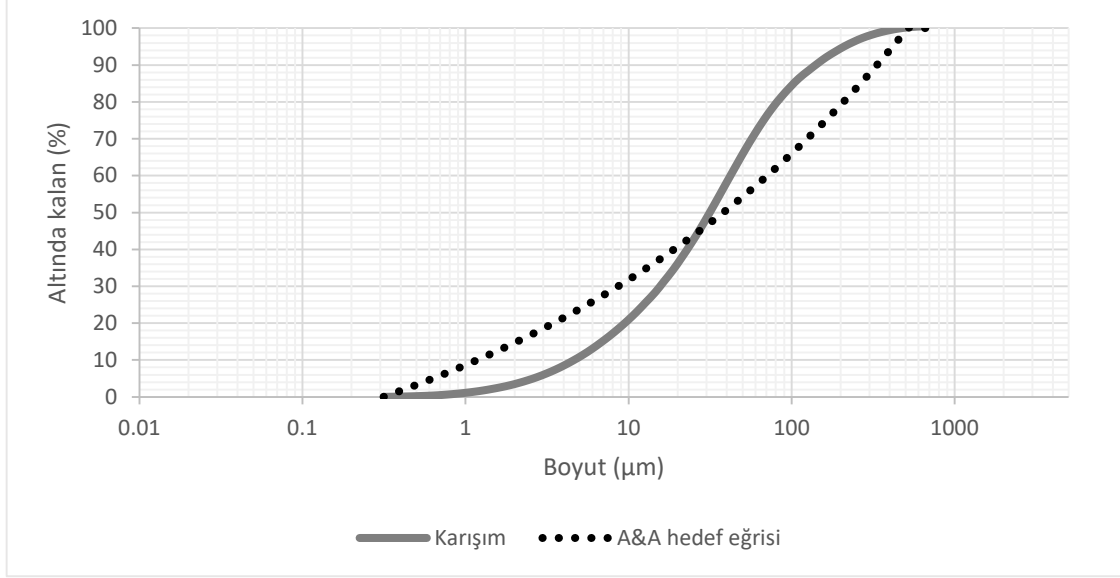


Şekil 3.7. Agrega optimizasyonu için en düşük boşluk hacminin belirlenmesi

3.3.2 Bağlayıcı Optimizasyonu (i.b)

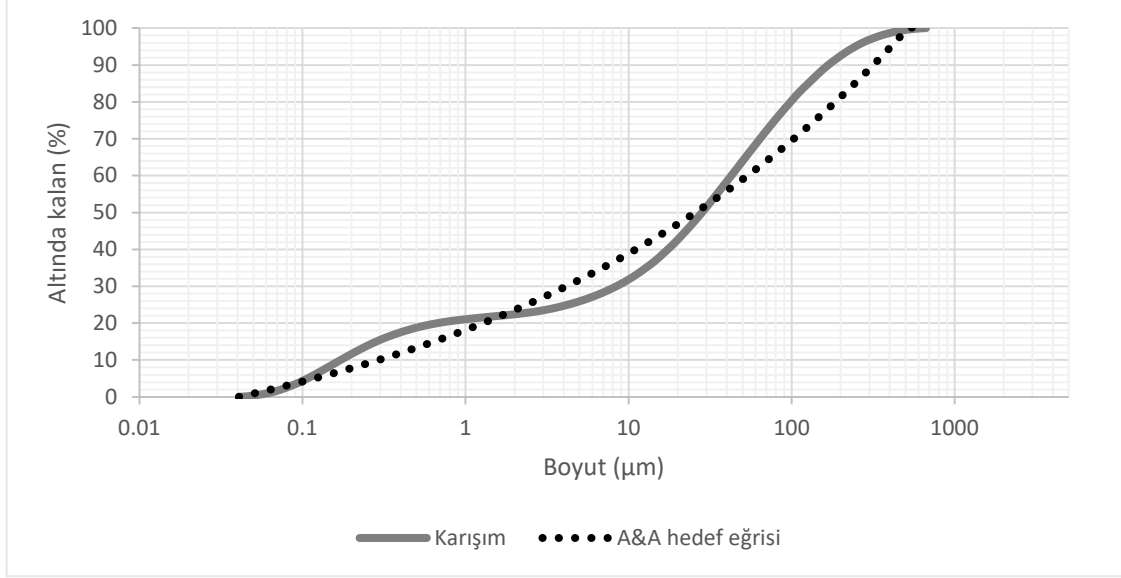
Bağlayıcı malzemelerin optimizasyonu sırasında portland çimentosu, uçucu kül, silis dumanı ve öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu tane boyutu dağılımlarına göre optimizasyona katılarak mümkün olan en sıkı bağlayıcı yapısı elde edilmeye çalışılmıştır.

F1.2 karışımı dikkate alındığından 6773 RSS değerine tekabül eden başlangıç dağılım modülü 0,17 olarak belirlenmiştir. İlgili karışım ve hedef eğrileri Şekil 3.8'de verilmiştir. F1.2 karışımının bağlayıcı kısmı için boşluk miktarı deneysel olarak %47,2 olarak belirlenmiştir.



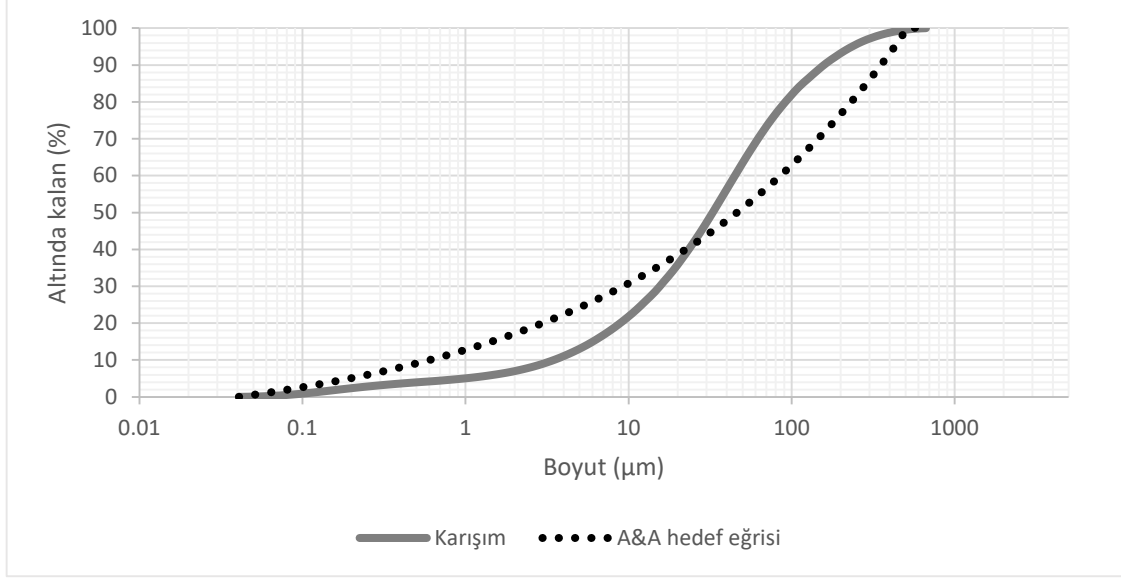
Şekil 3.8. Bağlayıcı malzemeler için başlangıç dağılım modülünün belirlenmesi

Ancak F1.2 karışımı dikkate alınarak elde edilen başlangıç dağılım modülü değerleriyle yapılan ilk optimizasyonlarda en iyi dağılım için sadece uçucu kül ve silis dumanının karıştırılması gerektiği ortaya çıkmış, portland çimentosu ve cüruf ise karışımda yer almamıştır. Bu karışım için dağılım modülü 0,17, RSS değeri ise 2461 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.9'da görüleceği üzere hedef eğriye kontrol karışımlarına göre oldukça yaklaşmıştır. Ancak, çimento içermeyen bir karışımdan dayanım elde edilemeyeceği ve yüksek miktarda silis dumanı içeren karışımlarda ise taze halde işlenebilirlik ve lif dağılımı sorunları, sertleşmiş halde ise matris kırılma tokluğundaki artış dolayısıyla çoklu çatlak davranışında sorunlar oluşacağı öngörülmüştür. Bu sorunları ortadan kaldırmak için, çimento miktarının toplam bağlayıcı hacminin %24,8'inden (F2.2 karışımdan belirlenen) az, toplam toz malzeme hacminin %34,2'sinden (F 0.8 karışımından belirlenen) fazla olmaması; silis dumanı miktarının ise toplam bağlayıcı ağırlığının %10'undan fazla olmaması için sınır koşulları tanımlanmıştır.



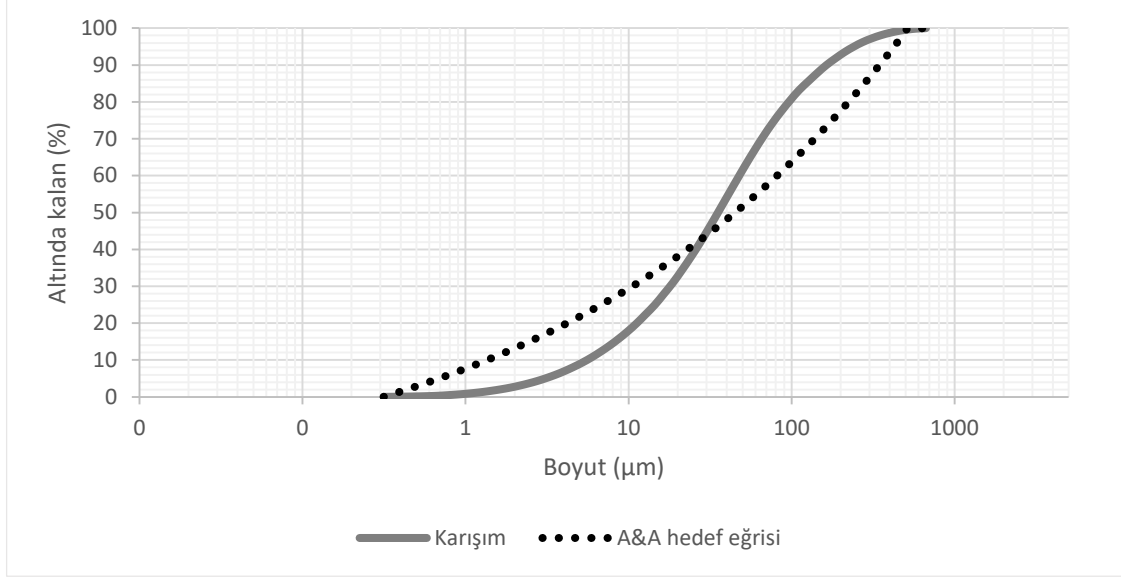
Şekil 3.9. Sınır koşulları tanımlanmadan elde edilen bağlayıcı karışımı ve hedef eğri

Tanımlanan sınır koşulları altında en uygun q değerinin 0,25 olduğu ve bu değer üstündeki ve altındaki bütün değerler için RSS değerinin (6952) arttığı gözlenmiştir. q değerinin 0,25 üzerindeki bütün değerleri için karışım aynı kalmakla beraber RSS değeri artmaktadır. Bu durumda belirlenen karışımda portland çimentosu, uçucu kül ve silis dumanı oranları hacimce sırasıyla %24,8, % 70,7 ve %4,54 olarak belirlenmiştir. Bu karışımın RSS değerine bakıldığında kontrol karışımı olarak kabul edilen F1.2 karışımına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu yüzden daha boşluklu bir dağılım olduğu düşünülebilir, ancak silis dumanının en küçük tane boyutu, diğer bağlayıcılara göre çok düşük olduğu için Andreasen ve Andersen modeli ile belirlenen hedef eğri kontrol karışımından farklıdır. Örneğin F1.2 karışımı için silis dumanının tane boyut aralığı dikkate alınarak hedef eğri belirlendiğinde RSS değeri 11717 gibi yüksek bir değer olarak elde edilmektedir. Bu bakımdan silis dumanı içeren karışımları kontrol karışımı ile sadece RSS değerini dikkate alarak mukayese etmek mümkün değildir. Belirlenen bu karışımın ve 0,25 dağılım modülüne göre silis dumanlı karışım için belirlenen hedef eğrileri Şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.10. Bağlayıcı optimizasyonu için en düşük RSS değerinin belirlenmesi

Elde edilen bağlayıcı malzeme karışımındaki taneler arası boşluk miktarı deneysel olarak belirlendiğinde, teorik olarak daha boşluksuz bir yapı elde edilmesi gerekirken, boşluk miktarı %52 olarak belirlenmiştir. Bu değer kontrol karışımlarında belirlenen %47,2 değerine göre oldukça yüksektir. Bu sebepten dolayı dağılım modülünün birçok farklı değeri için (0,17-0,25 arasında) yapılmış olan silis dumanının yer aldığı optimizasyonlar sonucunda elde edilen karışımlar için deneysel olarak boşluk miktarı belirlenmiş ancak hiçbir karışımda %52'nin altında bir değer elde etmek mümkün olmamıştır. Bunun sebebi olarak da silis dumanı tanelerinin kümelenmesinin etkili olduğu düşünülmektedir. Bundan dolayı bağlayıcı optimizasyonunda silis dumanı içermeyen karışımlar üzerinde çalışılmaya devam edilmiştir. Silis dumanı içeren karışımlar ayrı olarak ele alınacaktır. Silis dumanı içermeyen karışımlar içerisinde dağılım modülünün 0,20, RSS değerinin ise 6407 olarak bulunduğu, sırasıyla portland çimentosu, uçucu kül ve cüruf oranları hacimce %24,8, % 74,7 ve %0,5 olarak belirtildiği karışım (Şekil 3.11) için taneler arası boşluk miktarı %46,1 olarak belirlenmiştir.

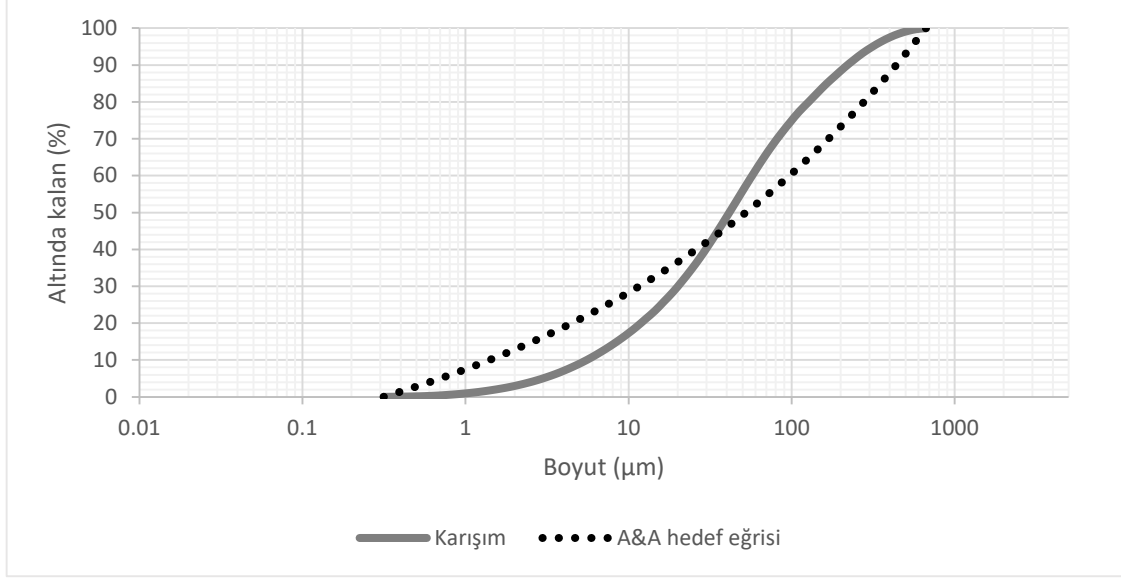


Şekil 3.11. Bağlayıcı optimizasyonu için en düşük boşluk hacminin belirlenmesi

3.3.3 Agrega Ve Bağlayıcının Birlikte Optimizasyonu (ii)

Optimizasyon çalışmalarının bu aşamasında TÇK matrisi içinde bağlayıcı olan ve olmayan bütün toz malzemeleri birlikte optimize edilmiştir. Bunun için kontrol karışımı olarak kabul edilen F1.2 standart karışımındaki oranlar dikkate alınarak en küçük RSS değeri olarak 5764 için başlangıç dağılım modülü 0,19 olarak hesaplanmıştır (Şekil 3.12). Bununla birlikte, bağlayıcı optimizasyonunda olduğu gibi portland çimentosunun minimum ve maksimum miktarları için sınır koşulları tanımlanmış ve silis dumanı içeren karışımlarının deneysel olarak boşluk miktarının yüksek bulunması nedeniyle silis dumanı dışındaki bağlayıcılar ve bütün agregalar hesaplarda kullanılmıştır. F1.2 karışımı için boşluk miktarı deneysel olarak %46 olarak belirlenmiştir.

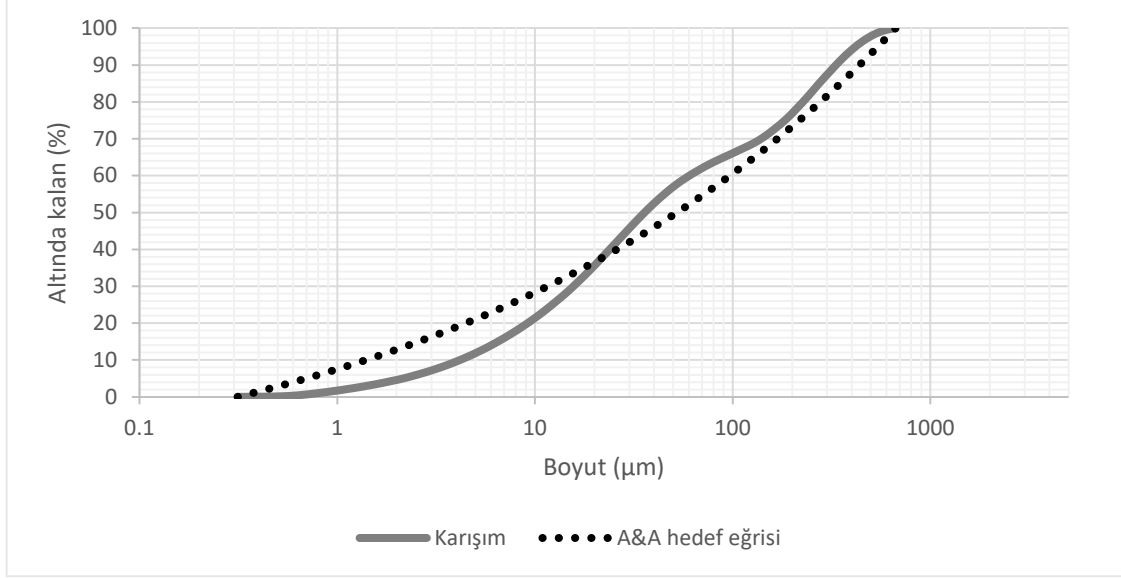
Bundan sonra ise, agrega miktarı sabit tutularak, bağlayıcı miktarı sabit tutularak, agrega/bağlayıcı oranı sabit tutularak ve ayrı ayrı optimize edilmiş agrega ve bağlayıcılar aynı karışımda kullanılarak olmak üzere 4 farklı tane boyutu optimizasyonu uygulanmıştır.



Şekil 3.12. F1.2 karışımı için dağılım modülünün belirlenmesi

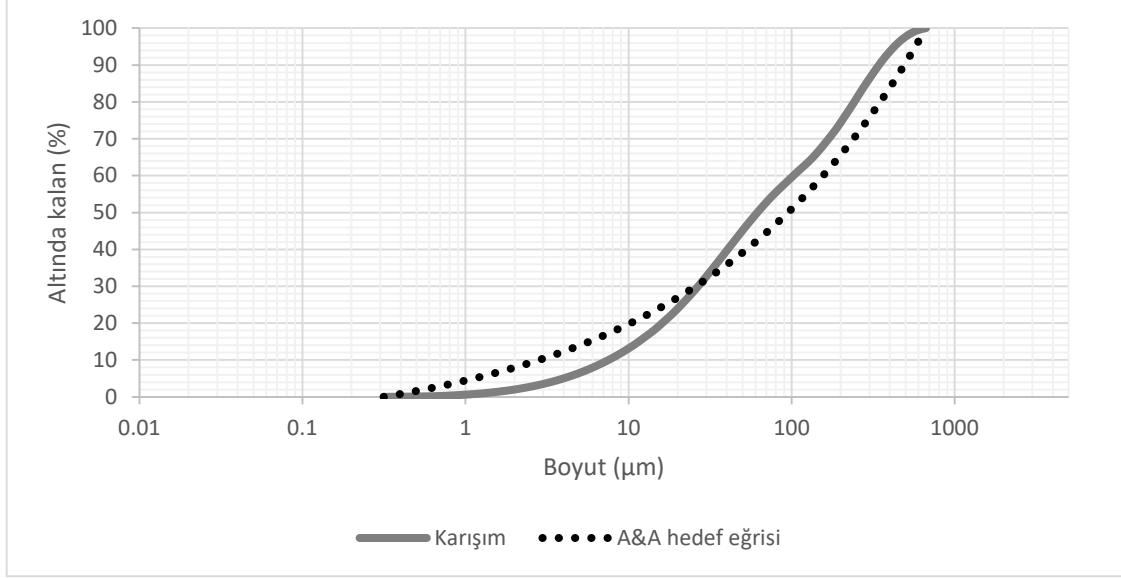
ii.a. Agrega miktarı sabit tutularak optimizasyon:

Bağlayıcı ve agregaların bir arada optimize edilmesi sırasında daha önceden belirlenen sınır koşullarına ek olarak F1.2 karışımında bulunun agrega miktarı ($442,4 \text{ kg/m}^3$) aşılmayacak şekilde agrega ve bağlayıcıların optimize edilmesi sağlanmıştır. Yapılan optimizasyon çalışması sonucunda en düşük RSS değeri olan 2226 değerine, yine başlangıç dağılım modülü olan 0,19 değerinde ulaşılmıştır. Bu optimizasyon sonucunda çimento, uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve 100-300 μm kuvars kumundan sırasıyla hacimce %18,4, %29,4, %25,8 ve %26,5 kullanılması gerektiği hesaplanmıştır. Şekil 3.13'de bu optimizasyona ait hedef eğri ve karışımın tane boyutu dağılımı verilmiştir.



Şekil 3.13. Sabit agrega miktarı ile optimizasyon için en düşük RSS değerinin belirlenmesi

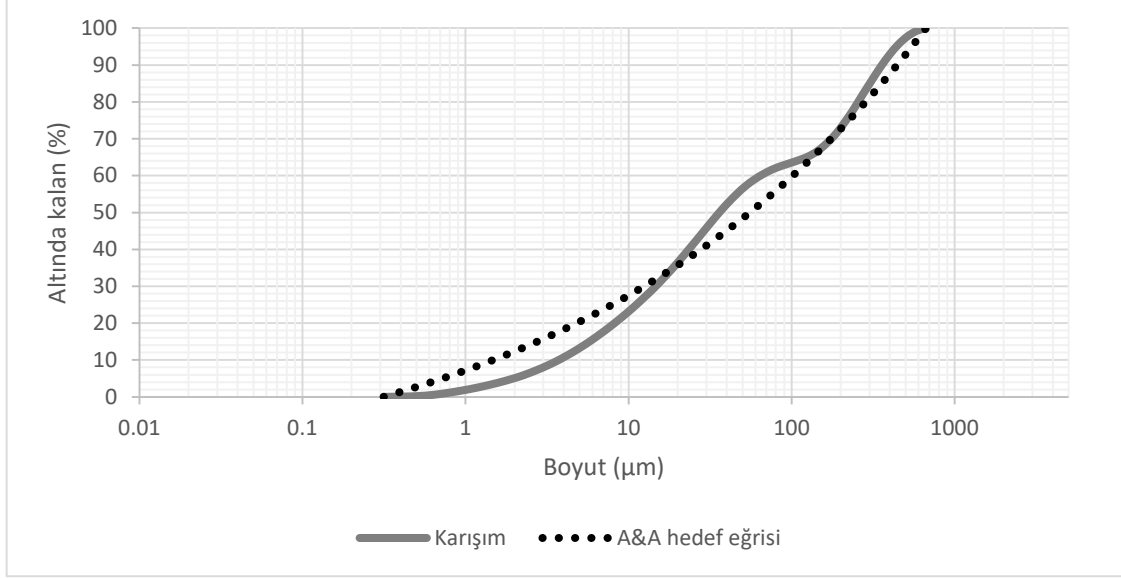
Bu optimizasyonda belirlenen malzeme karışımındaki taneler arasındaki boşluk miktarı deneysel yöntemle %43,6 olarak tespit edilmiştir. Bu değer kontrol karışımındaki boşluk miktarından daha düşük olduğu için daha sıkı bir yapı elde edildiği anlaşılmaktadır. Ancak dağılım modülünün farklı değerleri için gerçekleştirilen optimizasyonlar sonucunda, 0,31 dağılım modülü değeri ile yapılan optimizasyonda her ne kadar RSS değeri (2445) daha yüksek olsa da, boşluk hacmi %36,3'e düşürülmüştür. Dağılım modülünün 0,31'den daha büyük değerleri için ise optimizasyon sonunda aynı karışım elde edilmektedir. En sıkı tane dağılımına sahip Şekil 3.14'de dağılımı ve hedef eğrisi verilen bu karışım için hesaplanan hacim oranları ise çimento, uçucu kül ve 100-300 µm kuvars kumu için sırasıyla %18,4, %55,1 ve %26,5'dir.



Şekil 3.14. Sabit agrega miktarı ile optimizasyon için en düşük boşluk hacminin belirlenmesi

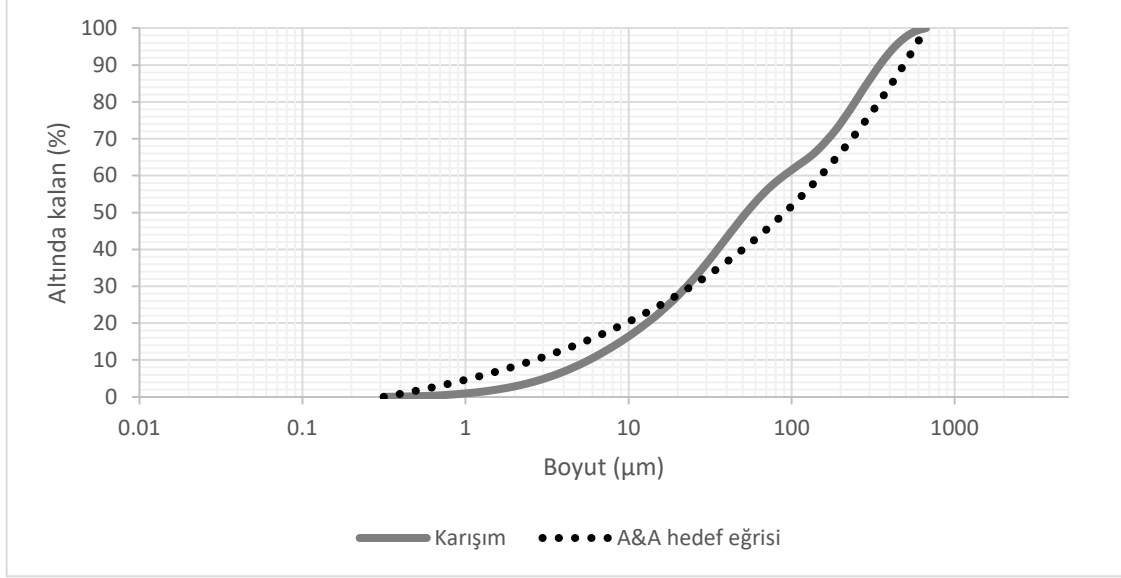
ii.b. Bağlayıcı miktarı sabit tutularak optimizasyon:

Bu optimizasyon ile bağlayıcıların toplam ağırlığı, F1.2 kontrol karışımındaki toplam bağlayıcı ağırlığı olan 1232 kg/m^3 olarak sabit tutulmuştur. Yapılan optimizasyon sonucu hedef eğriye en çok yaklaşılan model için dağılım modülü 0,20 olarak belirlenmiştir. Karışım ile hedef eğri arasında RSS değeri 1563 olarak hesaplanmıştır. Bu optimizasyon sonucunda çimento, uçucu kül, cüruf ve 100-300 µm kuvars kumunun hacimleri sırasıyla %34,2, %8,6, %23 ve %34,2 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.15'de bu optimizasyona ait hedef eğri ve karışımın tane boyutu dağılımı verilmiştir.



Şekil 3.15. Sabit bağlayıcı miktarı ile optimizasyon için en düşük RSS değerinin belirlenmesi

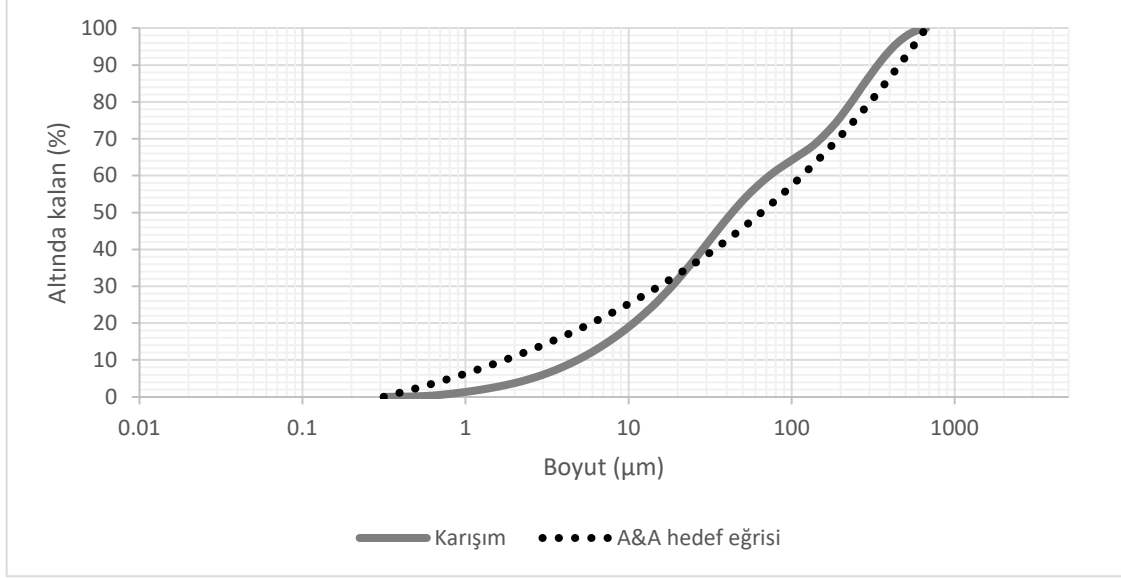
Belirlenen karışım oranlarındaki toz karışımın deneysel olarak taneler arasındaki boşluk oranı %43,6 olarak belirlenmiştir. Bu değer yine kontrol karışımına göre daha düşüktür ve daha sıkı bir yapı elde edilebildiğini göstermektedir. Bununla birlikte, dağılım modülü 0,30 değerine kadar arttırıldığında RSS'nin sürekli olarak arttığı, karışımındaki cürufun yerini uçucu külün aldığı görülmektedir. 0,30 değerinden daha yüksek değerler için ise karışım aynı kalmakla beraber RSS değeri artmaya devam etmektedir. Deneysel olarak boşluk miktarının belirlenmesi sonucunda 0,30 dağılım modülü için yapılan optimizasyonun en düşük boşluk oranını sağladığı ortaya çıkmıştır. Bu optimizasyon ile karışım oranları çimento, uçucu kül, ve 100-300 µm kuvars kumundan sırasıyla hacimce %34,2, %36,8 ve %29,0 olarak hesaplanmıştır. Bu optimizasyon için RSS değeri ise 2300 olarak hesaplanmıştır. İlgili karışımın tane boyutu dağılımı ve hedef eğri Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16. Sabit bağlayıcı miktarı ile optimizasyon için en düşük boşluk hacminin belirlenmesi

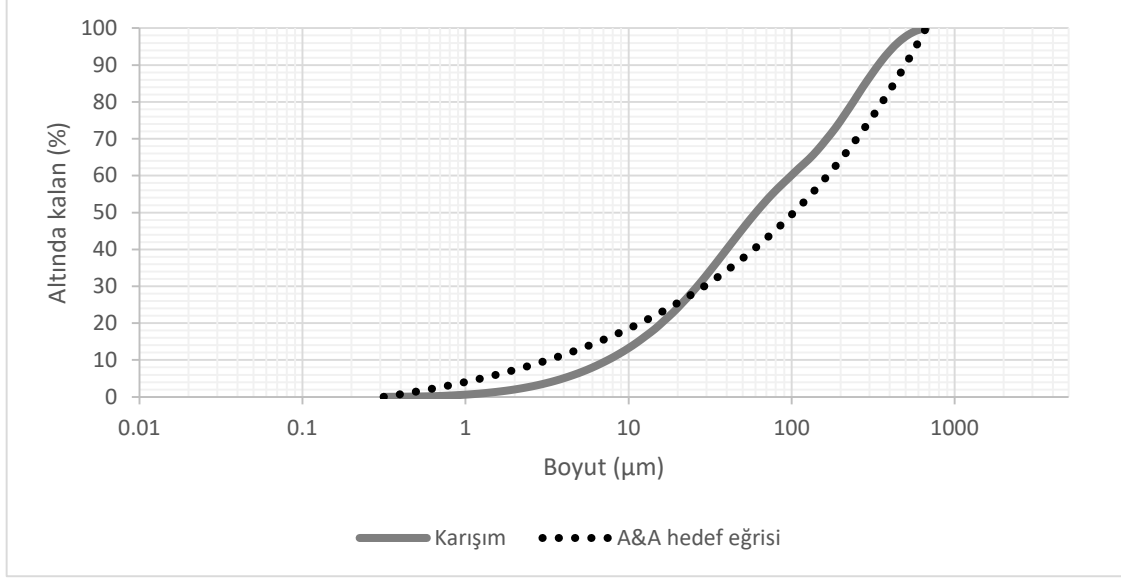
ii.c. Agrega/Bağlayıcı miktarı sabit tutularak optimizasyon:

Standart TÇK karışımı olan F1.2 karışımında agreganın bağlayıcıya oranı 0,36'dir. Optimizasyonun bu aşamasında, bu oran sınır koşulu olarak tanımlanmıştır. Bununla amaçlanan TÇK'nın standart özelliklerini çok fazla değiştirmeden hem bağlayıcı, hem de agrega kısmının mümkün olduğunca sıkı bir yapıda dizilmesini sağlamaktır. Optimizasyon sonunda en düşük RSS değeri olan 2125 değerine çimento, uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve 100-300 µm kuvars kumundan sırasıyla %24,0, %34,7, %14,4 ve %27,0 hacim oranlarında karıştırıldığında ulaşılabileceği görülmüştür. Bu karışımın boşluk miktarı deneysel olarak %41,9 olarak belirlenmiştir. Şekil 3.17, bu karışıma ait tane boyut dağılımını ve 0,23 dağılım modülü için hedef dağılım eğrisini göstermektedir.



Şekil 3.17. Sabit agrega/bağlayıcı oranı ile optimizasyon için en düşük RSS değerinin belirlenmesi

RSS değerinin en düşük olduğu bu karışımın dışında, farklı dağılım modülleri için oluşturulan modellerin kullanılmasıyla edilen karışımların boşluk oranları da deneysel olarak belirlenmiştir. Bu çalışmalar sonucunda dağılım modülünün 0,33 olarak alındığı modelin kullanıldığı RSS değeri 2837 olan optimizasyonda en düşük boşluk oranı %40,1 olarak belirlenmiştir. Hedeflenen dağılım eğrisine en yakın dağılım çimento, uçucu kül ve 100-300 µm kuvars kumundan sırasıyla %18,4, %55,9 ve %25,7 hacim oranlarında karıştırıldığında elde edilmektedir. Karışıma ait tane boyutu dağılımı ve hedef eğriye göre durumu Şekil 3.18'de verilmektedir.



Şekil 3.18. Sabit agrega/bağlayıcı oranı ile optimizasyon için en düşük boşluk hacminin belirlenmesi

iii. Ayrı ayrı optimize edilmiş agrega ve bağlayıcıların aynı karışımda kullanılması:

Tane boyutu optimizasyonunun son aşaması olarak ise, daha önce ayrı ayrı optimizasyonlar ile belirlenmiş optimum agrega ve bağlayıcı bileşenleri aynı karışımda birlikte kullanılmıştır. Önceki aşamalarda bağlayıcıların ve agregaların ayrı ayrı optimize edilmesi sonucunda her ikisi için de en sıkı dağılımın belirlenmesinin ardından F1.2 standart karışımındaki bağlayıcılar olan çimento ve uçucu kül yerine bağlayıcıların en sıkı yapıyı oluşturduğu bağlayıcı karışımı, yine F1.2 standart karışımında agrega olarak kullanılan 0-200 µm boyut aralığındaki kuvars kumu yerine ise agrega optimizasyonu ile daha önce belirlenmiş en sıkı agrega yapısını oluşturacak karışımın kullanılması ile yeni bir TÇK karışımı daha tasarlanmıştır.

Bütün bu optimizasyon çalışmaları sonunda elde edilen toz malzeme oranlarının kullanılması ile proje kapsamında mekanik ve kendiliğinden iyileşme özellikleri belirlenen yeni TÇK karışımları için hesaplanan oranlar bölüm 3.5'de verilmiştir.

3.4 Silis Dumanı İçeren Karışımlar İçin Tane Boyutu Optimizasyonu (s)

Bu bölümde tane boyutu optimizasyonu uygulaması sırasında bağlayıcı bileşenleri arasında silis dumanı da kullanılmıştır. Daha önce anlatıldığı gibi, optimizasyon çalışmalarında her ne kadar silis dumanı kullanımı dağılım için hedeflenen eğrilere daha yakın eğriler elde edilmesini sağlamış olsa da, deneysel olarak elde edilen boşluk miktarının çok yüksek bulunması nedeni

ile karışımlarda silis dumanı kullanımı ayrı olarak değerlendirilmiştir. Bunun sebeplerinden birinin silis dumanı taneciklerinin topak halinde bulunması ve kuru halde ultrasonik ayrıştırıcı ile topakların dağıtılamamasıdır. Bu nedenle, silis dumanının ultrasonik dağıtıcıyla ayrıştırılmasını sağlamak için uygulanan yöntemde değişiklik yapılmıştır. Silis dumanı içeren karışımlar için sadece toz malzemeler yerine, elde edilen karışımdan üretilen taze matris sıkıştırma işlemine tabi tutulmuş ve malzemeler karıştırılmadan önce silis dumanı karışım suyu içerisinde ultrasonik ayrıştırıcı ile dağıtılmıştır. Seçilen TÇK karışımları hazırlanırken de silis dumanı aynı şekilde ultrasonik dağıtıma maruz bırakılmıştır.

Silis dumanı kullanıldığında modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen modelinde en küçük tane boyutu belirgin şekilde azalmaktadır. Silis dumanının sahip olduğu en küçük tane boyutu da dikkate alınarak bölüm 3.3'de detaylandırılan optimizasyon yöntemi izlenmiştir. Silis dumanı içeren karışımların üretimi sırasında, işlenebilirliğe olan olumsuz etkisini önlemek amacıyla silis dumanı miktarı toplam bağlayıcı miktarının en fazla %10'u ile sınırlandırılmıştır.

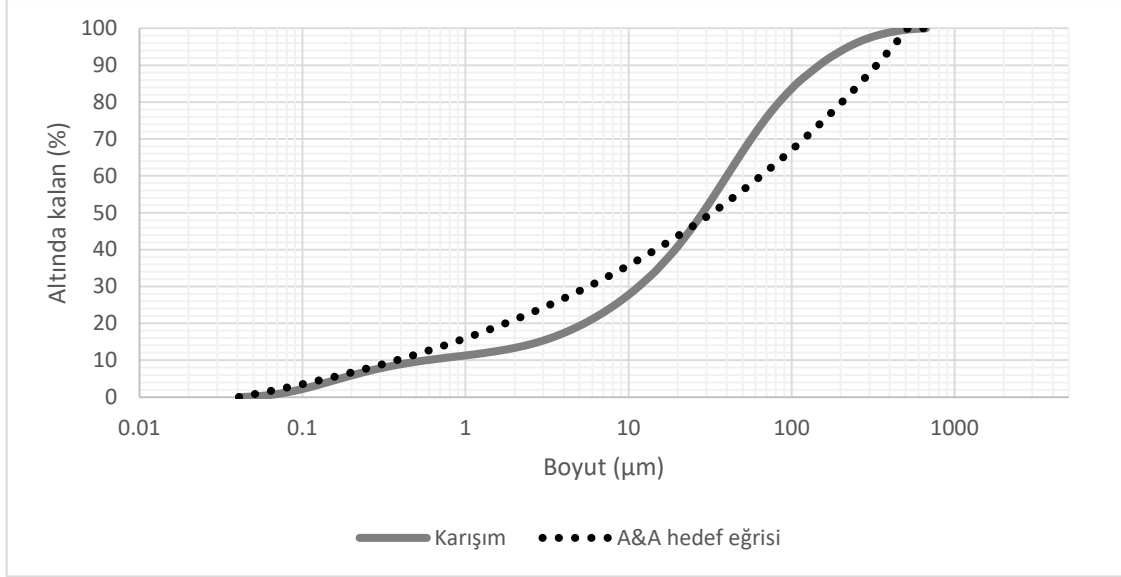
Silis dumanı varlığında da tane boyutu optimizasyonu bağlayıcı kısma ayrı olarak ve bağlayıcı ve agregalara birlikte uygulanmıştır. Agregaya kısma ayrı olarak tane boyutu optimizasyonu uygulaması silis dumanı içermeyen karışımlarla aynı sonucu vereceği için tekrar yapılmamıştır. Tane boyutu optimizasyonu uygulaması ile karışım oranları tasarlanan TÇK'lardan en boşluksuz yapıya sahip olan 2 karışım seçilmiştir. Aşağıda bağlayıcı olarak silis dumanı varlığında uygulanan tane boyutu optimizasyonu çalışmaları anlatılmıştır:

3.4.1 Bağlayıcı Optimizasyonu (i.bs)

Bağlayıcı bir malzeme olması sebebiyle ayrı ayrı optimizasyonda silis dumanı ile sadece bağlayıcı optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Agregaya ve bağlayıcıların birlikte optimizasyonu ise silis dumanı içermeyen karışımlarda da olduğu gibi 4 farklı şekilde yapılmıştır; agregaya miktarı sabit, bağlayıcı miktarı sabit, agregaya/bağlayıcı oranı sabit ve ayrı ayrı optimize edilmiş agregaya ve bağlayıcılar tek bir karışımda.

Silis dumanı ile optimizasyon gerçekleştirildiğinde, karışımında çoğu zaman bağlayıcı olarak sadece silis dumanı ve uçucu kül kullanılması gerekmektedir. Bu nedenle kullanılacak çimento miktarının toplam bağlayıcı hacminin %24,8'ünden daha fazla olması sınır şartı koyulmuştur. Bu şartlar altında optimum karışım 0,20 dağılım modülüne sahip çimento, uçucu kül ve silis dumanının sırasıyla hacimce %24,8, %63,9 ve %11,3 oranlarında karıştırıldığı karışım olarak belirlenmiştir. Belirlenen karışımın gradasyonu ile hedef gradasyon eğrisi arasında RSS değeri

4822 olarak elde edilmiştir. Şekil 3.19'da hedef ve elde edilen karışımın gradasyon eğrileri görülmektedir.

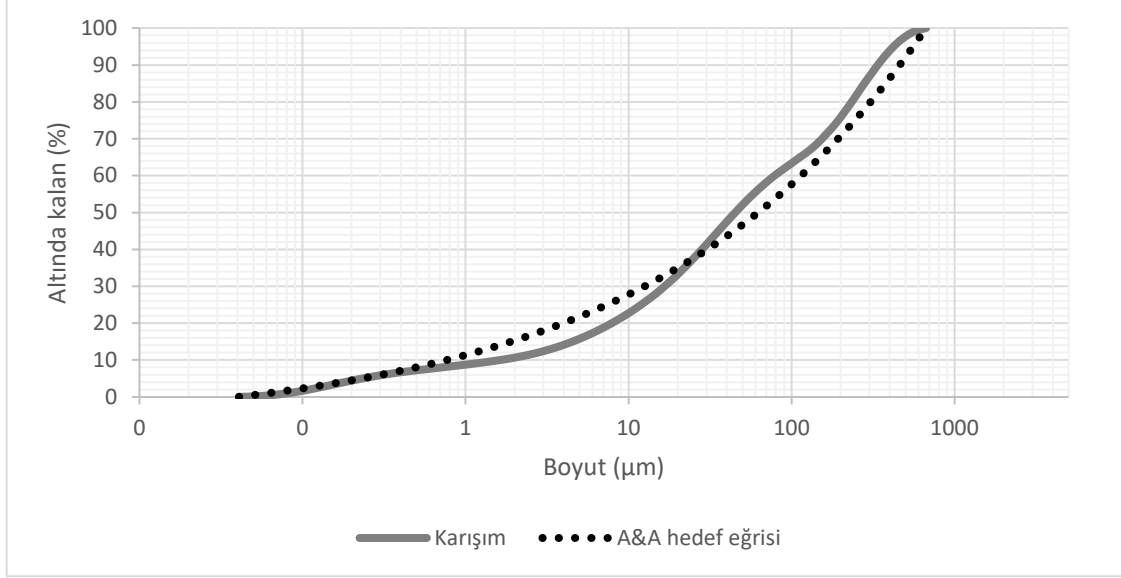


Şekil 3.19. Bağlayıcı optimizasyonu için en düşük boşluk hacminin belirlenmesi

3.4.2 Agrega Ve Bağlayıcının Birlikte Optimizasyonu (ii.s)

ii.as. Agrega miktarı sabit tutularak optimizasyon:

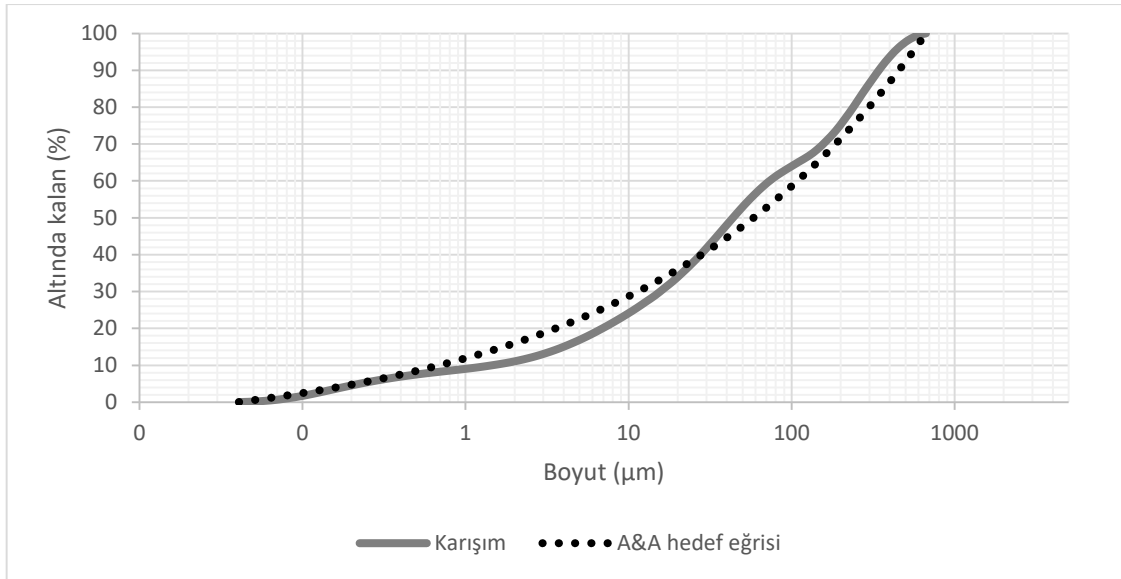
Bağlayıcı ve agreganın birlikte optimize edildiğinde agreganın miktarının sabit tutulması şartı ile optimum karışım 0,26 dağılım modülüne karşılık gelen hacimce %18.4 çimento, %40 uçucu kül, %8,5 silis dumanı, %6,6 cüruf ve %26,5 100-300µm boyutunda kuvars kumu karışımı olarak belirlenmiştir. Belirlenen karışım ile hedef tane boyutu dağılımı arasında RSS değeri 1355 olarak elde edilmiştir. Her iki tane boyutu dağılımı eğrisi Şekil 3.20'de görülmektedir.



Şekil 3.20. Sabit agrega miktarı ile optimizasyon için en düşük boşluk hacminin belirlenmesi

ii.bs. Bağlayıcı miktarı sabit tutularak optimizasyon:

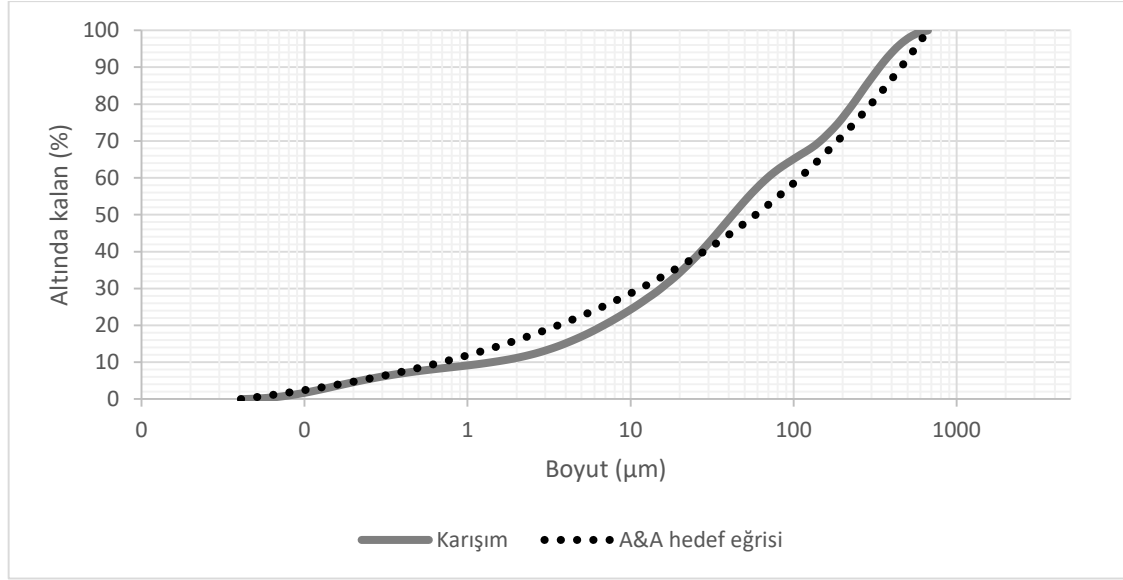
Bağlayıcı ve agrega birlikte optimize edildiğinde bağlayıcı miktarının sabit tutulması şartı ile optimum karışım 0,25 dağılım modülüne karşılık gelen hacimce %34,2 çimento, %28,4 uçucu kül, %8,7 silis dumanı ve %28,7 100-300µm boyutunda kuvars kumu karışımı olarak belirlenmiştir. Belirlenen karışımın gradasyonu ile hedef gradasyon eğrisi arasında RSS değeri 1168 olarak elde edilmiştir. Şekil 3.21’de hedef dağılım eğrisi ile karışım dağılım eğrisinin karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Sabit bağlayıcı miktarı ile optimizasyon için en düşük boşluk hacminin belirlenmesi

ii.cs. Agrega/Bağlayıcı miktarı sabit tutularak optimizasyon:

Bağlayıcı ve agregası birlikte optimize edildiğinde agregası miktarının bağlayıcı miktarına oranı sabit tutulması şartı ile en sıkı karışım 0,25 dağılım modülüne karşılık gelen hacimce %33,6 çimento, %30,6 uçucu kül, %8,9 silis dumanı ve %27 100-300µm boyutunda kuvars kumu karışımı olarak belirlenmiştir. Belirlenen karışımın gradasyonu ile hedef gradasyon eğrisi arasında RSS değeri 1329 olarak elde edilmiştir ve Şekil 3.22’de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Sabit agregası-bağlayıcı oranı ile optimizasyon için en düşük boşluk hacminin belirlenmesi

iii.s. Ayrı ayrı optimize edilmiş agregası ve bağlayıcıların aynı karışımında kullanılması:

Bu aşamada, silis dumanı içermeyen karışımlarda da uygulandığı gibi, ayrı ayrı en sıkı yapıya getirilen agregası ve bağlayıcı kısımları bir arada düşünülerek tek bir karışımında kullanılmıştır. Silis dumanı da dahil olmak üzere bağlayıcıların ve agregaların ayrı ayrı optimizasyonu sonucunda her ikisi için de optimum dağılımın belirlenmesinin ardından çimento ve uçucu kül yerine bağlayıcıların en sıkı yapıyı oluşturduğu bağlayıcı karışımı, agregası olarak kullanılan 0-200 µm boyut aralığındaki kuvars kumu yerine ise agregası optimizasyonu ile daha önce belirlenmiş en sıkı agregası yapısını oluşturacak karışımın kullanılması ile TÇK karışımı oranları tasarlanmıştır.

Silis dumanının da dahil edildiği optimizasyon çalışmaları sonunda elde edilen toz malzeme oranlarının kullanılması ile proje kapsamında silis dumanı içeren beş farklı yeni TÇK tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan yeni TÇK'lar için bileşenlerin karışım oranları bölüm 3.5’de verilmiştir.

3.5 Tane Boyutu Optimizasyonu ile Tasarlanmış Çimentolu Kompozit Karışımları

Optimizasyon çalışmaları sonucunda agrega ve bağlayıcıların ayrı ayrı ve birlikte olarak en sıkı yapıyı oluşturması için bir araya getirilmesi gereken oranlar hacimsel olarak belirlenmiştir. Bu oranlar ve yöntemeye göre sabit tutulan değerler kullanılarak TÇK üretimi için gerekli olan karışım oranı tasarımı yapılmıştır. Hesaplanan karışım oranları karışım kodları ile birlikte bağlayıcı olarak silis dumanı içermeyen ve içeren kompozitler için sırasıyla Tablo 3.5 ve 3.6 verilmiştir.

Tablo 3.5. Silis dumanı içermeyen TÇK karışımları için optimizasyon ile hesaplanan karışım oranları

Karışım Oranları (kg/m ³)	Karışım kodu					
	i.a	i.b	ii.a	ii.b	ii.c	iii
Portland çimentosu	560	369	373	692	373	369
Uçucu kül	672	805	807	539	819	805
Cüruf	0	7	0	0	0	7
0-45 µm	120	0	0	0	0	120
0-70 µm atık	0	0	0	0	0	0
0-200 µm	52	442	0	0	0	52
100-300 µm	270	0	442	485	430	270
Su	333	333	333	333	333	333
PVA lif	26	26	26	26	26	26

Tablo 3.6. Silis dumanı içeren TÇK karışımları için optimizasyon ile hesaplanan karışım oranları

Karışım Oranları (kg/m ³)	Karışım kodu				
	i.bs	ii.as	ii.bs	ii.cs	iii.s
Portland çimentosu	369	373	692	680	369
Uçucu kül	688	586	416	448	688
Cüruf	0	118	0	0	0
Silis dumanı	117	120	123	125	117
0-45 µm	0	0	0	0	120
0-70 µm atık	0	0	0	0	0
0-200 µm	442	0	0	0	52
100-300 µm	0	442	479	451	270
Su	333	333	333	333	333
PVA lif	26	26	26	26	26

TÇK karışımlarının kodlanmasında kullanılan “i.a” agrega kısmının optimizasyonunu, “i.b” bağlayıcı kısmının optimizasyonunu, “ii.a” agrega miktarı sabit olmak üzere bağlayıcı olan ve

olmayan kısmın birlikte optimizasyonunu, “ii.b” bağlayıcı miktarı sabit tutularak birlikte optimizasyonu, “ii.c” agrega/bağlayıcı oranı sabit olmak koşuluyla birlikte optimizasyonu, “iii” ise ayrı ayrı optimize edilen agrega ve bağlayıcı kısmın bir arada kullanıldığı optimizasyonu göstermektedir. Karışımlarda kullanılan “s” harfi ise, bağlayıcı olarak silis dumanının da kullanıldığını ifade etmektedir.

Optimizasyon çalışmaları sonucunda bileşenlerinin karışım oranları hesaplanarak Tablo 3.6’da verilen silis dumanı içeren TÇK’lardan proje süresinin kısıtlı olması sebebiyle en düşük boşluk oranına sahip iki karışım seçilerek deneysel çalışmalara bu karışımlarla devam edilmiştir. Bağlayıcı kısmın ayrı optimizasyonu ile elde edilen “i.bs” karışımı ile bağlayıcı olan ve olmayan kısmın birlikte optimizasyonunda agrega miktarının sabit tutulduğu “ii.as” karışımları seçilmiştir.

Sonuç olarak, bu projede modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen modeline göre tane boyutu optimizasyonu metodu kullanılarak 8 farklı TÇK tasarımı yapılmıştır. Optimizasyon uygulaması sırasında her bir karışım için belirlenerek kullanılan q dağılım modülleri ve hesaplanan RSS değerleri ile uygulanan optimizasyon yöntemi Tablo 3.7’de özetlenmiştir. Proje kapsamında Tablo 3.7’de verilen bütün karışımların mekanik özellikleri ve kendiliğinden iyileşme performansları belirlenmiştir.

Tablo 3.7. TÇK karışımları için optimizasyon parametreleri

Karışım Kodu	Optimizasyon yöntemi	q	RSS
i.a	Agrega kısmının optimizasyonu	0,53	692
i.b	Bağlayıcı kısmın optimizasyonu	0,20	6407
ii.a	Sabit agrega miktarı, birlikte optimizasyon	0,31	2445
ii.b	Sabit bağlayıcı miktarı, birlikte optimizasyon	0,30	2300
ii.c	Sabit agrega/bağlayıcı oranı, birlikte optimizasyon	0,33	2837
iii	Ayrı ayrı optimize edilmiş agrega ve bağlayıcıların tek karışımda kullanılması	-	-
i.bs	Bağlayıcı kısmın optimizasyonu, silis dumanı içeren	0,20	1664
ii.as	Sabit agrega miktarı, birlikte optimizasyon, silis dumanı içeren	0,26	1335

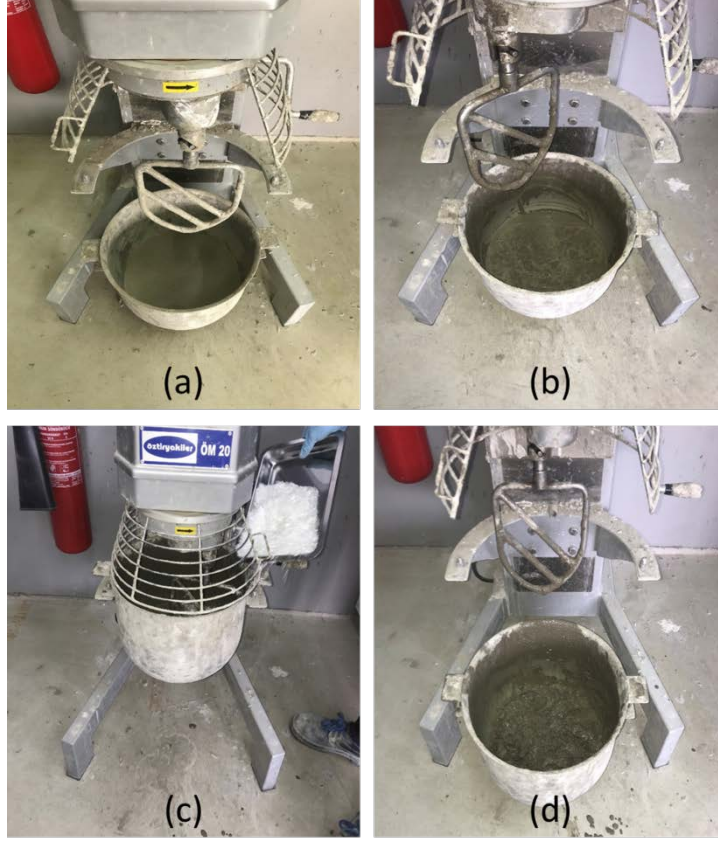
3.6 TÇK Karışımlarının Üretilmesi

Proje kapsamında, TÇK karışımlarının üretimlerinde toz malzeme olarak CEM I 42,5R tipi portland çimentosu, uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı, 0-45 µm kuvars kumu, 0-200 µm kuvars kumu ve 100-300 µm kuvars kumu kullanılmıştır. Kullanılan toz malzemeler Şekil 3.23'de görülmektedir.



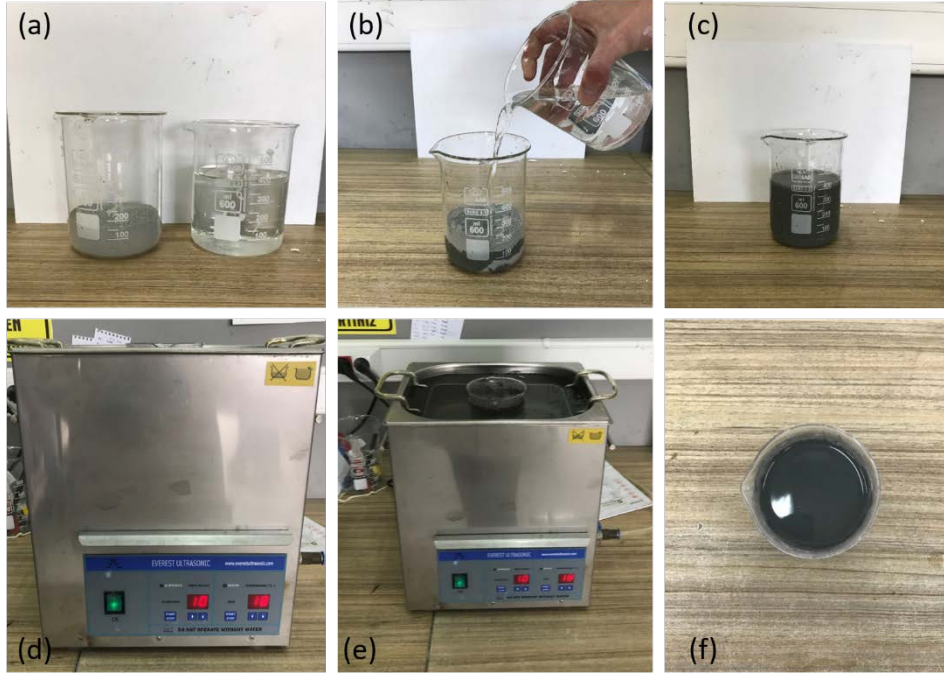
Şekil 3.23. TÇK karışımlarında kullanılan toz malzemeler

Karışım oranları belirlenen TÇK karışımlarının üretimi aşamasında, karıştırma işlemleri için 25 litre kapasiteli düşey eksenli harç mikseri kullanılmıştır. Bu aşamada en iyi lif dağılımını elde etmek için belirlenmiş olan sıraya göre malzemeler mikser içerisine yerleştirilmektedir. Standart bir TÇK karıştırma işlemine, katı toz malzemelerin mikserin haznesine yerleştirilmesi ve düşük hızda karıştırılması ile başlanmaktadır (Şekil 3.24-a). Daha sonra su ile birlikte sıvı haldeki yüksek oranda su azaltıcı kimyasal katkı eklenmektedir (Şekil 3.24-b). Bu aşamada yüksek oranda su azaltıcı kimyasal katkının miktarı, mini slump testi ile yaklaşık 40 cm yayılma çapına ulaşacak şekilde belirlenmektedir. PVA lifler yüksek akışkanlığa sahip bu karışıma son malzeme olarak yavaş yavaş eklenir (Şekil 3.24-c). Son olarak mikser durdurulup liflerin dağılımı elle kontrol edilir ve olası lif topakları dağıtılır. Mikserin karıştırıcı ve haznesinin çeperlerine yapışmış olan malzemeler de temizlendikten sonra bütün malzemeler son defa karıştırılarak işlem tamamlanır (Şekil 3.24-d). Karıştırma işleminin tüm aşamaları Şekil 3.24'de gösterilmiştir.



Şekil 3.24. TÇK bileşenlerinin karışım süreci

Karışımında bağlayıcı olarak silis dumanı bulunması durumunda ise, silis dumanı karışıma diğer toz malzemelerle birlikte ilk aşamada eklenememektedir. Bunun sebebi, çok ince yapıda olan malzemenin topaklanarak daha iri taneciklerden oluşan bir malzeme gibi davranmasıdır. Bu şekilde, malzemenin optimizasyon uygulaması sonucunda beklenen etkiyi göstermesi mümkün olamayacaktır. Bu nedenle silis dumanı bir miktar karışım suyu içerisinde ultrasonik olarak ayrıştırma işlemine tabi tutulduktan sonra karışım suyu ile birlikte miksera ilave edilmiştir. Silis dumanının ayrıştırma işlemi Şekil 3.25'de detaylı olarak anlatılmaktadır. İlk olarak bir miktar karışım suyu ile silis dumanı cam beherler içerisinde tartılır (Şekil 3.25-a). Daha sonra su, silis dumanına ilave edilerek karıştırılır (Şekil 3.25-b ve c). Silis dumanının su içerisinde dağılması ultrasonik ayrıştırıcı ile sağlanır (Şekil 3.25-d). Silis dumanı ve su içeren cam beher ultrasonik ayrıştırıcı cihazı yardımıyla 10 dakika boyunca ayrıştırma işlemine tabi tutulur (Şekil 3.25-e). Bu sürecin sonunda ayrıştırılmış silis dumanı ve su karışımı elde edilir (Şekil 3.25-f). Bu karışım TÇK üretimi sırasında karışım suyu ile birlikte miksera eklenir.



Şekil 3.25. Ultrasonik ayırıştırıcı ile silis dumanının ayırıştırılması

Döküm işlemi tamamlandıktan sonra numuneler, tabii tutulacakları deneylere uygun olan boyut ve şekillerdeki kalıplara yerleştirilmiştir. Kalıplar içerisinde 24 saat 23 ± 2 °C sıcaklıkta ve 50 ± 5 bağıl nemde kür edildikten sonra kalıplardan çıkarılan numuneler deney gününe kadar 23 ± 2 °C sıcaklıkta plastik torbalar içerisinde otojen küre tabii tutulmuşlardır.

3.7 TÇK Karışımlarının Özelliklerin Belirlenmesi

Projenin amaçlarından bir tanesi tane boyutu optimizasyonu yöntemi ile karışım oranları tasarlanan TÇK'ların mekanik özelliklerinin belirlenmesidir. Proje kapsamında 4 adet standart ve 8 adet optimizasyon uygulaması sonucu toplam 12 farklı TÇK karışımı üretilmiştir. Tüm karışımların sertleşmiş haldeki özellikleri incelenmiştir. Mekanik özellik olarak basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve eğilme yükü altında orta nokta sehim kapasitesi belirlenmiştir. Ayrıca, optimizasyon uygulamasının sertleşmiş haldeki boşluk miktarına etkisini incelemek amacıyla, sertleşmiş numunelerin civalı porosimetre deney metodu ile boşluk dağılımları da tespit edilmiştir.

3.7.1 Basınç Dayanımı Testi

Proje kapsamında hazırlanan tüm karışımların 7, 28 ve 90. günde basınç dayanımları belirlenmiştir. Basınç dayanımının belirlenmesi için 50x50x50 mm boyutlu küp numuneler hazırlanmıştır. Bölüm 3.6'da tarif edildiği şekilde küre maruz bırakılan küp numuneler deney yaşı geldiğinde 25 ton kapasiteli yük kontrollü çimento test makinesinde ASTM C 109'a göre deneye tabi tutulmuşlardır. Her bir deney yaşı için 3 adet numune test edilerek sonuçların ortalaması alınmıştır. Basınç dayanımı test cihazı Şekil 3.26 gösterilmektedir.



Şekil 3.26. Basınç dayanımı test cihazı

3.7.2 Eğilme Deneyi

Eğilme dayanımları ve orta açıklık sehim miktarları Şekil 3.27'de gösterilen dört noktalı eğilme deney düzeneği ile 50x75x360 mm boyutlarındaki kiriş numuneleri üzerinde belirlenmiştir. Numuneler eğilme düzeneğinde birbirinden 304 mm uzaklıkta iki mesnet üzerine simetrik olarak 75 mm genişlik ve 50 mm yükseklikte olacak şekilde yerleştirilmiş ve yük birbirinden 101 mm mesafeli iki silindir üzerinden uygulanmıştır. Dört noktalı eğilme deneyi, 0,005 mm/s yükleme hızıyla deformasyon kontrollü elektromekanik test makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Her eğilme dayanımı testi sırasında numunenin altına yerleştirilen doğrusal değişken diferansiyel çevirici (LVDT) ile yükleme sırasında eşzamanlı olarak sehim ölçümleri kaydedilmiştir. Basınç

dayanımında olduğu gibi eğilme testi de 7, 28 ve 90 gün yaşıdaki numunelere uygulanmıştır. Her yaş için 3 adet numune test edilerek sonuçların ortalaması alınmıştır.



Şekil 3.27. 4-noktalı eğilme deney düzeneği

3.7.3 Civalı Porozimetre ile Boşluk Dağılımının Belirlenmesi

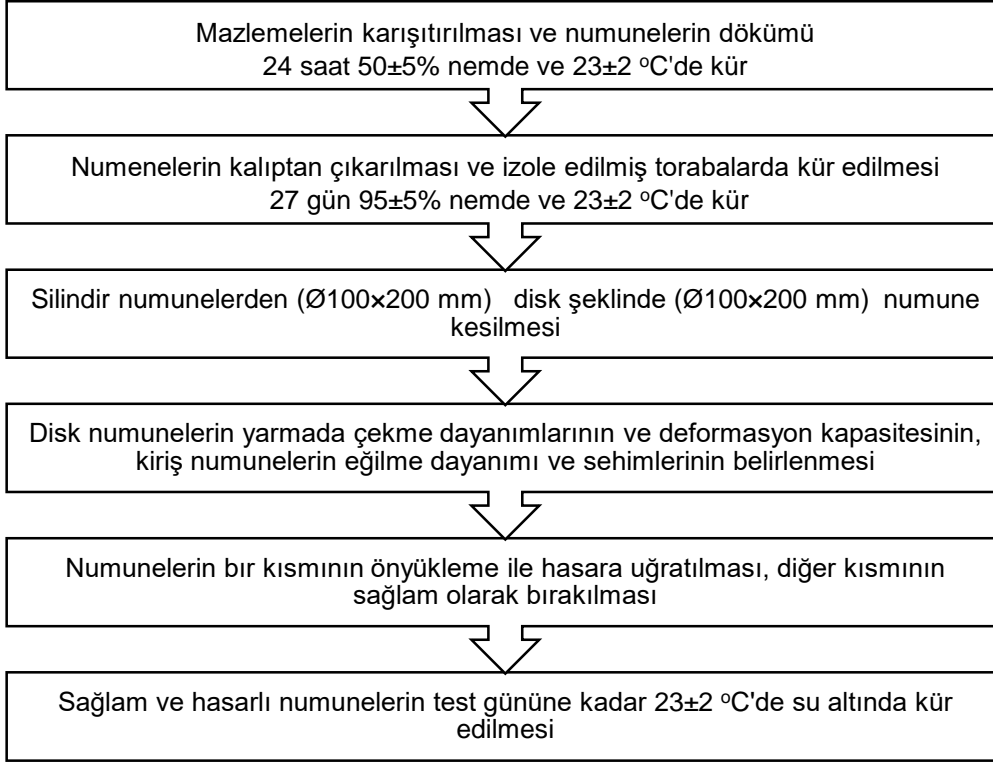
Tüm karışımların boşluk dağılımlarının belirlenmesi için civalı porozimetre analizi Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi tarafından hizmet alımı yoluyla temin edilmiştir. 28 gün boyunca küre tabii tutulan numuneler, daha sonra küçük parçalara kırılmış, alkol çözeltisine maruz bırakılarak hidrasyon reaksiyonlarının durdurulması sağlanmış ve vakumlu fırında tamamen kurutulduktan sonra analizin gerçekleştirileceği kuruma sevk edilmiştir. Civalı porozimetre uygulaması ile boşlukların dağılımları, ortalama boşluk çapı ve toplam porozite miktarları elde edilmiştir.

3.8 TÇK Karışımlarının Kendiliğinden İyileşme Performansının Belirlenmesi

Projenin asıl amacı, TÇK tasarımında tane boyutu optimizasyonu uygulamasının karışımların kendiliğinden iyileşme özellikleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesidir. Bu amaçla, proje kapsamında üretilen 12 farklı TÇK karışımının kendiliğinden iyileşme performansları incelenmiştir. Kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesi için hazırlanan tüm

karışımların mekanik ve iletim özellikleri belirlenmiştir. Bu amaçla numunelere çeşitli tahribatlı ve tahribatsız deney yöntemleri uygulanmıştır.

Numunelerin kendiliğinden iyileşme özelliklerinin belirlenmesi için Şekil 3.28'de şematik olarak özetlenen yöntem kullanılmıştır. Kendiliğinden iyileşme deneyleri için her bir karışımdan $\text{Ø}100 \times 200$ mm silindir ve $50 \times 75 \times 360$ mm kiriş numuneler hazırlanarak ilk 28 gün boyunca bölüm 3.6'da anlatıldığı gibi standart şekilde otojen küre maruz bırakılmışlardır. 28. günde kendiliğinden iyileşme deneyleri için kiriş numunelerinin yarısı 4 noktalı eğilme testi ile sehim kapasitelerinin %60'ına kadar yüklenerek hasara uğratılmıştır. Hasara uğratılan numunelerden 3 tanesi hasara uğratıldıktan hemen sonra yeniden yükleme yapılarak meydana getirilen hasarın etkisi belirlenmiştir. Sonrasında ön yükleme yapılan bütün numuneler ve her deney yaşı için en az 3 adet sağlam numune 28. günden başlayarak test edilecekleri yaşa kadar su altında kür edilmiştir. Böylece 28. günden sonraki 0, 15, 30, 60 ve 90. günlerde en az 3'er adet sağlam ve hasara uğramış numune test edilerek, ön yükleme sonucu oluşturulan hasarın özellikler üzerindeki etkisi ve kendiliğinden iyileşme durumu gözlenmiştir. Silindir numuneler ise 28. günde beton hizarı ile $\text{Ø}100 \times 50$ mm boyutlarında üç eşit parçaya bölündükten sonra deformasyon kapasitelerinin %60'ına kadar ön yüklemeye maruz bırakılmışlardır. Sağlam ve hasarlı silindir numunelere de deney yaşına kadar su kürü uygulanmıştır. Hem sağlam hem de hasarlı silindir numuneler kiriş numunelerde olduğu gibi 28+0, 28+15, 28+30, 28+60 ve 28+90. günlerde ilgili deneylere tabi tutulmuşlardır.



Şekil 3.28. Kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesi prosedürü

Kendiliğinden iyileşme performansını belirlemek için 4-noktalı eğilme testi, ultrases dalga hızı, elektriksel özdirenç, hızlı klor iyonu geçirimsizliği, kılcal su emme uygulanan deney yöntemleridir. Ayrıca çatlak genişliklerindeki azalmanın ölçülmesi, yeniden yükleme sırasında çatlakların davranışı ve çatlak içerisindeki kendiliğinden iyileşme ürünlerinin X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını spektroskopisi (EDS) teknikleriyle karakterizasyonu da kendiliğinden iyileşme performansının anlaşılabilmesi için gerçekleştirilmiştir.

3.8.1 Eğilme Deneyi

Tüm karışımlar 28 gün standart şekilde kür edildikten sonra, her karışımdan 3'er adet sağlam ve 3'er adet ön hasara uğratılmış numune 28+0, 28+15, 28+30, 28+60 ve 28+90. günlerde 4-noktalı eğilme testine tabi tutularak tahribatlı olarak test edilmişlerdir. Eğilme testi için mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılan deney düzeneği ile eğilme dayanımları ve orta açıklık sehim kapasiteleri ölçülerek üç sonucun ortalaması olarak belirlenmiştir. Böylelikle, 12 farklı TÇK karışımı için zaman içerisinde sağlam ve hasarlı numunelerde eğilme özelliklerindeki

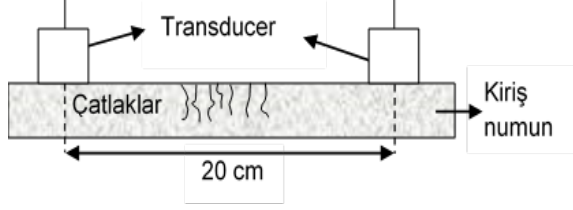
değişim takip edilerek ve kıyaslanarak mekanik olarak kendiliğinden iyileşme performansları hakkında bilgi edinilmiştir.

3.8.2 Ultrases Dalga Hızı Deneyi

Ultrases dalga hızı (UPV) deneyi, numune içerisinde belirli iki nokta arasında birincil dalgaların iletim süresinin (t) ölçüldüğü tamamen tahribatsız bir deney yöntemidir. İki nokta arasındaki mesafe (L) bilindiği takdirde UPV denklem 3.1’de verilen formül ile hesaplanır:

$$UPV = \frac{L}{t} \quad (3.1)$$

Bu deney yöntemi proje başvuru formunda belirtilmese de proje kapsamında kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesi amacıyla tüm TÇK karışımlarına uygulanmıştır. Her bir karışım için 3 adet sağlam ve 3 adet hasarlı kiriş numune üzerinde 28. günden sonra 0, 15, 30, 60 ve 90. günlerde ASTM C 597 standardına göre UPV değerleri belirlenmiştir. Deney yönteminin tamamen tahribatsız olması sebebiyle her yaşta, aynı numuneler test edilmiş ve zaman içerisinde meydana gelen kendiliğinden iyileşme aynı numuneler üzerinde takip edilebilmiştir. 54 kHz frekans ile oluşturulan ultrases dalgaları Şekil 3.29’da gösterildiği gibi dolaylı iletim yöntemi ile ölçülmüştür. Daha önce doğrudan iletim prosedürü ile yapılan deneylerde dalgaların sürekli olarak kirişlerin basınç bölgesindeki çatlaksız alandan ilerlemesine bağlı olarak, elde edilen verilerin çatlakların kapanma performansını yeterince yansıtmadığı anlaşıldığı için dolaylı iletim prosedürü tercih edilmiştir. Bu prosedür uygulandığında ultrases dalgaları numune içerisinde çatlakların olduğu çekme bölgesinden geçmeye zorlanmakta, böylelikle çatlaklar kapandıkça ve özellikle çatlak derinliği azaldıkça dalgaların izlediği yol kısaltmakta ve UPV değerleri belirgin şekilde artış gözlenmektedir. Böylece, yöntem kendiliğinden iyileşmenin değerlendirilmesinde verimli olarak kullanılabilir.

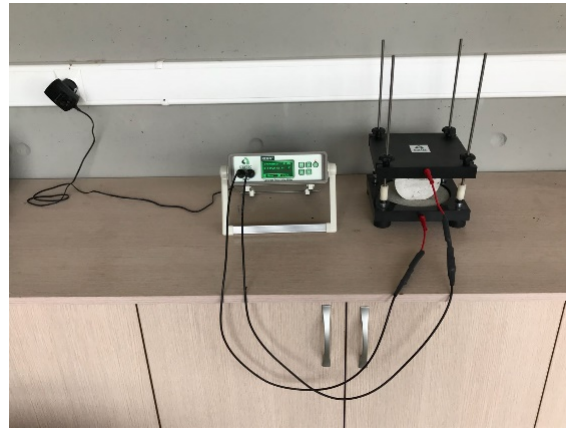


Şekil 3.29. Dolaylı iletim yöntemi ile UPV sonuçlarının ölçülmesi

3.8.3 Elektriksel Özdirenç Ölçüm Deneyi

Elektriksel özdirenç ölçümü ultrases deneyi gibi tamamen tahribatsız bir yöntemdir ve aynı numunelerin sürekli olarak ölçülmesine ve böylece numunelerde özelliklerin gelişiminin takip edilmesine olanak veren bir deney yöntemidir. Proje kapsamında 4 adet sağlam ve 4 adet hasarlı numune üzerinde diğer deneylerle aynı yaşlarda elektriksel özdirenç değerleri belirlenmiştir.

Elektriksel empedans (EE) ölçümleri tek eksenli konfigürasyona sahip standart bir beton özdirenç ölçer (Şekil 3.30) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyin uygulanması sırasında paralel plaka elektrotlar arasına numunenin düzgün yüzeyleri yatay eksene paralel olacak şekilde yerleştirilmektedir. Elektrotlar ve numune arasına, elektrik iletimini sağlamak üzere ıslak süngerlerin yerleştirilmesi gerekmektedir. Daha sonra 1 Hz ile 30 kHz frekans aralığında ve 0-180° arası faz açıları empedans ölçümleri yapılarak empedans spektrumları elde edilmekte ve spektrum üzerinden betonun özdirenci hesaplanmaktadır.



Şekil 3.30. Beton elektriksel özdirenç ölçüm cihazı

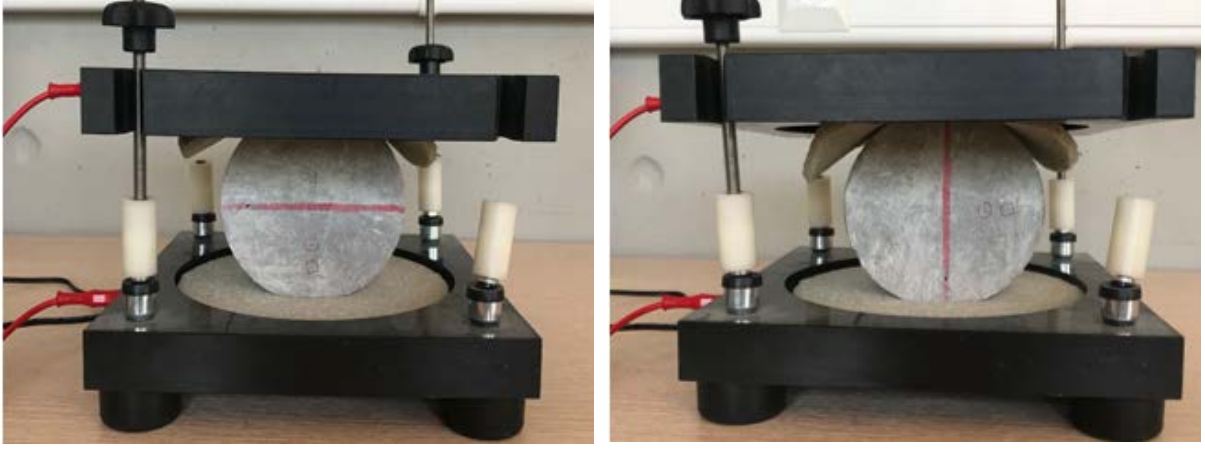
Kendiliğinden iyileşmenin kütsel elektriksel özdirenç ölçümü ile değerlendirilmesi oldukça yeni bir tekniktir. Diğer yöntemlere göre uygulanması kolay ve hızlı sonuç alınan bir yöntemdir. Beton benzeri malzemelerin elektriksel özdirençlerinin boşluk boyutu dağılımına ve boşlukların birbirleriyle bağlantılı olma durumuna, doygunluk durumuna, boşluk çözeltisine ve sıcaklığa bağlı olarak değiştiği bilinmektedir. Bu bakımdan elde edilen sonuçların kendiliğinden iyileşmeyle ilgili fikir vermesi beklenmektedir. Her ne kadar pratik bir yöntem olsa da ölçüm prensibi diğer yöntemlere kıyasla daha karmaşık bir temele dayanmaktadır. Beton ve benzeri malzemelerin özdirençlerini doğru akım kullanarak ölçmek polarizasyon etkisi nedeniyle mümkün değildir. Bu nedenle kütsel elektriksel özdirenç ölçümlerinde alternatif akım kullanılmaktadır. Alternatif akım uygulandığında ise empedans ve faz açısı belirlenerek bu değerlere karşılık gelen alternatif akım bileşenleri olan rezistans (özdirenç) ve reaktans bulunabilmektedir. Rezistans değeri ile direnç arasında ise

$$\rho = \frac{A}{L} Z \quad (3.2)$$

ile ifade edilebilen bir ilişki bulunmaktadır. Burada A numunenin kesit alanını, L numunenin uzunluğunu, Z empedans değerini, ρ ise direnci ifade etmektedir. Faz açısının küçük değerleri için empedans, rezistansa eşit olduğu için düşük faz açılarda alınan ölçümlerde aynı boyuttaki numuneler için karşılaştırma amacıyla rezistans, direnç yerine kullanılabilir (Spragg vd., 2013). Bunun için ise alternatif akımın farklı frekansları için ölçümler yapmak gerekmektedir. Bu sebeple proje kapsamında yapılan EE ölçümlerinde geniş bir frekans aralığı kullanılarak en düşük faz açısı belirlenmiştir.

Kendiliğinden iyileşmenin elektriksel özdirenç ölçümleri ile belirlenmesinde çatlak yönünün ve numunenin nem muhtevasının önemli olacağı düşünülmektedir. Tamamen kuru numunelerden ölçüm almak mümkün değildir, bu yüzden numunelerin nem durumu ölçümleri değiştirebilmektedir. Bu nedenle, TÇK numunelerinin farklı su muhtevalarının elektriksel empedans değerleri üzerindeki etkisini saptamak amacıyla, numuneler 2 farklı nem oranında test edilmiştir. İlk olarak 23 ± 2 °C'de tamamen suya doygun hale getirilen numuneler belirlenen yaşlarda test edildikten sonra 23 ± 2 °C ve $\%50 \pm 2$ nispi nemde 24 saat boyunca kurumaya bırakılmış ve 24 saat sonunda numuneler tekrar test edilmiştir. Şekil 3.31'de görüleceği üzere, ön yüklenmiş numuneler her su muhtevası değeri için öncelikle akımın çatlakla aynı doğrultuda olacağı şekilde, sonrasında numune 90° döndürülerek akımın çatlakla dik bir biçimde hareket edeceği şekilde test edilmiştir. Bu yöntem yeni geliştirilmekte olan ve henüz yaygın olarak

kullanılmayan bir yöntem olduğu için kendiliğinden iyileşmenin değerlendirilmesinde mümkün olan en verimli şekilde kullanılması için çalışılmıştır.

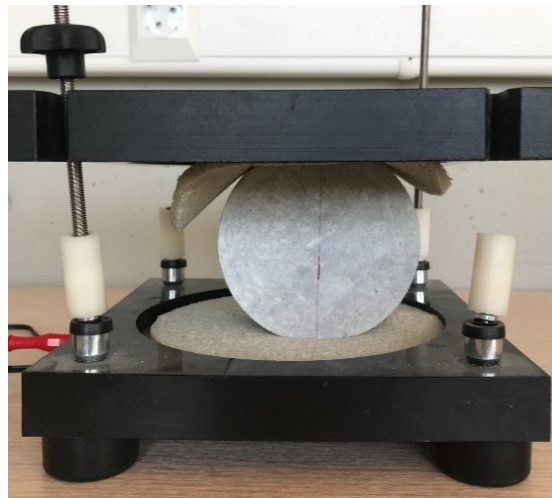


a. Çatlak doğrultusunda ölçüm

b. Çatlağa dik doğrultuda ölçüm

Şekil 3.31. Ön yüklenmiş numunelerin elektriksel empedans test düzeneği ile test edilme biçimleri

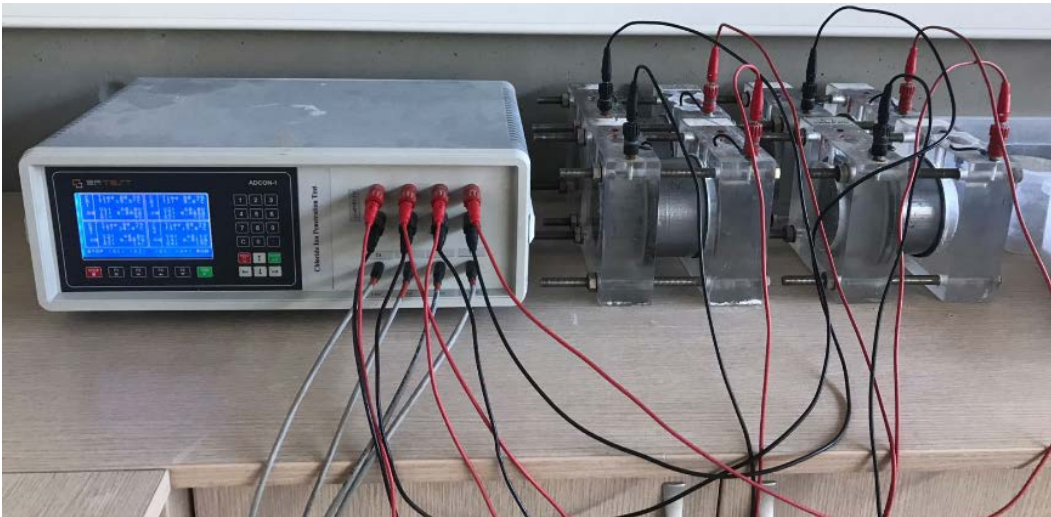
Sağlam numunelerde ise elektriksel öz direnç ölçümleri Şekil 3.32’de görüldüğü üzere, sürekli olarak belirlenen doğrultuda test edilmiştir ve yine aynı iki nem muhtevasında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.32. Sağlam numunelerin elektriksel empedans test düzeneği ile test edilmesi

3.8.4 Hızlı Klor İyonu Geçirimliliği Deneyi

Hızlı klor iyonu geçirimsizliği (HKİG) testi, ultrases ve elektriksel özdirenç testleri gibi tamamen tahribatsız bir yöntemdir. Bu yöntem ile kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesi için tüm karışımlardan 4 adet sağlam ve 4 adet ön yüklemeye ile hasara uğratılmış olmak üzere toplam 8 adet Ø100x50 mm boyutlarında disk numuneler hazırlanmıştır. Daha sonra tüm numunelere 28+0, 28+15, 28+30, 28+60 ve 28+90. günlerde olmak üzere ASTM C 1202 standardına göre HKİG testi uygulanmıştır. Test için standartta belirtildiği gibi suya doymuş numuneler kullanılmıştır. Belirlenen deney yaşlarında numunelerin alt ve üst yüzeyleri açık kalacak şekilde çeperleri izole edilmiştir. Numuneler düzeneğe yerleştirildikten sonra, düzenekteki negatif terminali temsil eden hazneye kütlece %3 NaCl çözeltisi, pozitif terminali temsil eden hazneye ise 0.3 N NaOH çözeltisi doldurulmuştur ve iki hücre arasında 60 V potansiyel fark uygulanmıştır. Geçen elektriksel yük (Coulomb) verileri altı saat boyunca kaydedilmiştir. HKİG deney sonuçları numunenin boşluk yapısı, miktarı ve boşluk suyunun kimyasal yapısı gibi faktörlerden etkilendiği için hem kendiliğinden iyileşmenin belirlenmesinde hem de numunelerin dayanıklılığı hakkında fikir vermesi açısından faydalı bir yöntemdir. Her ne kadar betonun elektriksel performansı ile ilgili bilgi verse de elde edilen sonuçlar betonun geçirimsizlik performansı ile dolaylı olarak ilişkilidir (Shi, 2004). Zaman içerisinde çatlakların kapanması ile birlikte daha az elektriksel yükün numune içerisinde hareket etmesi beklenmektedir. Esas olarak HKİG testi kendiliğinden iyileşmenin belirlenmesinde sıklıkla kullanılan bir deney yöntemidir (Özbay vd., 2013-a; Şahmaran vd., 2013; Şahmaran vd., 2014). Projede kullanılan HKİG deney düzeneği Şekil 3.33'de gösterilmektedir.



Şekil 3.33. HKİG deney düzeneği

3.8.5 Kılcal Su Emme Deneyi

Proje öneri formunda belirtilmese de proje kapsamında uygulanan bir diğer tahribatsız deney yöntemi de kılcal su emme deneyidir. ASTM C 1585 standardına göre uygulanan kılcal su emme testi için HKİG ölçümlerinde de olduğu gibi Ø100x50 mm boyutlarında dördü sağlam ve dördü ön yüklenme ile hasara uğratılmış olmak üzere her bir TÇK karışımından toplam 8 adet numune hazırlanmıştır. Numuneler test yaşlarından önce sabit bir ağırlığa ulaşıncaya kadar etüvde kurutulmuştur. Kurutulan numuneler test edilmek üzere etüvden çıkarılıp, 24±2 °C sıcaklığa düşene kadar soğumaya bırakılmıştır. Soğuyan numunelerin üst ve alt yüzeyleri açık kalacak şekilde çeperleri suya dayanıklı bant ile kapatılmıştır. Test düzeneği, numunelerin suyla temas edecek yüzeylerinin, suya 2±1 mm batmasını sağlayacak şekilde oluşturulmuştur. Bu test altı saat boyunca devam ettirilmiştir. Kütle değişimi ölçümleri, kılcal su emme indeksini saptamak üzere belirlenen zaman dilimlerinde (1, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 270, 300, 330, 360 dakika) kaydedilmiştir. Kılcal su emme indeksini hesaplamak için öncelikle daha önceden belirlenen her zaman aralığı için emilen su miktarı 360'ıncı dakikaya kadar kümülatif olarak gram cinsinden belirlenmiştir. Daha sonrasında, birim yüzey alanı başına emilen kümülatif su hacmini (mm^3/mm^2) tespit etmek amacıyla her bir zaman aralığındaki kümülatif emilen su miktarı, numunenin yüzey alanı (mm^2) ile suyun yoğunluğunun (g/mm^3) çarpımına bölünmüştür. Son olarak, birim yüzey alanı başına emilen kümülatif su hacmi (mm^3/mm^2) ve ölçüm yapılan zamanın karekökü ($\text{dakika}^{1/2}$) bir grafik halinde çizdirilip, elde edilen eğrinin eğimi kılcal su emme indeksi olarak hesaplanmıştır. Bu işlem yine 28+0, 28+15, 28+30, 28+60 ve 28+90. günlerde uygulanmıştır. Deney düzeneği Şekil 3.34'de gösterilmiştir.



Şekil 3.34. Kılcal su emme deney düzeneği

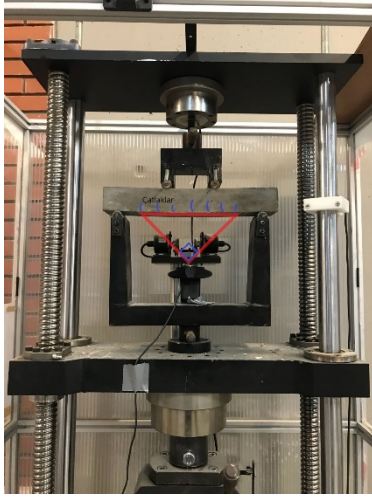
3.8.6 Çatlakların Görsel Muayenesi

Proje kapsamında kendiliğinden iyileşmenin belirlenebilmesi için iki farklı şekilde görsel muayene uygulanması planlanmıştır. Görsel muayene metotlarından bir tanesi hasara uğratılan numunelerdeki çatlak genişliklerinin takip edilmesi, diğeri yeniden yükleme işlemi uygulanması sırasında çatlak oluşumunun kamera aracılığıyla kaydedilmesidir.

Tüm TÇK karışımlarında çatlakların zaman içerisindeki durumunu takip etmek amacıyla, önceden hasara uğratılarak çatlattırılan disk şeklindeki numunelerde çatlak sayılarındaki ve genişliklerindeki değişiklikler tüm deney yaşlarında çatlak mikroskobu ile izlenmiş ve dijital mikroskop ile fotoğraflanmışlardır. Böylelikle farklı karışımlarda çatlakların kapanma sürelerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Kiriş numunelerde eğilme düzeneğinin altına yerleştirilen bir kamera vasıtası ile yükleme sırasında görüntüler alınıp, çatlakların yükleme sırasında yeniden açılıp açılmadığı belirlenmeye çalışılmıştır. Normalde 4-noktalı eğilme düzeneğinin mesnetleri ile düzeneğin tabanı birbirine yakın olduğu için yükleme noktalarının arasındaki bölgeyi görüntülemek için numunenin altına kamera yerleştirmek mümkün değildir. Bu amaçla düzeneğin mesnetlerinin yüksekliği kamera yerleştirerek görüntü almaya uygun olacak şekilde artırılmıştır. 4-noktalı eğilme sistemine monte edilen kamera düzeneği Şekil 3.35'de görülmektedir. Kamera kayıtları çok fazla disk alanı kapladığı ve elde edilen görüntülerin hepsinin değerlendirilmesi mümkün olmadığı için bütün deneyler yerine, sadece seçilmiş numunelerin test edilmesi sırasında kamera kayıtları alınmıştır. Bu aşamada kendiliğinden iyileşmenin belirlenmesinde faydalı olabilecek bir yöntemin kazandırılması amaçlanmıştır. Bu amaçla zaman zaman numuneler

üzerinde, örneğin ön yüklemmeden önce numunelerin çatlak oluşacak yüzeylerinin boyanarak çatlakların daha görünür kılınması gibi, değişiklikler yaparak yöntem geliştirilmeye çalışılmıştır. Ancak numunelerin altının beyaza boyanması geniş çatlakları daha görünür kılmasına rağmen, yükleme sırasında meydana gelen dar çatlakların hiç görünmemesine sebep olduğu ve boyanın zamanla dökülmesi ile daha kötü bir görüntü oluştuğu için boyama işleminden vazgeçilmiştir.



Şekil 3.35. Kamera düzeneği ve kullanılan ağ kamerası

3.8.7 Çatlak Karakterizasyonu

Kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesi için; üretilen karışımların iletim ve mekanik özelliklerinin yanı sıra, çatlak içerisindeki kendiliğinden iyileşme ürünlerinin X-ışını kırınımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve X-ışını spektroskopisi (EDS) teknikleriyle karakterizasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla 28+90 günde kendiliğinden iyileşmenin meydana geldiği çatlaktan toz halinde numune alınarak XRD tekniğiyle analiz edilmiştir. Yine 28+90 güne gelen hasarlı numunelerde çatlak çevresinden küçük boyutlu numuneler kesilmiştir. Bu çatlak ve etrafından kesilen numunelerde çatlak içerisindeki ve çevresindeki sağlam bölgelerden SEM ile görüntü alınması ve EDS ile analiz edilmesi Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi Araştırma Laboratuvarları Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde hizmet alımı şeklinde gerçekleştirilmiştir. Böylece, 12 farklı TÇK karışımında çatlakların kendiliğinden iyileşme performansları mikroyapı incelemesi ile de gözlenmiştir.

4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

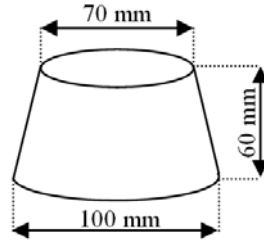
Projenin raporunun 3. Bölümü olan “Deneysel program” bölümünde de anlatıldığı üzere, proje kapsamında literatürde M45 karışımı olarak yer alan ve projede F1,2 karışımı olarak adlandırılan kontrol karışımının yanı sıra, yine literatürde yer alan bu karışımının yüksek oranda uçucu kül içeren versiyonu olarak karışımıza çıkan F2,2 karışımı üzerinde de aynı deneyler gerçekleştirilmiştir. Buna ek olarak F1,2 ve F2,2 karışımlarıyla benzer karışım oranlarına sahip ancak uçucu kül yerine öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren S1,2 ve S2,2 karışımlarına da proje kapsamında yer verilmiştir. Bu karışımların dışında, Tasarlanmış Çimentolu Kompozitlerin (TÇK) sadece agrega kısmının Andreasen ve Andersen tane boyutu dağılımı modeline göre optimize edilmesi ile, sadece bağlayıcı kısmının optimize edilmesi ile ve agrega ve bağlayıcı kısmının birlikte optimize edilmesiyle oluşturulan 6 farklı TÇK karışımı tasarlanmıştır. Agrega ve bağlayıcının birlikte optimize edilmesi sırasında ise sırasıyla bütün toz malzemeler içerisindeki agrega miktarı sabit tutularak bağlayıcı miktarının değişmesine imkan verilerek, bağlayıcı miktarı sabit tutulup agrega miktarının değişmesine imkan verilerek ve agrega ve bağlayıcının birbirine oranı sabit tutularak 3 farklı şekilde optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Ancak bu optimizasyon çalışmaları sırasında silis dumanı içeren karışımlarda teorik olarak düşük boşluk oranları elde edilmesine rağmen deneysel olarak boşluk oranı yüksek bulunmuştur. Buna sebep olarak da silis dumanı taneciklerinin kuru halde iken bir arada bulunarak topaklanması ve deneysel lazer kırınımı yöntemi ile belirlenene göre kuru halde iken daha büyük tane boyutuna sahipmiş gibi davranmalarıdır. Lazer kırınımı yönteminde tane boyutu dağılımı belirlenmeden önce silis dumanı tanelerinin uygulanabilir tane boyut dağılımını elde etmek amacıyla 250 W gücündeki ultrasonik dağıtıcıda, %40 gücünde 10 dakika işleme tabi tutulmuştur. Bu bakımdan kuru haldeki boyut dağılımının elde edilen dağılımdan farklı olması teorik ve deneysel olarak elde edilen boşluk oranlarının tutarsız olmasına neden olmuştur. Bu zıtlığı ortadan kaldırmak için silis dumanı içeren karışımlar için yukarıda bahsedilenlerin dışında bir optimizasyon gerçekleştirilmiş ve boşluk oranları kuru toz karışımı için değil, silis dumanı taneleri ultrasonik dağıtıcı ile dağıtıldıktan sonra ıslak karışım için belirlenmiştir. Bu şekilde 5 farklı silis dumanı içeren karışımın tasarımı gerçekleştirilmiştir. Silis dumanı içeren karışımlarda silis dumanının işlenebilirliğe olan olumsuz etkisi göz önünde bulundurularak, silis duman ağırlığının toplam bağlayıcı ağırlığının %10’undan fazla olamaması sınır şartı koyulmuştur. İş yükünü arttırmamak adına, bu karışımlardan 2 tanesi seçilerek mekanik ve kendiliğinden iyileşme ile ilgili deneylerde kullanılmıştır. 1 tanesi kontrol karışımı olmak üzere, literatürde karşılaşılan 4 TÇK karışımına ek olarak, 6 adet optimizasyon ile elde edilmiş silis dumanı içermeyen karışım ve 2 adet silis dumanı içeren karışım olmak

üzere toplam 12 adet karışım üzerinde mekanik ve kendiliğinden iyileşme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

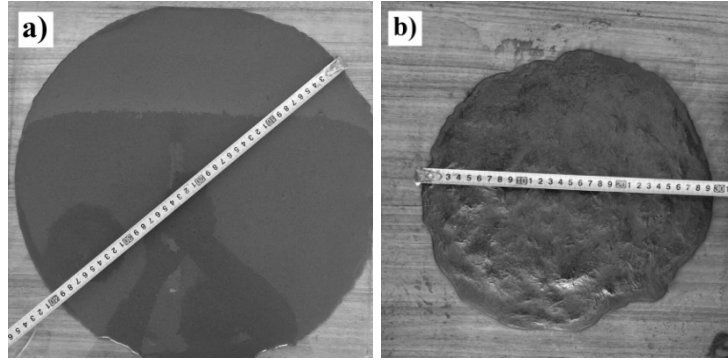
4.1 Taze Haldeki Özellikler

4.1.1 Mini Çökme Hunisi

Kontrol karışımı olarak kullanılan F 1.2 karışımının yanı sıra, F 2.2, S 1.2 ve S 2.2 karışımlarının ve optimizasyon ile elde edilen 8 adet karışımın tamamının taze halde mini çökme hunisi kullanılarak yayılma değerleri ve ayrıca taze haldeki hava boşluğu miktarları belirlenmiştir. Karışımların işlenebilirlik özelliklerini incelemek için ilk olarak mini çökme hunisi testi gerçekleştirilmiştir. Bu test için Şekil 4.1'de görülen yüksekliği 60 mm, taban çapı 100 mm ve üst çapı 70 mm olan kesik bir koni kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Mini çökme hunisi ölçüleri



Şekil 4.2. Örnek mini çökme hunisi testi a. Lifli, b. Lifsiz karışım

Karışımların lifsiz ve lifli olarak yayılma değerleri ölçülmüştür. Kontrol karışımı için liflerin topaklanmamasına aynı zamanda gözle görülür kanamaya sebep olmayacak miktarda yüksek oranda su azaltıcı kimyasal katkı kullanılarak yayılma sağlanmıştır. Kontrol karışımı için lifsiz halde 40 cm yayılma elde edildiğinde lifli halde topaklanma ve kanama meydana gelmeden akışkan bir karışım elde edilebilmiştir. Bu sebeple bütün karışımlar için lifsiz olarak 37-40 cm yayılma değeri hedef olarak belirlenmiş, her karışıma bu yayılma değerine ulaşmak için gerekli

miktarda katkı ilave edilmiştir. Özellikle silis dumanı içeren karışımlarda ise kullanılması gereken katkı miktarı kanamaya sebep olduğu için, kanama olmadan elde edilebilecek en yüksek yayılma değerine ulaşılmaya çalışılmıştır. Tablo 4.1'den de görüleceği gibi, beklendiği üzere karışımların tamamında lif ilavesi ile yayılma çaplarında belirgin düşüş gözlenmiştir. Silis dumanı içeren karışımlarda ise, kullanılan silis dumanının inceliğinden dolayı işlenebilirliği olumsuz etkilediği açıkça görülmüştür. Bu karışımlarda, 10 ve 12 cm yayılma çapına ancak ulaşılabilmiştir. Buna rağmen lif eklenmesi sonucunda elde edilen yayılma çaplarının diğer karışımlardan daha düşük olmasına rağmen kıyaslanabilir düzeyde kaldığı belirlenmiştir. Kontrol karışımı olan F 1.2 karışımına göre daha fazla uçucu kül içeren F 2.2 karışımında yayılma çapının arttığı gözlenmektedir. Bu durum bağlayıcı malzeme hacmindeki artış ve uçucu kül taneciklerinin küresel yapısının etkisiyle açıklanmaktadır. F 1.2 karışımının optimizasyonla elde edilen karışımlarda referans olarak alınmasından dolayı, karışımdaki bağlayıcı hacminin F 2,2'ye göre agrega optimizasyonu ile elde edilmiş olan i.a karışımına ise yayılmanın kontrol karışımına göre bir miktar azaldığı gözlenmektedir. Bu duruma agrega tanelerinin kilitleme etkisinin yol açtığı düşünülmektedir. Bağlayıcı optimizasyonu ile elde edilen i.b karışımında ise yayılmanın artmasına gerekçe olarak hacimce aynı miktarda bağlayıcı kullanılmasına rağmen, toplam bağlayıcı içindeki uçucu kül miktarının artmasından kaynaklandığı söylenebilir. Agregası ve bağlayıcının birlikte optimize edildiği karışımlar içerisinde ise agrega miktarının sabit tutulduğu ii.a karışımında, benzer karışım olan i.b'ye göre, yayılmanın bir miktar arttığı gözlenmektedir. Bu durum agrega optimizasyonu ile tane boyutunun değiştirilmesi sonucu ortaya çıkmıştır ve bütün toz malzemelerin birlikte optimizasyonun işlenebilirlik üzerine olumlu etkisinin bir göstergesidir. Ancak, yine bütün toz malzemelerin birlikte optimizasyonu ile elde edilmiş olan ve kontrol karışımı ile benzer özelliklere sahip ii.b karışımında ise yayılmanın belirgin biçimde azaldığı görülmektedir. Bu durum çimento miktarındaki artış, uçucu kül miktarındaki düşüş ve toplam bağlayıcı miktarının sabit tutulması sonucu yüksek miktarda agreganın karışımda bulunmasından kaynaklandığı şeklinde değerlendirilmektedir. Ancak ii.c karışımındaki gibi bağlayıcı/agrega ağırlık oranı sabit tutulduğunda hacim olarak daha yüksek miktarda bağlayıcının bulunması ve agrega hacminin azalması sonucu yayılma değeri önemli ölçüde artmıştır. Aynı ayrı optimizasyonla elde edilmiş bağlayıcı ve agregaların birlikte kullanıldığı iii. karışımında ise, agrega optimizasyonu nedeniyle agregaların kilitleme etkisiyle karışımın yayılma değerinin azalması beklenirken, karışımda bulunan yüksek miktarda uçucu kül ve bağlayıcı optimizasyonunun olumlu bir etkisi olarak yayılma değerlerini beklenenin aksine artmıştır. Silis dumanı içeren karışımlarda ise yayılma değerleri diğer karışımlara kıyasla oldukça düşük elde edilmiştir. Bu da silis dumanı miktarının sınırlandırılmasının yerinde bir karar olduğunu göstermektedir.

Tablo 4.1. Karışımların lifli ve liffsiz halde mini çökme hunisi yayılma değerleri

Karışım Kodu	Matris (cm)	TÇK (cm)
F 1.2	40.0	13.5
F 2.2	40.0	24.0
S 1.2	40.0	13.0
S 2.2	39.0	19.0
i.a	40.0	12.0
i.b	40.0	14.0
ii.a	40.0	14.5
ii.b	37.0	11.0
ii.c	40.5	16.5
iii	38.5	18.0
i.bs	10.0	8.0
ii.as	12.0	9.0

4.1.2 Boşluk Hacmi

Toz halindeki malzemelerin arasındaki boşluk miktarlarının belirlenmesi sonrasında, benzer şekilde TÇK matrisinin ve taze haldeki TÇK karışımının boşluk miktarları da belirlenmiştir. Daha önce standart mekanik sıkıştırma işlemine tabi tutulmuş numunelerin içindeki boşluk miktarı belirlenmişken (Tablo 4.2) sonuç raporunda laboratuvardaki gerçek döküm koşullarını temsil etmesi açısından, mekanik sıkıştırma yapılmadan yapılan dökümler sırasında boşluk miktarı da belirlenmiştir. Bu şekilde elde edilen matris ve TÇK'ların taze haldeki boşluk miktarları Tablo 4.3'de verilmiştir. Mekanik sıkıştırma ile oldukça düşük boşluk oranlarına ulaşılmış ve optimizasyonun boşluk miktarı üzerine olumlu etkisi gözlenmiştir.

Tablo 4.2. Mekanik olarak sıkıştırılmış TÇK'ların boşluk miktarı

Karışım kodu	Boşluk miktarı (%)
F 1.2	3.96
i.a	2.49
i.b	2.84
ii.a	1.44
ii.b	0.77
ii.c	0.42
iii	0.55

Normal döküm şartlarında elde edilen matris ve TÇK için boşluk miktarları ise daha yüksek olarak elde edilmiştir. Ancak bütün karışımlar için boşluk miktarının referans olarak alınan F 1.2 karışımına göre daha düşük olduğu, halen optimizasyonun olumlu etkisinin gözlemlendiği söylenebilir.

Tablo 4.3. Normal sıkıştırma şartlarında matris ve TÇK'daki boşluk oranı

Karışım Kodu	Matris (%)	TÇK (%)
F 1.2	1.93	4.69
F 2.2	1.56	3.65
S 1.2	0.13	1.04
S 2.2	0.08	1.03
i.a	0.80	2.59
i.b	1.00	3.06
ii.a	0.99	2.88
ii.b	1.49	3.07
ii.c	2.03	3.27
iii	1.42	3.04
i.bs	0.71	1.25
ii.as	0.68	1.73

4.2 Mekanik Özellikler

Yukarıda taze özellikleri verilmiş olan TÇK karışımlarının dökümü izleyen 7, 28 ve 90. günlerde sertleşmiş halde basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve sehim kapasiteleri belirlenmiştir.

4.2.1 Basınç Deneyi

Tablo 4.4 'de tüm karışımların 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları ile her yaş için hesaplanan standart sapma değerleri görülmektedir. Basınç dayanımı değerleri 3 adet numuneden elde edilen sonuçların ortalaması olarak hesaplanmıştır. Tablo 4.4'de verilen basınç dayanımı sonuçlarına göre, karışımlardaki puzolanik malzeme miktarının çimentoya oranının artmasıyla dayanımların özellikle erken yaşlarda düştüğü gözlenmiştir. Cüruf içeren karışımların dayanım değerlerinin uçucu kül içeren karışımlara göre tüm yaşlarda daha yüksek olduğu görülmektedir. Granüle yüksek fırın cürufunun sahip olduğu yüksek kendiliğinden bağlayıcılık özelliği sebebiyle bu beklenen bir durumdur. Uçucu küllü kontrol karışımları karşılaştırıldığında, daha yüksek miktarda uçucu kül içeren F 2,2 karışımının basınç

dayanımının daha düşük olması yine beklenen bir durumdur. Tane boyutu optimizasyonu yöntemi ile elde edilen karışımlarda ise en yüksek dayanım değerlerine ii.b karışımı ile ulaşılmıştır. Bu da karışımda yer alan yüksek miktardaki çimentodan ve karışımın diğerlerine kıyasla düşük su/bağlayıcı oranından kaynaklanmaktadır. i.a karışımı ile F 1,2 kontrol karışımı agrega gradasyonu dışında benzer karışım oranlarına sahip olmalarından dolayı birbirlerine yakın basınç dayanımı değerlerine ulaşmış olsalar da i.a karışımının özellikle 90 günlük basınç dayanımının daha yüksek olduğu görülmektedir. i.a karışımındaki agrega oranlarının optimizasyon ile elde edildiği de düşünüldüğünde, agrega boyut dağılımının optimize edilmesinin basınç dayanımı üzerine az da olsa etkisinin olduğu söylenebilir. Ancak, i.b ve ii.a karışımları arasında önemli bir farklılık görülmemektedir. i.b ve ii.a karışımlarının bağlayıcı kısmında çok az bir farklılık bulunmakla birlikte, kullanılan agrega boyutu farklıdır. Basınç dayanımı değerleri açısından en dikkat çekici karışım iii karışımıdır. Bu karışımda kullanılan bağlayıcı malzeme miktarı i.b karışımıyla aynı olmasına rağmen özellikle 7. günde dayanım değeri önemli ölçüde yüksek bulunmuştur. Dayanım yüksekliği ilerleyen yaşlarda da devam etmektedir. Bu durum iii karışımındaki bütün malzeme dağılımlarının optimizasyonla elde edilmiş olması nedeniyle, optimizasyonun dayanıma olumlu yönde katkısı olduğunu düşündürmektedir. Özetlemek gerekirse, en yüksek basınç dayanımları öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren karışımlarda elde edilmiştir. Daha sonra içeriğindeki çimento miktarı en fazla olan ii.b karışımı gelmektedir. Bunları i.a karışımı ve uçucu kül içeren F 1,2 kontrol karışımı ile F 2,2 kontrol karışımı takip etmektedir. Daha sonra tüm malzeme dağılımının optimize edilmesiyle oluşturulan iii karışımı sıralanmaktadır. Özellikle ileri yaşlarda i.b, ii.a, ve ii.c karışımlarının benzer basınç dayanımı değerlerine sahip oldukları görülmektedir. Silis dumanı içeren i.bs ve ii.as karışımları dikkate alındığında her iki karışımda da dayanım değerlerinin kontrol karışımı olan F1.2 karışımıyla benzer olduğu görülmektedir. Çimento miktarının kontrol karışımından düşük olmasına rağmen benzer dayanım değerleri elde edilmesi silis dumanının yüksek aktivitesine bağlanmaktadır. Çimento, uçucu kül, cüruf ve silis dumanı içeren dörtlü sistemde ise uçucu kül yerine cüruf içeren ii.as karışımı dikkate alındığında dayanım değerlerinin uçucu kül içeren karışıma göre önemli ölçüde farklılık göstermediği gözlenmektedir.

Tablo 4.4. TÇK karışımlarının basınç dayanımları

Karışım kodu	Basınç dayanımı (MPa) ± Standart sapma		
	7 gün	28 gün	90 gün
F 1.2	39,5 ± 1,54	60,1 ± 1,62	63,9 ± 2,13
F 2.2	31,0 ± 1,38	55,0 ± 3,22	60,5 ± 2,08
S 1.2	68,8 ± 2,46	81,8 ± 3,81	97,9 ± 2,85
S 2.2	55,1 ± 3,16	76,5 ± 1,80	83,9 ± 2,52
i.a	38,9 ± 2,12	60,5 ± 3,70	65,5 ± 1,85
i.b	21,4 ± 1,88	47,1 ± 2,40	54,7 ± 3,21
ii.a	20,7 ± 1,31	45,8 ± 0,44	56,3 ± 3,01
ii.b	48,9 ± 2,93	66,4 ± 3,81	78,9 ± 1,91
ii.c	20,2 ± 0,23	42,0 ± 1,03	58,1 ± 1,82
iii	27,1 ± 0,86	51,0 ± 1,39	60,9 ± 2,50
i.bs	36,2 ± 1,88	57,3 ± 1,64	62,8 ± 2,48
ii.as	37,9 ± 1,51	58,0 ± 2,90	64,1 ± 2,20

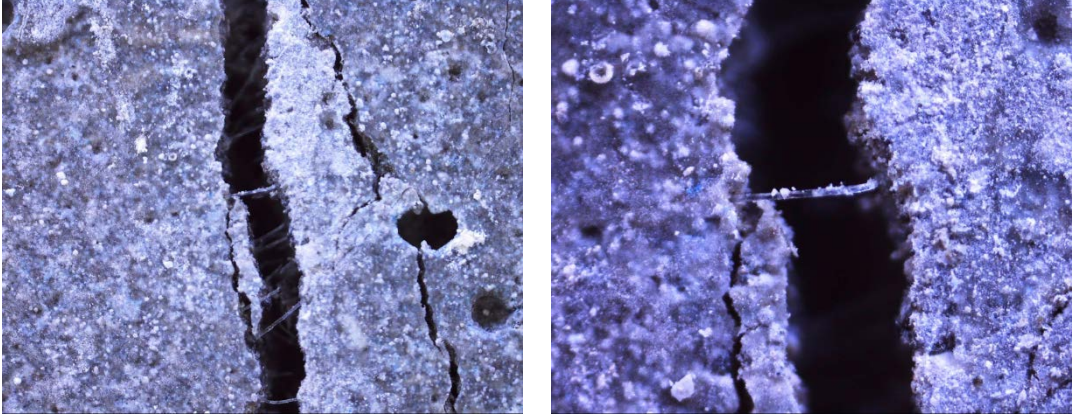
4.2.2 Eğilme Deneyi

Tablo 4.5’de, projede hazırlanan tüm TÇK karışımları için her biri 3 adet numunenin ortalamasından hesaplanan, 7, 28 ve 90 günlük eğilme dayanımları ve orta nokta sehim kapasiteleri ile standart sapma değerleri gösterilmektedir. Tablo 4.5’de görüldüğü üzere eğilme dayanımı değerleri zamanla artarken orta açıklık sehim değerleri azalmaktadır. Bu azalmanın sebebi dayanım ile birlikte matris kırılma tokluğunun zamanla artması ve zamanla şekil değiştirme sertleşmesi davranışının meydana gelmesinin daha da zorlaşmasıdır. Özellikle TÇK karışımları içerisinde en yüksek eğilme dayanımına sahip öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren karışımlarda bu etki daha açık görülmektedir. Burada yüksek kırılma tokluğunun yanı sıra cürufu karışımlarda matris ve PVA lif arasındaki bağın güçlü olması sebebiyle TÇK’larda arzu edildiği gibi liflerin sıyırılmasından ziyade kopması da etkilidir. Ayrıca, karışım içerisinden mineral katkı miktarının artmasıyla sehim değerlerinin de arttığı anlaşılmaktadır (Wang ve Li, 2007; Şahmaran ve Li, 2009). En fazla çimentoyu içeren ii.b karışımında yüksek eğilme dayanımı ve düşük sehim kapasitesi elde edilmiştir. ii.b karışımında sehim değerlerinin oldukça düşük olmasında karışımdaki çimento miktarının fazla olmasının yanında agrega miktarının fazla olmasının da etkili olduğu düşünülmektedir. Zira diğer faktörler sabit kaldığında, karışımdaki agrega miktarının artması matris kırılma tokluğunu attırmaktadır. Yine iii karışımında bağlayıcı benzer karışımlara göre yüksek eğilme dayanımı değerlerine ulaşılmasına rağmen sehim değerlerinde belirgin azalmalar meydana gelmemiştir. TÇK karışımları arasında eğilme dayanımları karşılaştırıldığında basınç dayanımlarına benzer

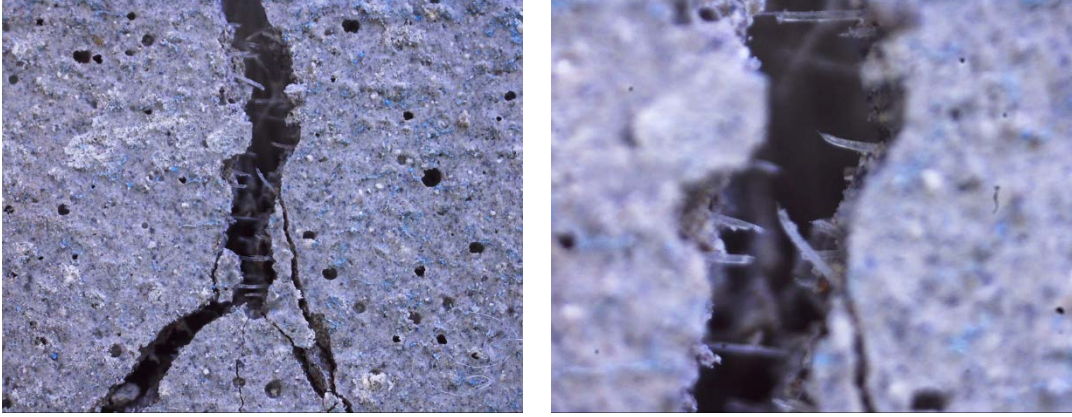
şekilde sıralandığı görülmektedir. Sehim kapasiteleri ise genel olarak dayanımla ters orantılı şekilde sıralanmıştır. Bu durum dayanımın artmasıyla kırılma tokluğunun da artmasından dolayı çoklu çatlak davranışının olumsuz etkilenmesine bağlanabilir. Optimizasyon metodu ile elde edilen i.b, ii.a ve ii.c karışımları yine benzer sonuçlar vermiştir. Silis dumanı içeren karışımlar dikkate alındığında silis dumanın etkisiyle dayanımlarda artış olduğu, bununla birlikte deformasyon kapasitesinin de düştüğü görülmektedir. Silis dumanı içeren karışımlardaki deformasyon kapasitesindeki düşüş, lif matris arayüzündeki kimyasal bağın silis dumanı içeren karışımlarda yüksek olması sebebiyle liflerin sıyrılmak yerine (Şekil 4.3) matrisle birlikte hareket ederek Şekil 4.4'de görüldüğü gibi kopmasından da kaynaklandığı düşünülmektedir (Wang ve Li, 2007). Ancak agrega ve bağlayıcının birlikte optimize edilmesi ile dayanımların bir miktar daha yüksek elde edilmesine rağmen, sehim kapasitelerinin, bağlayıcı miktarı sabit tutularak yapılan optimizasyona göre daha fazla olması, birlikte optimizasyonun olumlu etkisi olarak değerlendirilebilir.

Tablo 4.5. TÇK karışımlarının eğilme altında özellikleri

Karışım kodu	Eğilme dayanımı(MPa) ± Standart sapma			Orta açıklık sehimi (mm) ± Standart sapma		
	7 gün	28 gün	90 gün	7 gün	28 gün	90 gün
F 1.2	8,4 ± 0,68	9,0 ± 0,34	10,0 ± 0,45	6,45 ± 1,00	4,65 ± 0,30	4,50 ± 0,35
F 2.2	7,5 ± 0,26	8,3 ± 0,49	8,8 ± 0,09	7,35 ± 1,10	6,00 ± 0,85	5,70 ± 0,44
S 1.2	10,1 ± 0,39	12,9 ± 0,85	13,7 ± 0,32	3,92 ± 0,60	3,18 ± 0,34	2,88 ± 0,20
S 2.2	9,2 ± 0,22	12,0 ± 0,88	12,6 ± 0,34	4,22 ± 0,55	3,68 ± 0,50	3,27 ± 0,68
i.a	8,8 ± 0,64	10,2 ± 0,84	10,9 ± 0,52	6,27 ± 0,47	4,80 ± 0,77	4,45 ± 0,36
i.b	6,8 ± 0,58	8,0 ± 0,14	8,4 ± 0,18	6,47 ± 1,18	5,64 ± 0,72	5,41 ± 0,27
ii.a	6,7 ± 0,29	8,4 ± 0,57	8,6 ± 0,15	6,60 ± 0,73	5,22 ± 0,45	5,07 ± 0,52
ii.b	9,7 ± 0,41	11,6 ± 0,52	12,8 ± 0,73	3,27 ± 0,34	2,97 ± 0,10	2,75 ± 0,14
ii.c	6,9 ± 0,52	8,2 ± 0,71	9,0 ± 0,51	7,08 ± 1,49	5,49 ± 0,77	5,16 ± 0,39
iii	8,7 ± 0,17	9,8 ± 0,28	10,6 ± 0,40	6,65 ± 0,67	5,03 ± 0,19	4,93 ± 0,31
i.bs	8,1 ± 0,75	9,1 ± 0,32	9,5 ± 0,57	6,15 ± 1,16	4,11 ± 0,25	3,36 ± 0,42
ii.as	8,5 ± 0,46	9,3 ± 0,58	9,7 ± 0,24	6,56 ± 0,37	4,63 ± 0,52	3,82 ± 0,30



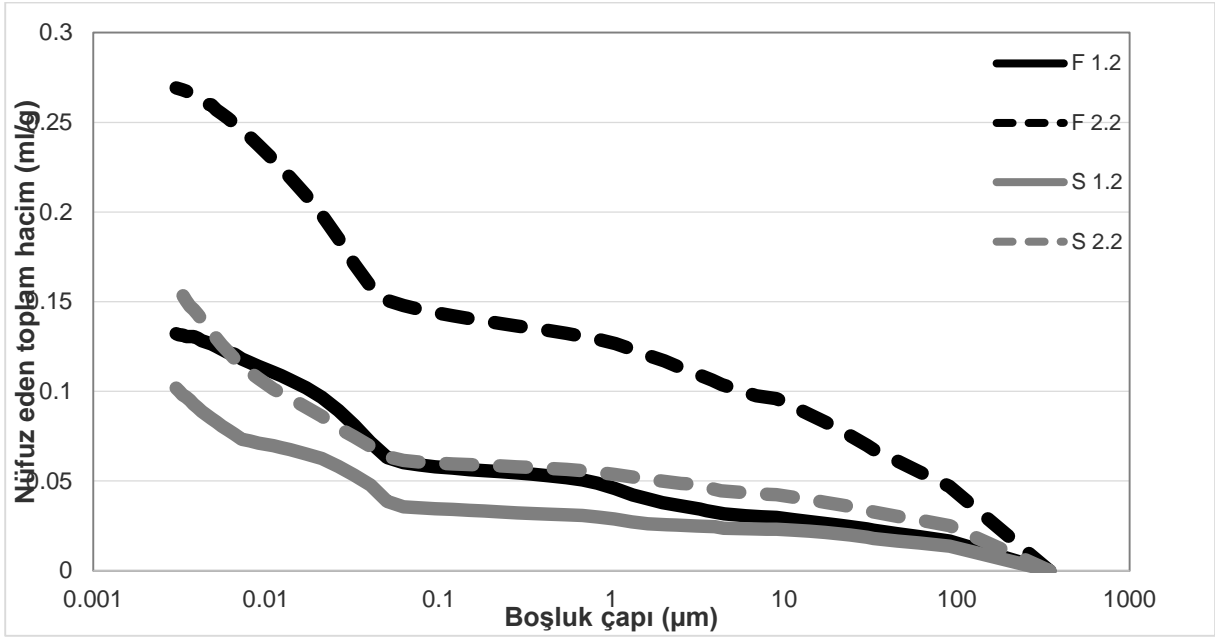
Şekil 4.3. Liflerin çatlağın iki yakasını köprülemesi



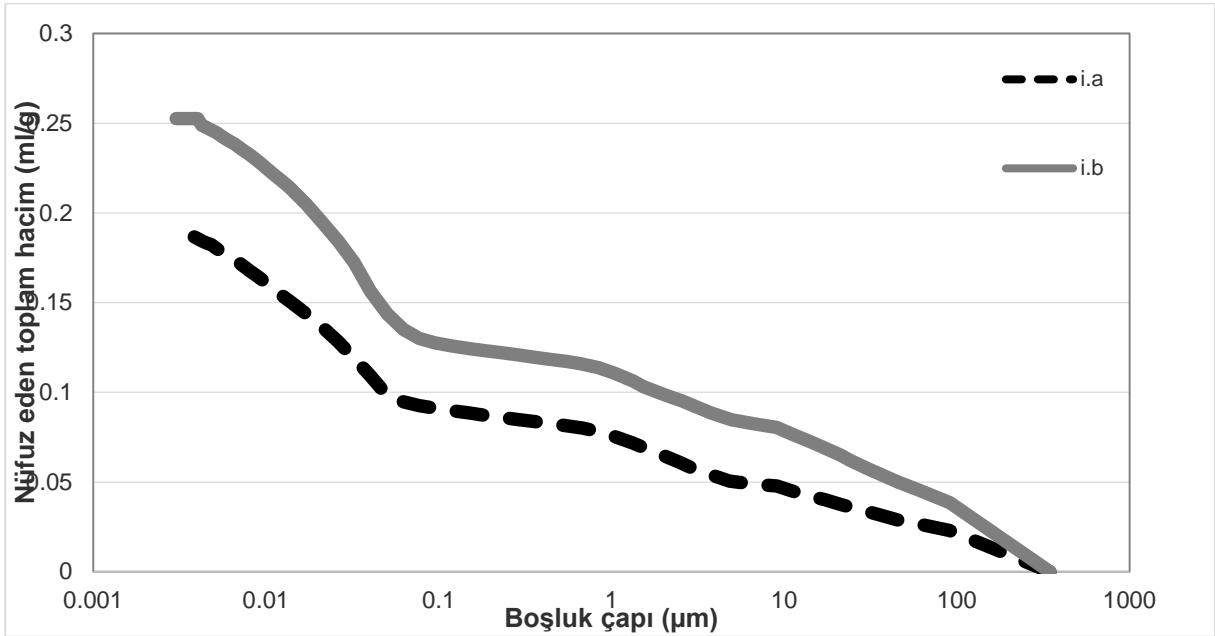
Şekil 4.4. Silis dumanı içeren karışımlarda lif kopması

4.2.3 Civalı Porozimetre Sonuçları

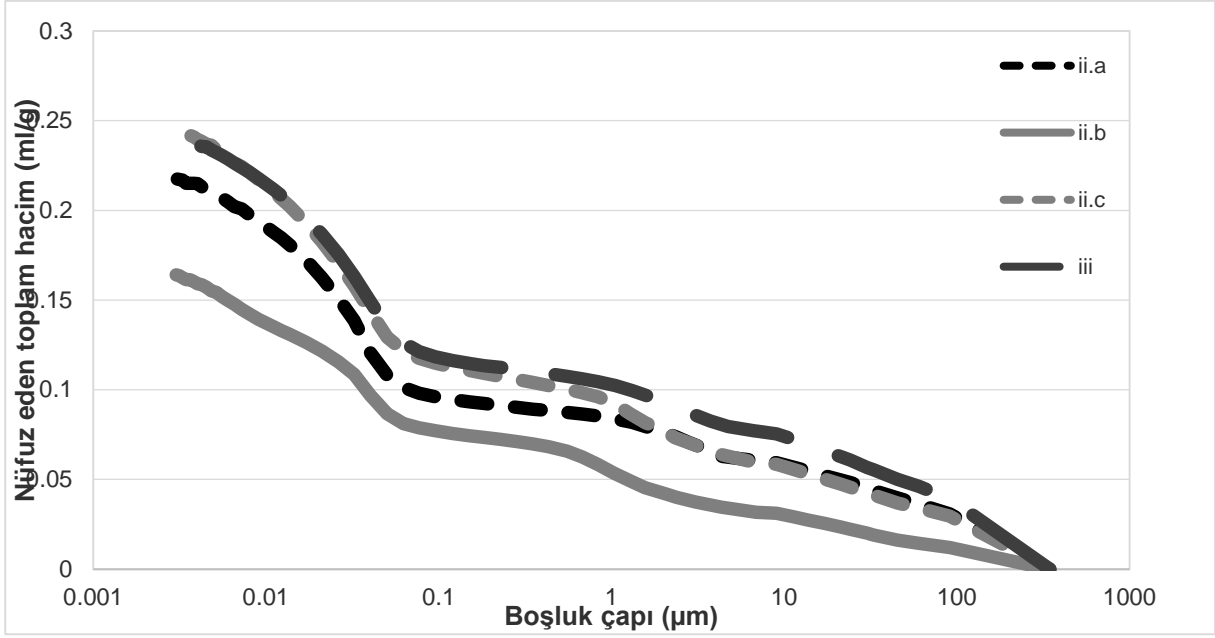
TÇK karışımlarının dökülmesini izleyen 28. günde sertleşmiş TÇK numunelerinin içindeki boşluk dağılımları civalı porozimetre ölçümleri ile belirlenmiştir. 28 günlük numunelerin parçalanması, alkol içerisinde tutularak hidrasyonun durdurulması ve vakumlu fırında boşluklardaki suyun kurutulması işlemlerinin ardından bütün karışımlardaki boşluk dağılımlarının analizi Afyon Kocatepe Üniversitesi Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezinde yaptırılmıştır. Elde edilen boşluk dağılımları kontrol karışımı olan F 1.2 ile karşılaştırmalı olarak aşağıdaki grafiklerde (Şekil 4.5-4.8) sunulmuştur.



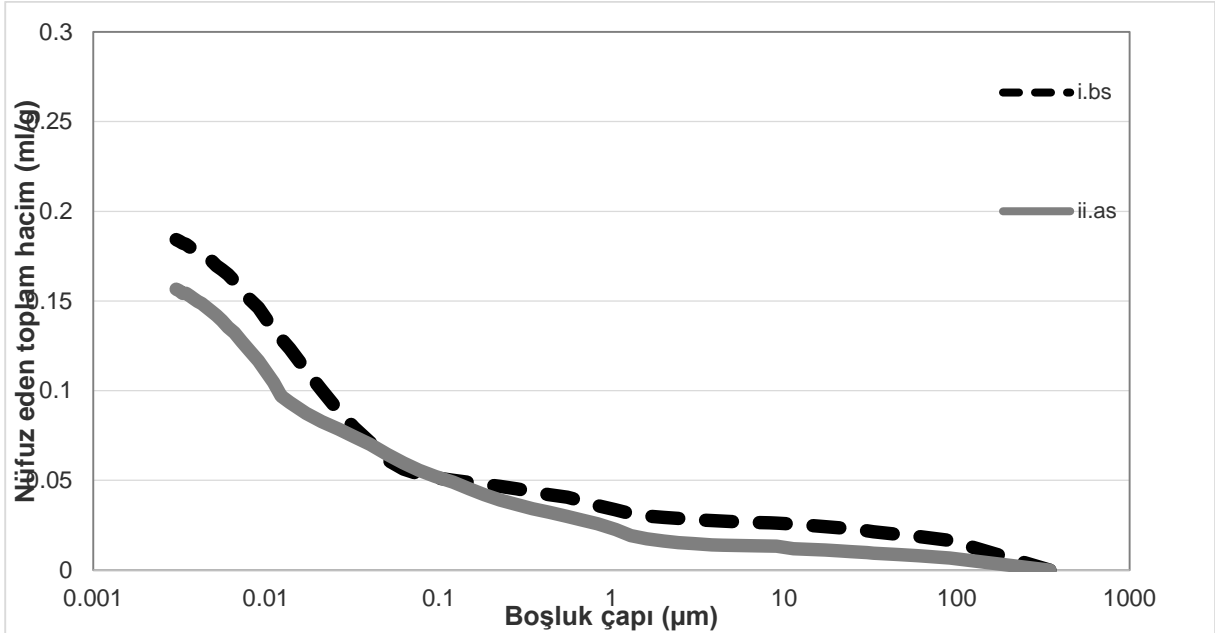
Şekil 4.5. Standart TÇK karışımlarının boşluk dağılımları



Şekil 4.6. Agrega ve bağlayıcının ayrı optimizasyonu için boşluk dağılımları



Şekil 4.7. Agrega ve bağlayıcının birlikte optimizasyonu için boşluk dağılımları



Şekil 4.8. Silis dumanı içeren karışımların boşluk dağılımları

Yukarıdaki grafiklerden de görüleceği üzere, kontrol karışımı olan F1.2 karışımına göre toplam boşluk miktarının optimizasyonla elde edilmiş karışımlarda daha yüksek olduğu görülmektedir. Civalı porozimetre deney sonuçlarının incelenmesi sonucu, 28 günlük numunelerden elde edilen toplam porozite ve ortalama boşluk çapı değerleri Tablo 4.6'da verilmiştir. Tablo 4.6'daki

değerler dikkate alındığında, elde edilen sonuçların taze haldeki boşluk miktarlarıyla bağlantısının bulunmadığı anlaşılmaktadır. Her ne kadar optimizasyon ile taze haldeki boşluk miktarı düşürülmüşse de, sertleşmiş haldeki gözenek yapısının bağlayıcı malzemenin türü, miktarı ve agrega boyut ve miktarı ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Şekil 4.7'deki boşluk dağılımlarının incelenmesi sonucunda, genel olarak bağlayıcı miktarı arttıkça boşluk yapısının küçüldüğü görülmektedir. Cürufun ve silis dumanının boşluk yapısını incelttiği ve toplam boşluk miktarını azalttığı görülmektedir. Bunun yanı sıra çimento miktarının fazla olması da aynı şekilde daha ince bir boşluk yapısı sağlamaktadır. Uçucu kül ise diğer bağlayıcılara oranla boşluk yapısı üzerinde daha etkisizdir. Agrega boyutunun optimizasyonla belirlenmesi özellikle ii.a ve iii karışımlarındaki boşluk miktarı ve boyutunu düşürmektedir. Ancak karışımlarda genel olarak çimento miktarının optimizasyonla daha düşük elde edilmesine rağmen, benzer çimento miktarına sahip F 2.2 karışımına göre karışımların tamamında daha düşük porozite elde edilmiş olması optimizasyonun olumlu etkisini göstermektedir. Bununla birlikte ortalama boşluk çapı düşük olan karışımların aynı zamanda daha yüksek dayanım göstermesi ile boşluk yapısının incelenmesi yani jel boşluğu miktarının artması durumunda dayanım değerlerinin de arttığı anlaşılmaktadır.

Tablo 4.6. Karışımların ortalama boşluk çapı ve poroziteleri

	Ortalama boşluk çapı (nm)	Porozite (%)
F 1.2	22,8	29,08
F 2.2	25,7	39,21
S 2.1	12,4	19,72
S 2.2	12,6	27,9
i.a	23,6	31,6
i.b	29,8	37,91
ii.a	25,6	34,38
ii.b	22,5	28,45
ii.c	28,6	37,03
iii	27,5	36,81
i.bs	15,4	30,63
ii.as	14,3	26,00

4.3 Kendiliğinden İyileşme Özellikleri

4.3.1 Eğilme Deneyi

Proje kapsamında üretilen 50x75x360 mm boyutundaki kiriş numuneleri 28. günlerinde ön yüklemeye maruz bırakılmış, ve 28. gün de dahil olmak üzere izleyen 15, 30, 60 ve 90. günlerin

her birisi için 3 adet hasarlı ve 3 adet de sağlam numune yine eğilme altında test edilmiştir. 28. günde ön yüklemeye maruz bırakılan numuneler, sağlam numunelerle birlikte yeniden test edilecekleri yaşa kadar su altında kür edilmişlerdir. Her bir deney yaşı için elde edilen sonuçlar Tablo 4.7 ve Tablo 4.8’de sunulmaktadır.

Tablo 4.7. Sağlam numunelerden elde edilen eğilme deneyi sonuçları

Karışım kodu	28+0 gün		28+15 gün		28+30 gün		28+60 gün		28+90 gün	
	dayanım	sehim	dayanım	sehim	dayanım	sehim	dayanım	sehim	dayanım	sehim
	MPa	mm	MPa	mm	MPa	mm	MPa	mm	MPa	mm
F 1.2	9,0	4,7	9,6	4,5	10,1	4,5	10,5	4,4	10,7	4,2
F 2.2	8,3	6,0	8,5	6,2	8,6	5,5	9,0	5,3	10,4	4,8
S 1.2	12,9	3,2	13,0	3,3	14,0	3,0	13,0	2,6	14,1	2,3
S 2.2	12,6	3,9	13,0	3,3	13,0	3,1	13,2	3,1	14,2	3,0
i.a	10,2	4,8	9,9	4,6	9,5	4,3	11,5	4,3	11,8	4,1
i.b	8,0	5,6	8,3	5,5	8,7	5,4	8,8	5,3	9,7	5,2
ii.a	8,4	5,3	8,8	5,2	9,0	5,0	9,1	5,1	10,1	5,0
ii.b	11,6	3,0	11,7	3,3	12,7	2,8	12,8	2,8	13,6	2,4
ii.c	8,2	5,5	9,0	5,4	9,1	4,8	9,2	5,3	10,0	5,2
iii	9,8	5,0	10,5	4,7	11,3	4,4	11,7	4,5	11,9	4,2
i.bs	9,1	4,6	10,2	3,8	10,7	2,9	11,2	2,5	11,5	2,4
ii.as	9,3	4,1	10,4	3,5	10,9	2,7	11,8	2,4	12,3	2,3

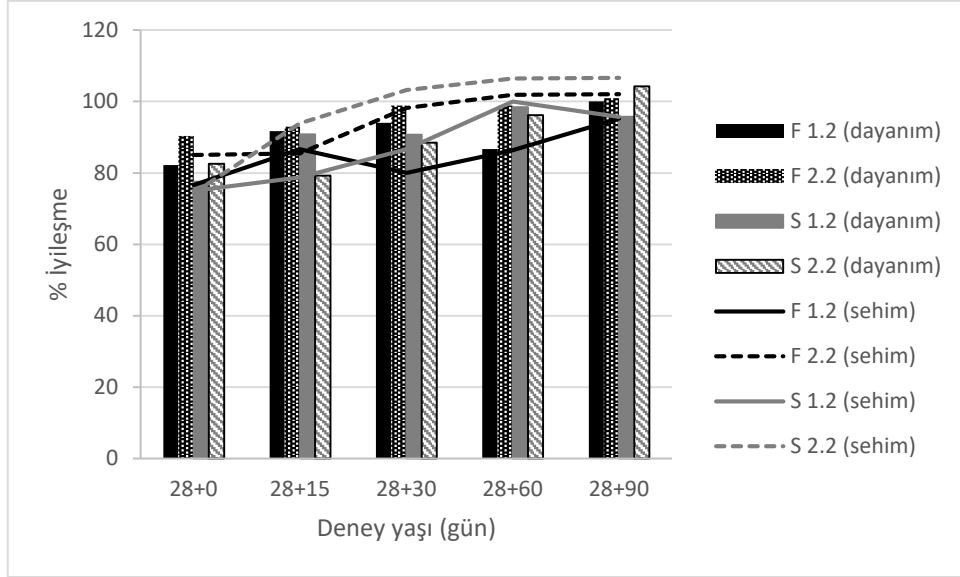
Tablo 4.8. Hasarlı numunelerden elde edilen eğilme deneyi sonuçları

Karışım kodu	28+0 gün		28+15 gün		28+30 gün		28+60 gün		28+90 gün	
	dayanım	sehim	dayanım	sehim	dayanım	sehim	dayanım	sehim	dayanım	sehim
	MPa	mm	MPa	mm	MPa	mm	MPa	mm	MPa	mm
F 1.2	7,4	3,6	8,8	3,9	9,5	3,6	9,1	3,8	10,7	4,0
F 2.2	7,5	5,1	7,9	5,3	8,5	5,4	8,9	5,4	10,1	4,9
S 1.2	10,0	2,4	11,8	2,6	12,7	2,6	12,8	2,6	13,5	2,2
S 2.2	10,4	2,9	10,3	3,1	11,5	3,2	12,7	3,3	14,8	3,2
i.a	8,4	3,7	8,8	3,0	9,5	3,7	9,7	4,0	10,9	4,2
i.b	6,6	4,2	6,9	4,3	7,5	4,9	8,7	5,3	9,3	5,0
ii.a	6,4	3,5	6,8	3,4	7,3	3,5	7,7	3,6	9,5	4,8
ii.b	7,9	1,9	8,1	2,2	10,7	2,7	11,5	2,7	12,1	2,5
ii.c	7,5	4,5	8,2	4,7	9,0	4,9	9,4	5,6	9,9	5,4
iii	8,2	3,5	9,2	3,9	10,5	4,1	11,2	4,3	11,6	4,3
i.bs	6,6	2,9	7,8	3,2	9,9	2,5	10,9	2,4	11,2	2,5
ii.as	6,5	2,3	8	2,6	10,1	2,4	10,8	2,3	11,9	2,2

Yukarıda verilen sonuçlar ışığında her bir optimizasyon için ayrı ayrı değerlendirme yapılmıştır. Her bir değerlendirme için sonuçlar ayrıca Şekil 4.9 – Şekil 4.12’de dayanım ve sehim değerleri olarak birlikte sunulmuştur.

Standart TÇK karışımlarında iyileşmenin değerlendirilmesi:

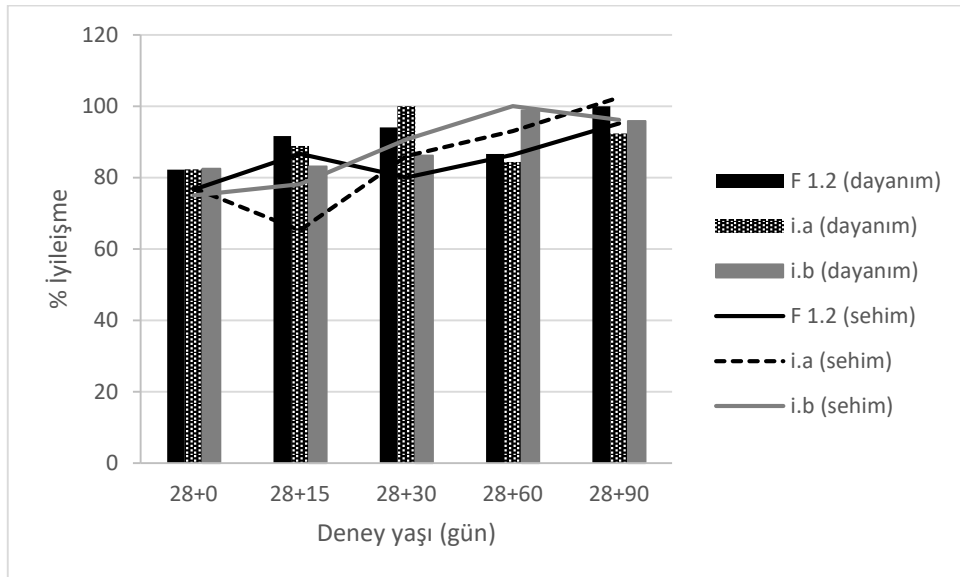
Proje kapsamında kontrol karışımı olarak kullanılan F 1.2 karışımı ve literatürde sıklıkla kullanılan F 2.2, S 1.2 ve S2.2 karışımları için her deney yaşında hasarlı numunelerden elde edilen sonuçların sağlam numunelerden elde edilenlere oranı dikkate alındığında, zamana bağlı olarak bütün numunelerde eğilme dayanımlarının sağlam numunelerin değerlerine yaklaştığı görülmektedir. Aynı şekilde sehim kapasiteleri de zamanla sağlam numunelerin değerlerine yaklaşmıştır. Bu da bütün numuneler için mekanik özelliklerde iyileşmenin gerçekleştiğine işaret etmektedir. İyileşme yüzdeleri dikkate alındığında numunelerin sağlam numunelerin dayanım değerlerine oldukça yaklaştıkları görülmektedir. Ön yükleme sırasında uçucu kül içeren numunelerin dayanım kaybının cürufli karışımlara göre daha düşük olduğu, bununla birlikte uçucu kül veya cüruf miktarı arttığında bu dayanım kaybının daha az olduğu anlaşılmaktadır. İyileşme oranı yüksek oranda çimento ikame malzemesi içeren karışımlarda daha yüksek gerçekleşmiştir. Ön yüklemeyi izleyen 90. Günün sonunda S 1.2 hariç tüm karışımlar sağlam numunelerin değerlerini yakalamışlardır. Sehim kapasitesinde meydana gelen iyileşme incelendiğinde, özellikle yüksek miktarda çimento ikame malzemesi içeren F 2.2 ve S 2.2 karışımlarının kısa sürede kapasitelerini yeniden kazandığı görülmektedir. Ancak uçucu kül içeren karışımların sehim kapasitesinin cüruf içerenlere kıyasla sağlam haldeki sehim kapasitelerinin yüksek olması dikkate alındığında, uçucu kül içeren karışımların cüruf içeren karışımlara göre hasarlı halde bile önemli ölçüde sehim gösterdikleri söylenebilir.



Şekil 4.9. Standart karışımlar için iyileşme yüzdeleri

Agrega ve bağlayıcının ayrı optimizasyonu ile elde edilen karışımlarda kendiliğinden iyileşme:

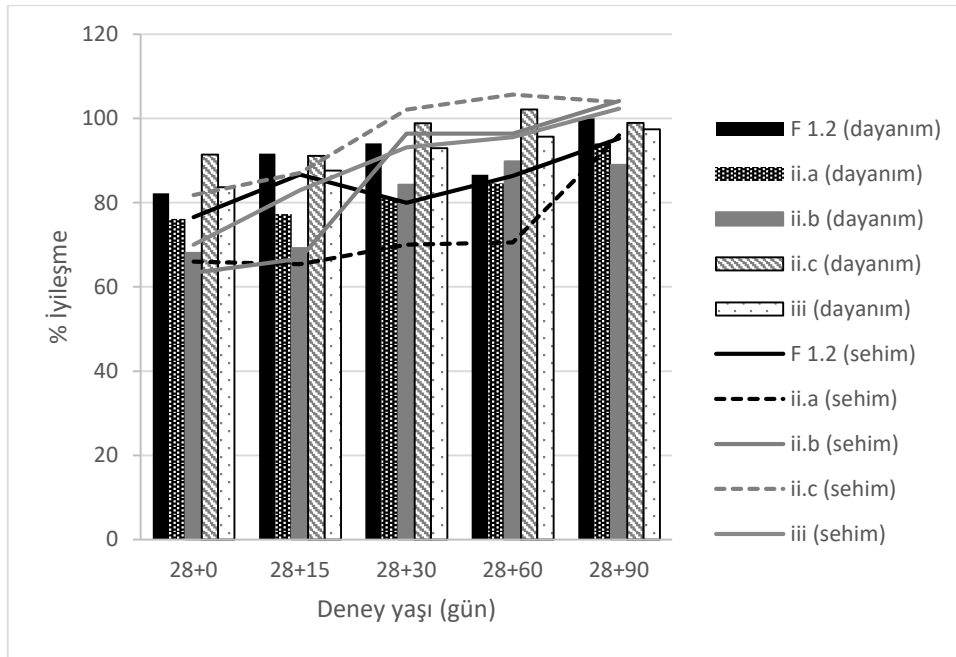
Agreganın ve bağlayıcının ayrı ayrı optimizasyonu sonucu elde edilen karışımlardan agrega kısmının optimize edildiği i.a karışımının eğilme dayanımının ön yüklemeyi izleyen 30. günde sağlam numuneleri yakaladığı ancak ilerleyen yaşlarda sağlam numunelerin biraz altında kaldığı görülmektedir. Sehim kapasitesi bakımından ise kontrol karışımı olan F 1.2 karışımına göre daha hızlı bir iyileşme gösterdiği söylenebilir. Bağlayıcı optimizasyonun ile elde edilen i.b karışımının hem dayanım hem de sehim kapasitesi bakımından hem kontrol hem de i.a karışımına göre daha iyi bir performans gösterdiği görülmektedir.



Şekil 4.10. Ayrı optimizasyon karışımları için iyileşme yüzdeleri

Agrega ve bağlayıcının birlikte optimizasyonu ile elde edilen karışımlarda kendiliğinden iyileşme:

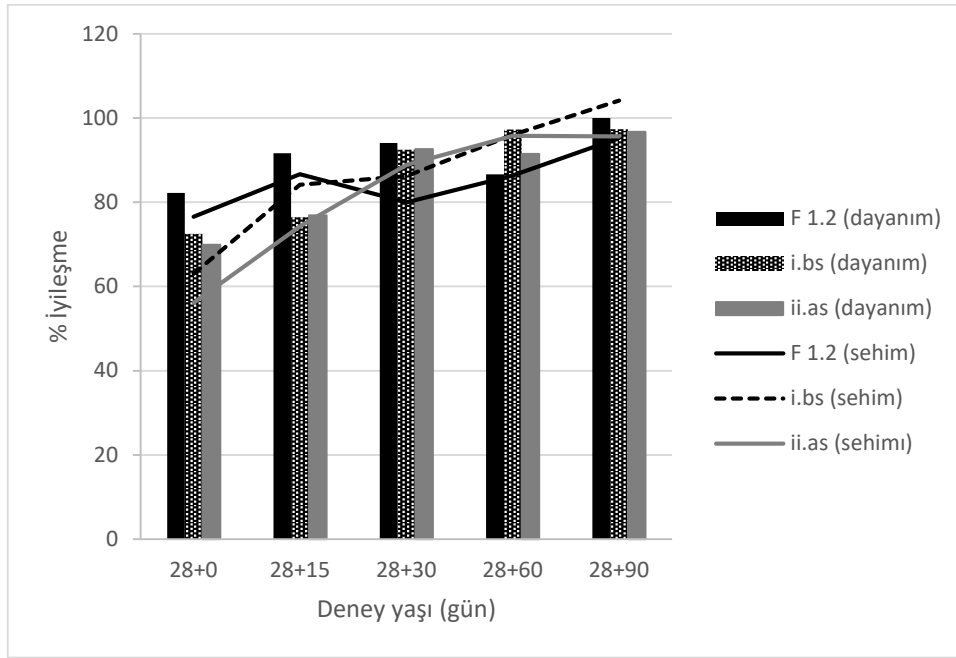
Karışım içerisindeki toz malzemelerin tamamının kullanılması ile elde edilen karışımların eğilme özellikleri bakımından kendiliğinden iyileşme performansı incelendiğinde, bağlayıcı ağırlığı sabit tutularak agrega kısmı optimize edilen ii.b karışımının diğer karışımlara göre oldukça kötü bir performans sergilediği dikkat çekmektedir. Bu durumun ise ii.b karışımının ön yükleme sırasında dayanımının daha fazla düşmesinden kaynaklandığı düşünülebilir. Ancak aynı karışımın sehim değerlerinin kısa sürede sağlam numuneler seviyesine geldiği gözlenirse de bunun sebebi sağlam numunelerin de sehim kapasitesinin oldukça düşük olmasıdır. Bununla birlikte en iyi kendiliğinden iyileşme performansını ise hem dayanım hem de sehim değerleri bakımından agrega/bağlayıcı oranının sabit tutulduğu ii.c karışımı göstermiştir. iii karışımı ise benzer bir karışım olup sadece agrega boyutları farklı olan i.b karışımına göre hem sehim hem de dayanım bakımından ön yüklemeyi izleyen 60. güne kadar daha iyi bir kendiliğinden iyileşme göstermiştir. Benzer durum F 1.2 ve i.a karışımları arasında da gözlenmiştir. Bu durumda agrega optimizasyonunun erken yaşlardaki iyileşme performansını arttırdığı söylenebilir.



Şekil 4.11. Birlikte optimizasyon için iyileşme yüzdeleri

Silis dumanı içeren karışımlarda kendiliğinden iyileşme:

Silis dumanı içeren karışımların kendiliğinden iyileşme performansı incelendiğinde her iki karışımın da kendiliğinden iyileşme gösterdiği, zamana bağlı olarak da hasarlı numunelerden elde edilen değerlerin sağlam numunelere yaklaştığı görülmektedir. Ancak iki karışımın da dayanım değerleri sağlam numunelerin dayanım değerlerini yakalayamamıştır. Bu karışımlarda ön yükleme hem dayanımda hem de sehım kapasitesinde oldukça önemli bir düşüş oluşturmuştur. Ancak i.bs karışımının ön yükleme sonrası 90. günde sağlam numunelerin sehım kapasitesine ulaştığı görülmektedir.



Şekil 4.12. Silis dumanı içeren karışımları için iyileşme yüzdeleri

4.3.2 Ultrases Dalga Hızı

Eğilme deneyi dışında kiriş numuneler üzerine uygulanan bir başka test ise ultrases geçiş hız testidir. 28. Günlerinde hasara uğratılmış kiriş numuneleri üzerinden, ön yüklemenin hemen ardından ve yine ön yüklemeyi izleyen 15, 30, 60 ve 90. günlerde dolaylı iletim yöntemiyle ultrases geçiş hızı ölçümleri alınmış ve aynı yaşlardaki sağlam numuneler ile karşılaştırılarak kendiliğinden iyileşmenin derecesi anlaşılmasına çalışılmıştır. Sağlam ve hasarlı numunelerden elde edilen sonuçlar Tablo 4.9 ve Tablo 4.10'da sunulmuştur.

Tablo 4.9. Sağlam numuneler için ultrases hızları

Karışım Kodu	28+0 gün (m/s)	28+15 gün (m/s)	28+30 gün (m/s)	28+60 gün (m/s)	28+90 gün (m/s)
F 1.2	4525	4597	4792	4923	5064
F 2.2	4343	4478	4627	4699	4769
S 1.2	4950	5089	5155	5376	5435
S 2.2	4934	4998	5098	5107	5238
i.a	4539	4751	4827	4902	5102
i.b	4323	4420	4495	4702	4765
ii.a	4131	4316	4458	4563	4666
ii.b	4573	4621	4769	5137	5246
ii.c	4533	4675	4752	4883	5082
iii	4215	4377	4571	4660	5247
i.bs	4580	4702	4823	4882	4947
ii.as	4862	4924	5031	5126	5152

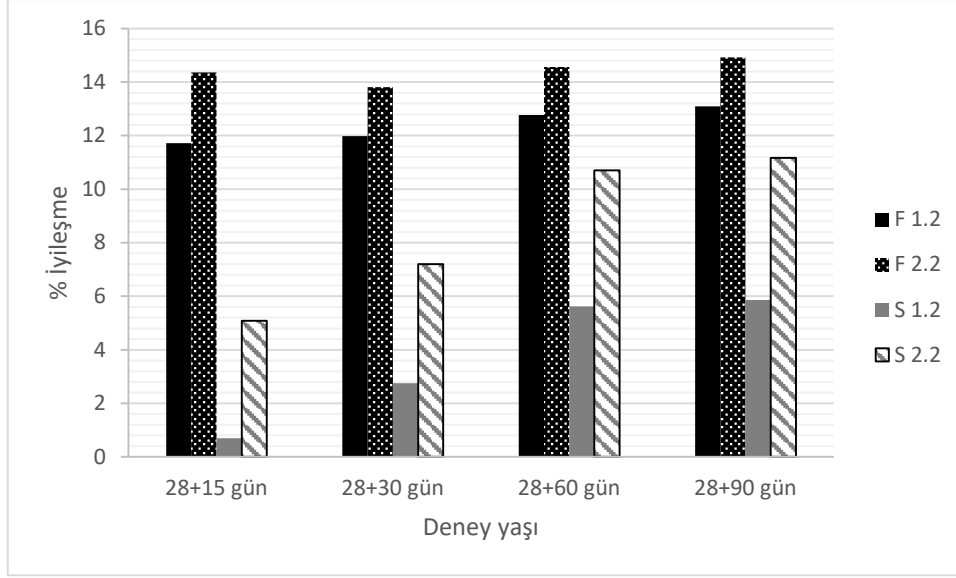
Tablo 4.10. Hasarlı numuneler için ultrases hızları

Karışım Kodu	28+0 gün (m/s)	28+15 gün (m/s)	28+30 gün (m/s)	28+60 gün (m/s)	28+90 gün (m/s)
F 1.2	3871	4386	4563	4706	4839
F 2.2	3760	4417	4525	4616	4690
S 1.2	4346	4498	4645	4964	5026
S 2.2	4293	4567	4745	4903	5037
i.a	3961	4392	4492	4562	4857
i.b	3695	3798	4203	4518	4742
ii.a	3502	4074	4281	4444	4584
ii.b	3720	4292	4414	4714	5046
ii.c	3800	4016	4275	4458	4706
iii	3823	4158	4357	4445	5047
i.bs	4194	4425	4560	4616	4667
ii.as	4344	4413	4582	4709	4839

Standart TÇK karışımlarında iyileşmenin değerlendirilmesi:

Kontrol karışımı olan F 1.2 ve diğer standart karışımların ultrases dalga hızları dikkate alındığında cürufli karışımların ultrases hızlarının uçucu kül içerenlere göre daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Ultrases hızının elastisite modülü ile doğru, boşluk oranı ile ters orantılı olduğu dikkate alındığında bu durum normaldir. Aynı zamanda çimento ikame malzemesinin fazla olması ultrases hızını düşürmektedir. Zamana bağlı olarak sağlam numunelerin ultrases hızında F 1.2, F 2.2, S 1.2 ve S 2.2 karışımları için sırasıyla %12, %10, %10 ve %6 artış gerçekleşmiştir. Bu artış hasarlı numuneler için sırasıyla, %25, %25, %16 ve % 17 olarak

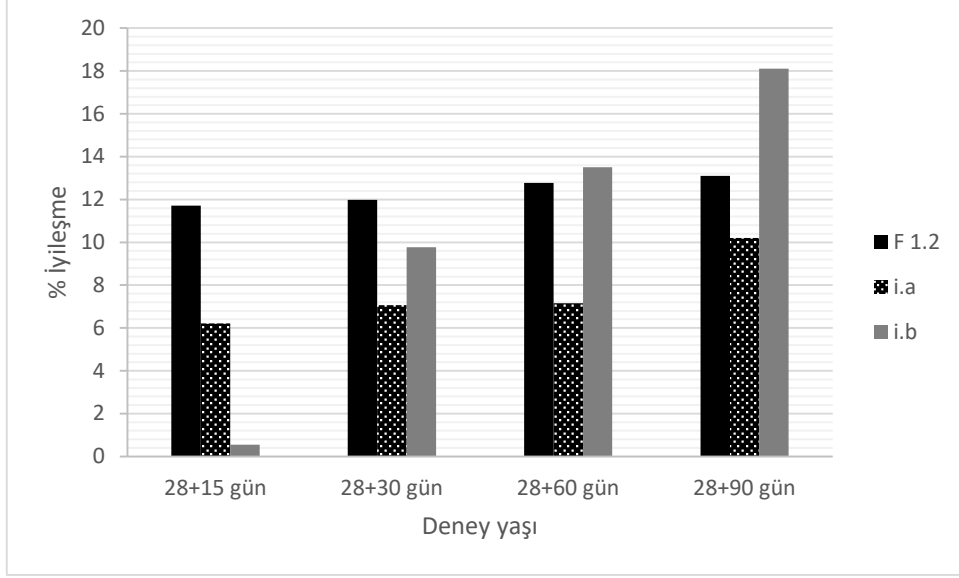
gerçekleşmiştir. Aradaki farkın kendiliğinden iyileşmeden kaynaklı olarak değerlendirilmesiyle, en iyi kendiliğinden iyileşme performansının F 2.2, ardından F 1.2 karışımlarınca gösterildiği, bu karışımları S 2.2 ve S 1.2 karışımlarının izlediği görülmektedir.



Şekil 4.13. Standart karışımların ultrases hızındaki iyileşme yüzdesi

Agrega ve bağlayıcının ayrı optimizasyonu ile elde edilen karışımlarda kendiliğinden iyileşme:

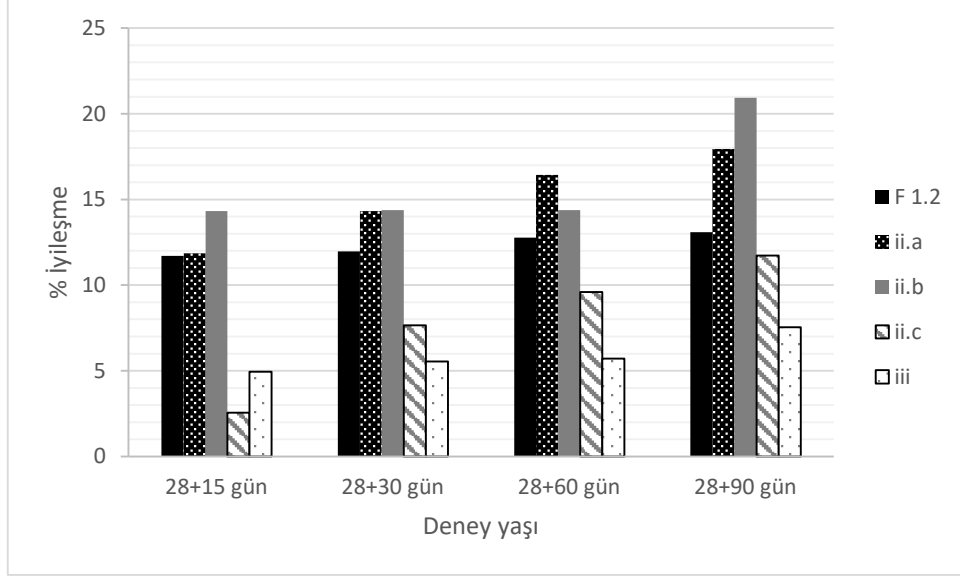
Sadece bağlayıcı kısmı ve sadece agrega kısmı optimizasyonla belirlenen i.a ve i.b karışımlarının ultrases hızı bakımından kendiliğinden iyileşme performansları incelendiğinde, i.a karışımının kontrol karışımı olan F 1.2 karışımına benzer bir şekilde iyileştiği, nihayetinde benzer ön yüklemeyi izleyen 90. gün sonunda benzer ultrases hızlarına ulaştıkları görülmektedir. Ancak iyileşme oranı F 1.2 karışımında daha yüksek bulunmuş ve bunun sebebi de ön yükleme sonunda ultrases hızlarının F 1.2 karışımı için daha düşük değerlere düşmesine bağlanmıştır. Bu kategorideki i.b karışımı ise en yüksek iyileşme yüzdesine ulaşmaktadır. Bu karışımdaki yüksek miktardaki uçucu külün bu iyileşme oranına ulaşmadaki en önemli faktör olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.14. Ayrı optimizasyon karışımlarının ultrases hızında iyileşme yüzdesi

Agrega ve bağlayıcının birlikte optimizasyonu ile elde edilen karışımlarda kendiliğinden iyileşme:

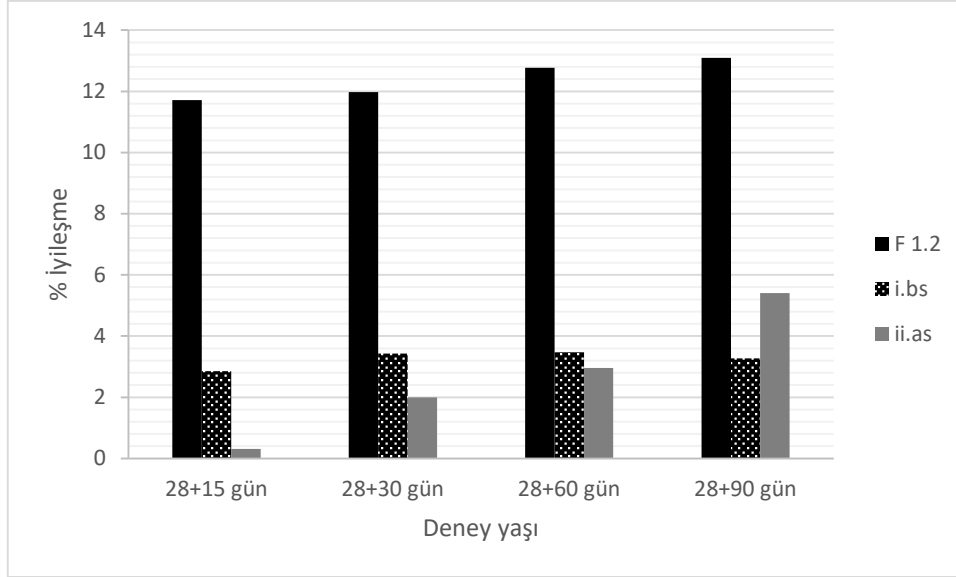
Bu kategorideki karışımların kendiliğinden iyileşme performansları incelendiğinde, bütün karışımların belirli oranlarda kendiliğinden iyileşme gösterdiği, hasarlı karışımlarda görülen ultrases hızı artışının sağlam numunelerden her zaman daha yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte sağlam ve hasarlı numunelerin ön yükleme sonrası 90. gündeki ultrases hızları karşılaştırıldığında ii.b ve iii karışımları en yüksek değerlere ulaşmış, bununla birlikte sağlam numunelerinin ultrases değerleri de yüksek olduğundan kendiliğinden iyileşme oranı iii karışımında nispeten düşük kalmıştır. En yüksek kendiliğinden iyileşme oranı ise yine ii.b karışımında gerçekleşmiştir. Bu karışım içerisindeki bağlayıcının büyük oranda çimento olması ile dikkat çekmektedir. Ön yükleme ile ultrases hızı oldukça düşen ii.b numunelerindeki özellikle erken yaşlardaki hızlı iyileşmenin temel nedeninin hidrate olmamış çimento miktarının fazla olması ile açıklanabilir.



Şekil 4.15. Birlikte optimizasyon karışımlarının ultrases hızında iyileşme yüzdesi

Silis dumanı içeren karışımlarda kendiliğinden iyileşme:

Silis dumanı içeren karışımlar, bütün karışımlar içerisinde kendiliğinden iyileşme oranı en düşük karışımlar olarak dikkat çekmektedir. Her ne kadar ultrases hızındaki artış miktarı hasarlı numunelerde sağlam numunelere oranla fazla olsa da, oransal olarak iyileşme oldukça düşüktür. Her iki silis dumanlı karışım incelendiğinde ii.as karışımının i.bs karışımına kıyasla biraz daha fazla iyileşme gösterdiği görülmektedir. Bunun sebebinin ii.as karışımında bulunan cürufun erken yaşlarda kendiliğinden bağlayıcılık özelliği sayesinde çimentonun hidratasyonu ile oluşan $\text{Ca}(\text{OH})_2$ tüketiminin az olması ve sitemdeki bu kirecin silis dumanı tarafından ikincil hidratasyon için yeniden kullanılması olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.16. Silis dumanı içeren karışımların ultrases hızında iyileşme yüzdesi

4.3.4 Hızlı Klor İyonu Geçirgenliği

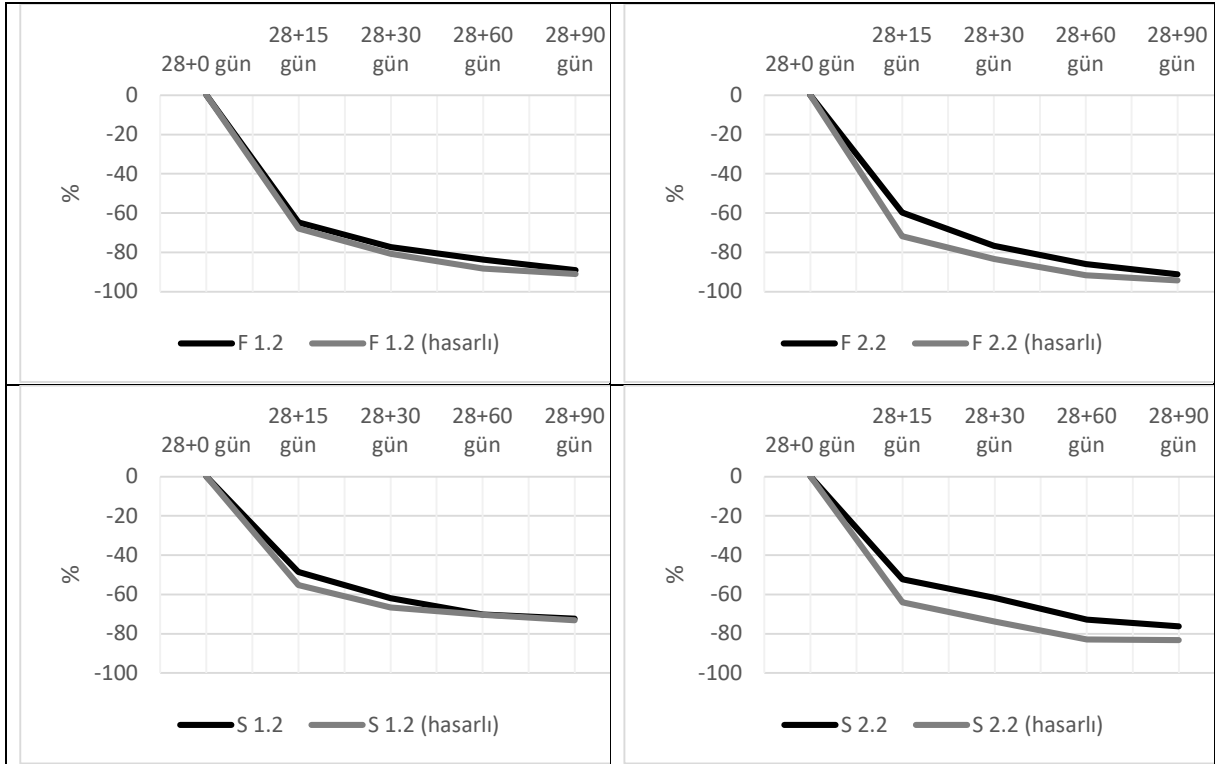
Hızlı klor iyonu geçirimliliği (HKİG), betonun hem geçirimliliğinin hem de korozyona direncini aynı anda değerlendirilebilmesini sağlaması sebebiyle oldukça faydalı bir deney yöntemidir. ASTM C 1260 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiş olan hızlı klor iyonu geçirgenliği testi sonuçları 6 saat sonunda 60 V potansiyel altında geçen elektrik yük miktarı olarak elde edilmiştir. Elde edilen elektrik yükü değerleri kendiliğinden iyileşmenin değerlendirilebilmesi amacıyla hem sağlam hem de hasarlı numuneler için her deney yaşında 28. günde elde edilen elektrik yükü değerinin yüzdesi olarak belirlenmiş ve sağlam ve hasarlı numuneler için karşılaştırmalı olarak Şekil 4.17-Şekil 4.20'de çizdirilmiştir. Ön yükleme ile oluşturulan hasar bütün karışımlarda elektrik yük değerinin artmasına sebep olmuştur. Bu artış miktarının sadece hasara bağlı olmayıp aynı zamanda karışımın kompozisyonundan da etkilendiği anlaşılmaktadır.

Standart TÇK karışımlarında iyileşmenin değerlendirilmesi:

Kontrol karışımı olarak kullanılan F 1.2 karışımı ve diğer standart karışımların HKİG performansları incelendiğinde uçucu kül içeren F 1.2 ve F 2.2 karışımlarının sırasıyla, 3126 ve 2922 C, cüruf içeren S 1.2 ve S 2.2 karışımlarının ise sırasıyla 1533 ve 1254 C yük geçirdikleri belirlenmiştir. Değerler, uçucu kül içeren karışımlara bakıldığında orta (2000-4000 C), cüruf içeren karışımlar için ise ilgili standarda göre düşük (1000-2000 C) seviyeler olarak tanımlanmaktadır. Aşağıdaki şekillerde % olarak verilen değer şu şekilde hesaplanmıştır:

$$\% = 100 * [(28+i). \text{gündeki elektrik yükü} - 28. \text{gündeki elektrik yükü}] / 28. \text{gündeki elektrik yükü}$$

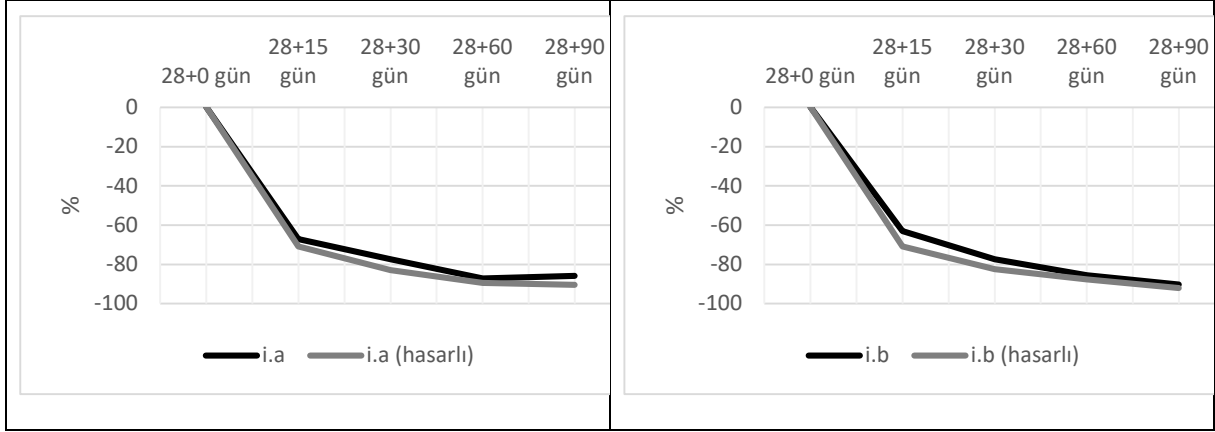
Standart karışımların tamamında zamana bağlı olarak geçen elektrik yükünde azalma gerçekleşmiştir. Kendiliğinden iyileşmenin incelenmesi bakımından bu azalmanın sağlam ve hasarlı numunelerdeki miktarı dikkate alındığında bütün karışımlar için hasarlı numunelerde azalmanın daha fazla olduğu görülmektedir. Bu da bütün karışımlarda kendiliğinden iyileşmenin gerçekleştiğini göstermektedir. Sağlam ve hasarlı numuneler arasında bu değişimin en yüksek olduğu yani iyileşmenin en çok olduğu karışımlar çimento ikame malzemesi miktarının fazla olduğu F 2.2 ve S 2.2 karışımları olarak karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 4.17. Standart karışımlardan geçen elektrik yükü değişimi

Agrega ve bağlayıcının ayrı optimizasyonu ile elde edilen karışımlarda iyileşmenin değerlendirilmesi:

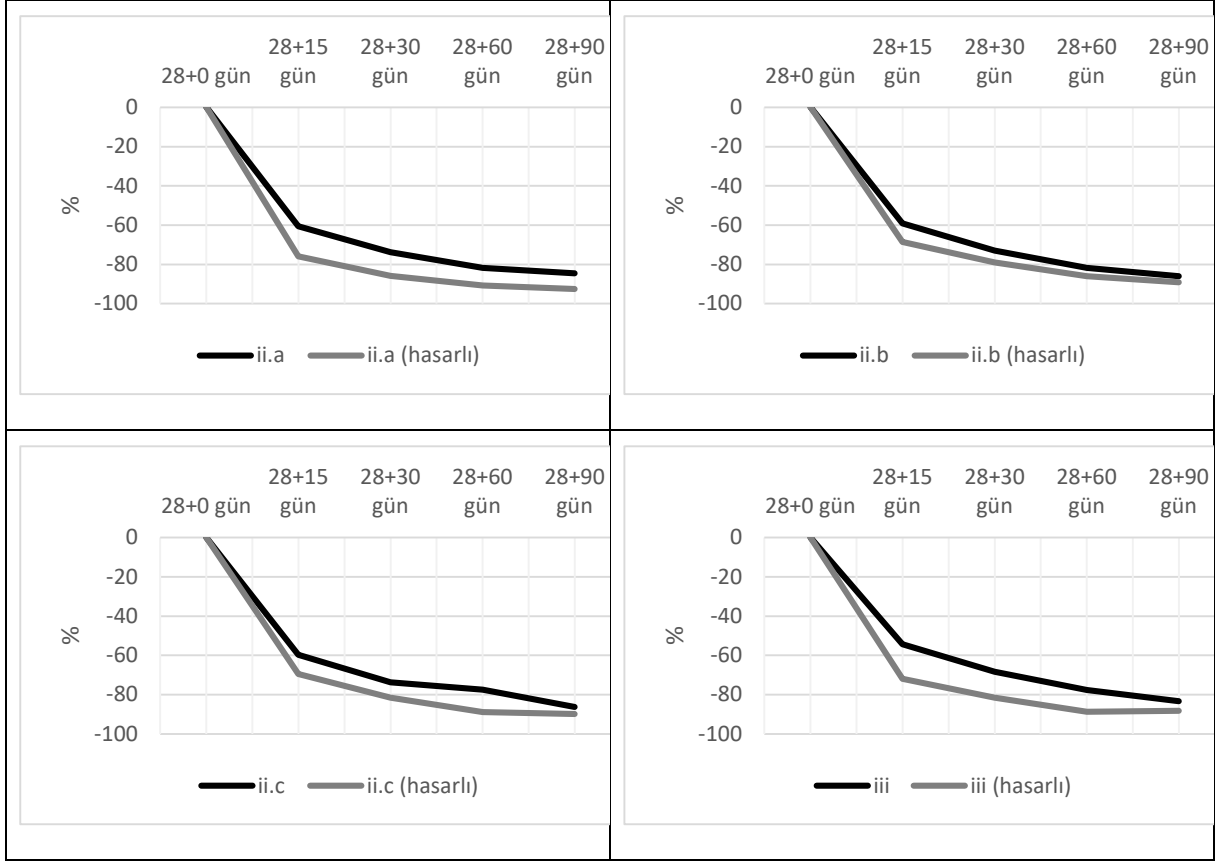
Bu kategorideki karışımlar incelendiğinde agrega optimizasyonu ile elde edilen i.a karışımının kontrol karışımına oranla daha iyi bir iyileşme gösterdiği anlaşılmaktadır. Bağlayıcı miktarı ve oranı aynı olmasına rağmen agrega kısmında kullanılan silis kumunun boyut dağılımının değiştirilmesinin geçen elektrik yük miktarını hem sağlam hem de hasarlı numunelerde azalttığı görülmektedir. Bağlayıcı optimizasyonu ile elde edilen i.b karışımı ise özellikle ilk zamanlarda daha hızlı bir kendiliğinden iyileşme göstermiştir ancak 28-90. günde iyileşme kontrol karışımına benzer gerçekleşmiştir.



Şekil 4.18. Ayrı optimizasyon karışımlarından geçen elektrik yükü değişimi

Agrega ve bağlayıcının birlikte optimizasyonu ile elde edilen karışımlarda iyileşmenin değerlendirilmesi:

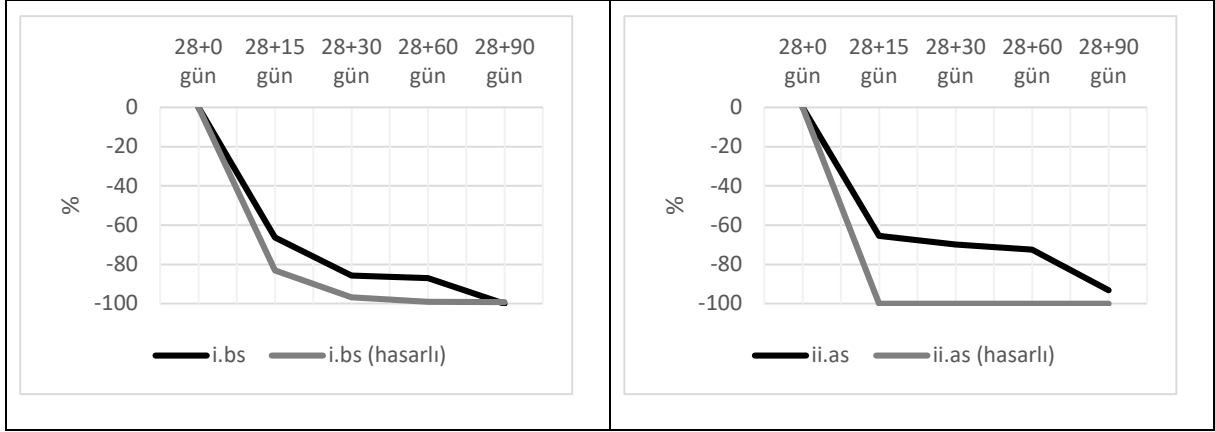
Bu bölümde değerlendirilen karışımlar içerisinde kendiliğinden iyileşmenin kontrol karışımına göre açıkça daha iyi olduğu görülmektedir. Bu karışımlar ii.b karışımı hariç yüksek miktarda uçucu kül içermektedir. Gözlemlenen iyileşmenin uçucu külün hidratasyonu etkisiyle oluştuğu düşünülmektedir. Birbirine benzer özellikler gösteren iii ve i.b karışımları karşılaştırıldığında, agrega kısmı optimize edilmiş olan iii karışımının daha iyi bir iyileşme gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu durum ayrı ayrı optimizasyondaki karışımlar için de benzerdir. Bu sebeple agrega optimizasyonunun klor geçirgenliği bakımından iyileşmeye katkı sağladığı düşünülmektedir. Bütün karışımlar içerisinde en yüksek çimento içeriğine sahip ii.b karışımı ise özellikle daha erken yaşlarda kontrol karışımından daha iyi bir performans sergilemiştir. Sonuçlar, agrega muhtevasının ve dağılımının klor geçirgenliği üzerine olumlu etkileri olduğunu işaret etmektedir.



Şekil 4.19. Birlikte optimizasyon karışımlarından geçen elektrik yükü değişimi

Silis dumanı içeren karışımlarda iyileşmenin değerlendirilmesi:

Silis dumanı içeren karışımlardan geçen elektrik yükü miktarları 28 günlük sağlam numunelerde diğer bütün karışımlara kıyasla oldukça düşük elde edilmiştir. i.bs ve ii.as karışımlarında sağlam numunelerde sırasıyla ortalama 154 ve 116 C yük değerleri ölçülmüştür. Bu değerler ASTM C 1260 standardına göre çok düşük olarak sınıflandırılmaktadır. Ön yükleme sonunda ise bu değerler sırasıyla 486 ve 180 C mertebesine çıkmıştır ancak hala çok düşük olarak sınıflandırmaktadır. Bununla birlikte hasarlı numuneler de, sağlam numuneler de de çok kısa bir sürede sifıra yakın değerlerde yük geçirmeye başlamışlardır. Bu bakımdan hasar sonrası oluşan yük artışı sebebiyle silis dumanı içeren karışımların oldukça yüksek bir iyileşme oranı göstermektedir. Ancak bu iyileşme durumunun gerçekçi olmadığı ve silis dumanlı karışımlarda elektriksel yük değerlerinin oldukça düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.



Şekil 4.20. Silis dumanı içeren karışımlardan geçen elektrik yükü değişimi

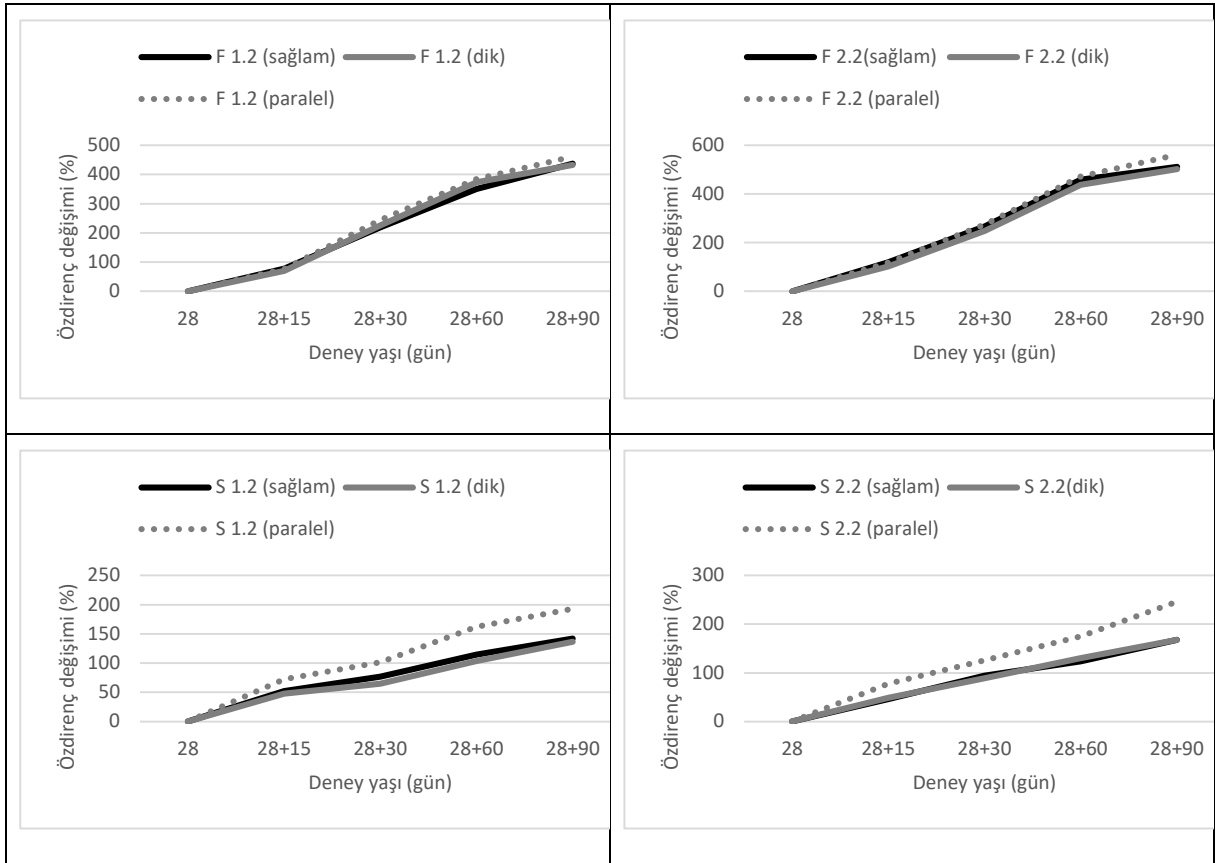
4.3.4 Elektriksel Özdirenç

Elektriksel özdirenç ölçümleri sırasında, kullanılan yöntemin yeni bir yöntem olması sebebiyle farklı şekillerde ölçüm alarak kendiliğinden iyileşme performansının bu yöntemle mümkün olan en iyi biçimde belirlenmesine çalışılmıştır. Bu amaçla, literatürde yer alan ve proje ekibinin de yer aldığı çalışmada (Şahmaran vd, 2017) kullanıldığı şekliyle 1 gün havada kurutulmuş numunelere çatlaklara dik doğrultuda elektriksel özdirenç ölçümünün yanı sıra, aynı şartlarda çatlaklara paralel ölçüm de yapılmıştır. Bununla birlikte 1 gün havada kurutulan numunelerdeki nem durumunun, numuneler arasında farklılık gösterebileceği de dikkate alınarak tamamen suya doymuş numunelerin yüzeyleri kurulandıktan sonra, yine çatlaklara dik ve paralel olarak ölçümler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda ayrı ayrı sunulmaktadır.

Standart TÇK karışımlarında iyileşmenin değerlendirilmesi:

Kontrol karışımı olan F 1.2 karışımı ve diğer standart karışımların elektriksel özdirenç değerleri, empedans değerinin özdirenç değerine en yakın olduğu 1kHz frekansında ölçülmüştür. Aynı karışıma ait sağlam ve hasarlı numunelerin özdirenç değerlerinin 28 günlük değerlerine göre artış miktarı Şekil 4.21 ve Şekil 4.22'de suya doymuş ve hava kurusu numuneler için verilmiştir. Suya doymuş numunelerden elde edilen sonuçlar dikkate alındığında ön yükleme sonrasında çatlaklara paralel test edilenlerde dirençte azalma meydana gelmiştir. Bu düşüşün ise elektrotlar arasında akımın içi su dolu çatlaklar üzerinden geçmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Zamana bağlı olarak çatlakların kapanması ile su dolu çatlaklar yerini alan kendiliğinden iyileşme ürünleri direncin artmasına sebep olmaktadır. Özdirençin boşluk miktarı, boşlukların bağlantılı olma durumu ve boşluklardaki su muhtevası artışlarından olumsuz etkilendiği düşünüldüğünde, kendiliğinden iyileşme hakkında fikir verebilecek en ideal durumun

numunelerin tamamen su ile doymuş ve ölçümün çatlaklara paralel olarak yapıldığı durum olduğu Şekil 4.21'den de anlaşılmaktadır. Buradan da görüldüğü üzere çatlaklara dik doğruluda ölçüm yapılması sağlam numunelere benzer sonuçların elde edilmesine sebep olmuştur. Akımın çatlak boyunca mümkün olan en düşük dirençli noktadan geçmesi ve bu noktada iyileşme gerçekleşmediği sürece akımın hep aynı noktadan geçmeye devam etmesinden kaynaklanmaktadır.

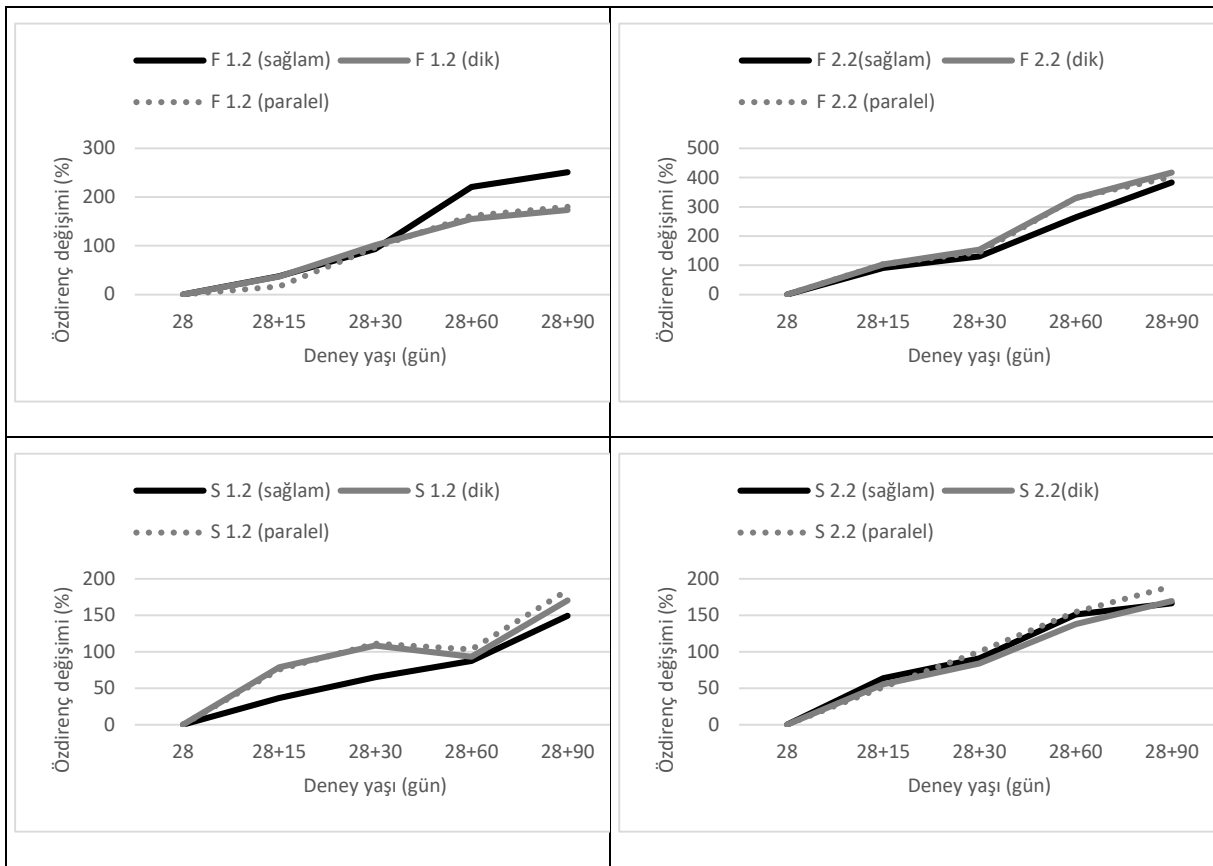


Şekil 4.21. Suya doymuş standart karışımlardaki elektriksel özdirenç değişimi

Şekil 4.21'den bütün karışımların elektriksel özdirenç bakımından kendiliğinden iyileşme gösterdikleri görülmektedir. F 2.2 karışımı kontrol karışımı olan F 1.2 karışımına göre daha iyi bir performans göstermiştir. Ön yükleme sonrasındaki 90. günde 28 günlük değerlere göre F 1.2 karışımı % 25 daha fazla artış gösterir iken, bu oran F 2.2 için % 50 olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu sonuçlar HKİG testinden elde edilen sonuçlara benzerdir. Zira her iki test de benzer parametrelerden etkilenmektedir.

Hava kurusu olarak test edilen numunelerden elde edilen özdirenç değerleri incelendiğinde, 1 gün havada kurutulan numuneler içerisindeki çatlak ve boşluklardaki nem muhtevasının tam

olarak bilinmemesi ve farklılık göstermesinin sonuçları etkilediği anlaşılmaktadır. Boşluklar içerisinde su bulunması durumunda akımın su üzerinden, bulunmaması durumunda ise boşluk etrafından dolaşarak geçmesi beklenmektedir. Tamamen kuru bir numunede çatlığa dik olarak ölçüm yapıldığında çatlakta meydana gelecek iyileşme sonucu direncin düşmesi gerekmektedir. Ancak muhtemel bir nemlilik durumunda elde edilen sonuç iyileşmeyi göstermeyecektir. Hava kurusu numunelerden elde edilen sonuçlar ise tam olarak bu duruma işaret etmektedir. Bu nedenle bu numunelerden elde edilen sonuçlar iyileşme durumunu işaret etmemektedir.

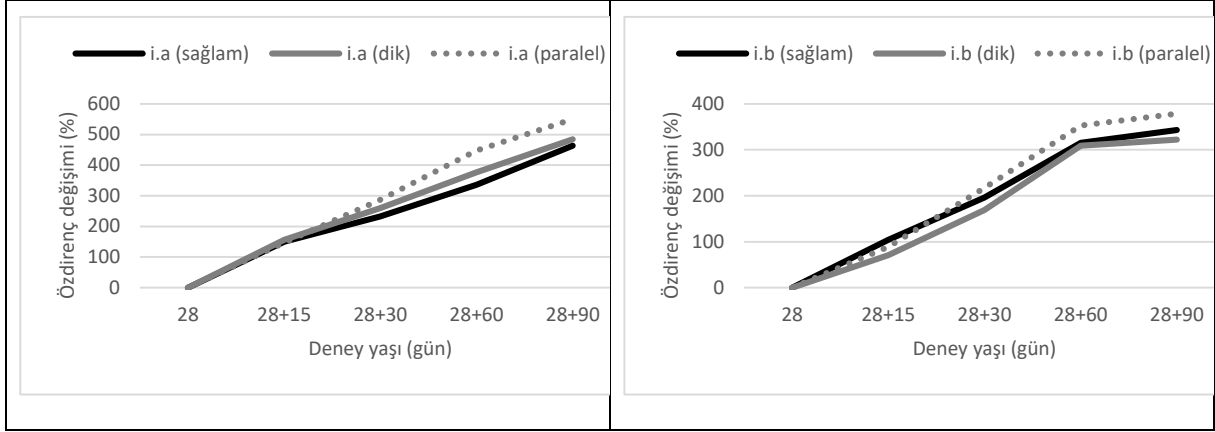


Şekil 4.22. Hava kurusu standart karışımlarda elektriksel özdirenç değişimi

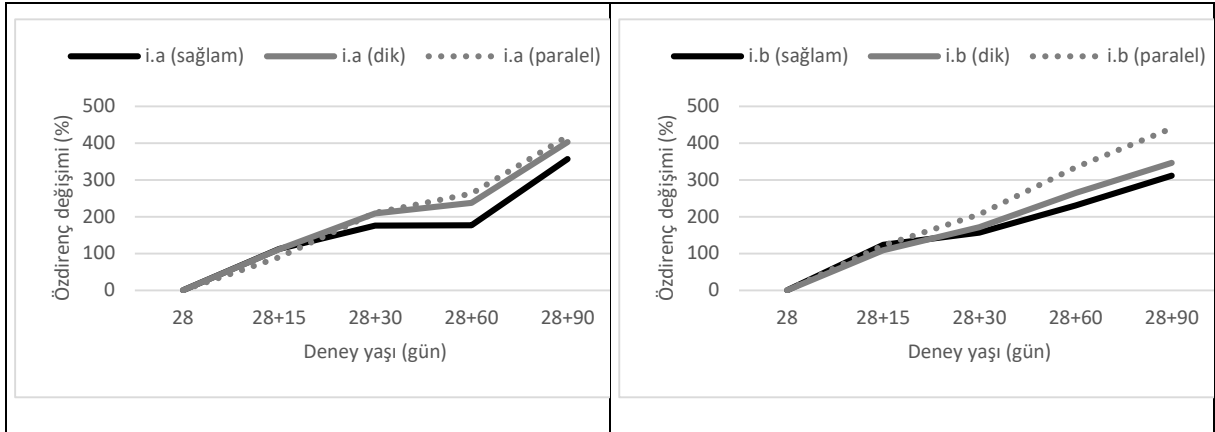
Agrega ve bağlayıcının ayrı optimizasyonu ile elde edilen karışımlarda iyileşmenin değerlendirilmesi:

Agreganın ve bağlayıcın ayrı ayrı optimize edildiği i.a ve i.b karışımlarının, zaman bağılı olarak özdirenç değişim oranları Şekil 4.23 ve Şekil 4.24'de verilmiştir. Suya doygun numunelerin sonuçları incelendiğinde, yine çatlaklara paralel yönde yapılan ölçüm sonuçlarının kendiliğinden iyileşmeyi işaret ettiği görülmektedir. Bu kategorideki her iki karışım da kontrol

karışımı olan F 1.2 karışımına göre daha yüksek bir iyileşme göstermektedir. Agrega optimizasyonu ile elde edilen i.a karışımı ile F 2.2 karışımında meydana gelen direnç artışı kıyaslandığında, çatlak numunelerdeki artışın i.a için sağlam numunelere göre %86 iken F 2.2 için %50 olduğu görülmektedir. Bu durum agrega optimizasyonunun kendiliğinden iyileşme üzerine olumlu olarak etkilediği şeklinde yorumlanabilir.



Şekil 4.23. Suya doymuş ayrı optimizasyon karışımlarında elektriksel özdirenç değişimi

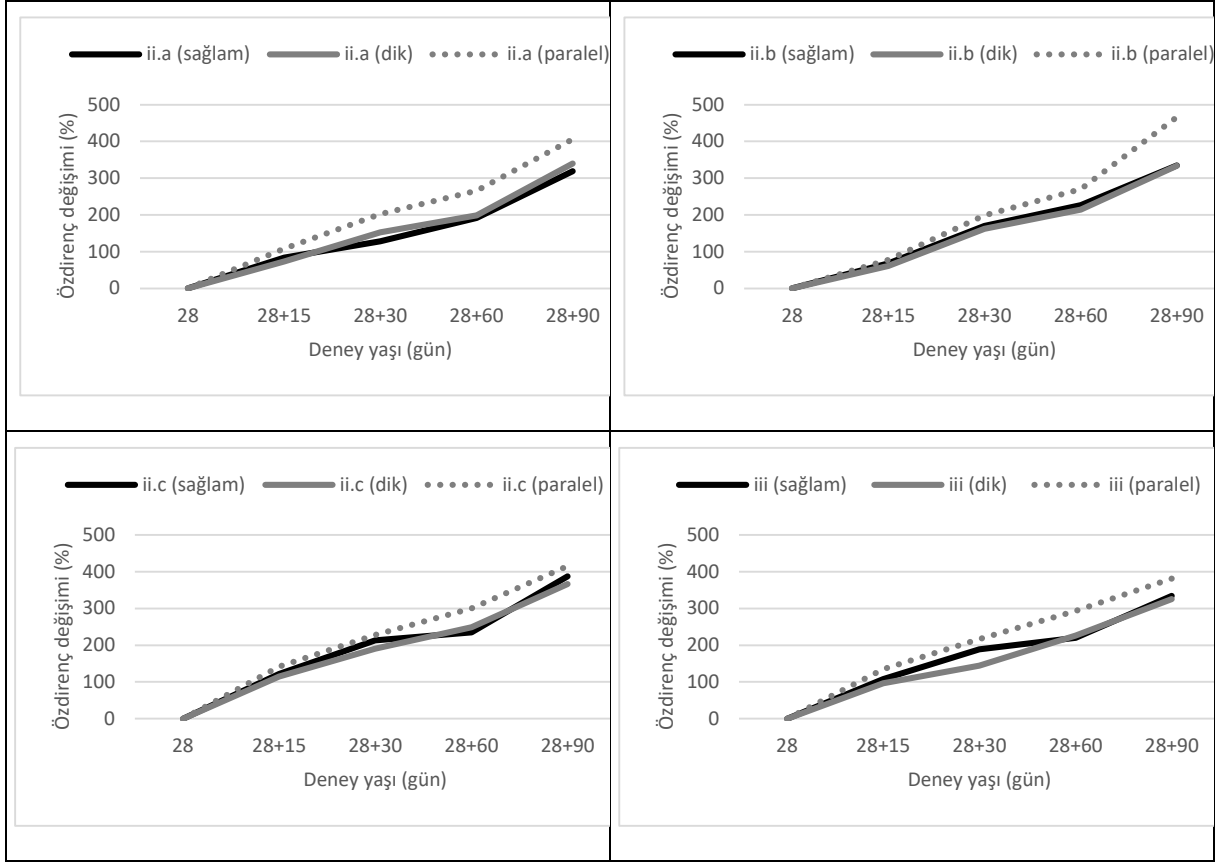


Şekil 4.24. Hava kuru ayrı optimizasyon karışımlarında elektriksek özdirenç değişimi

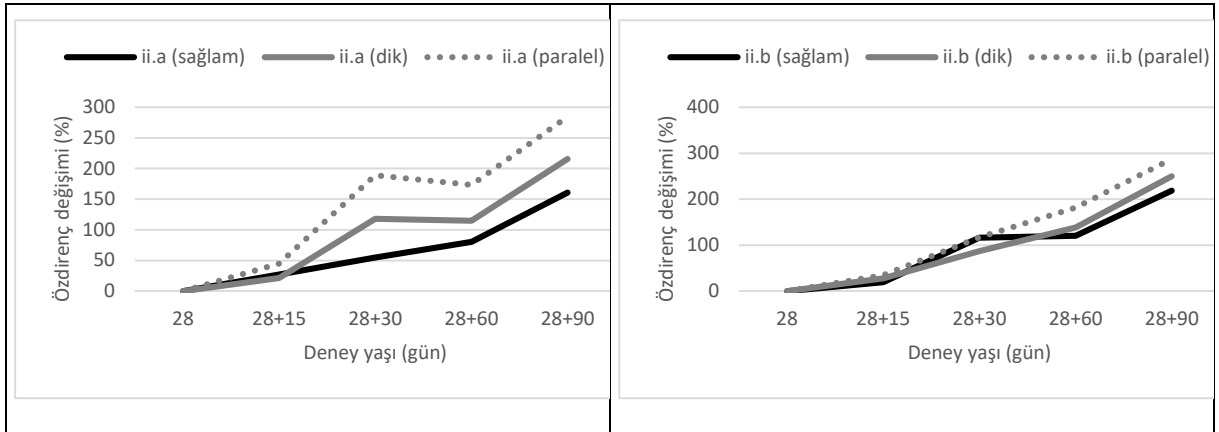
Agrega ve bağlayıcının birlikte optimizasyonu ile elde edilen karışımlarda iyileşmenin değerlendirilmesi:

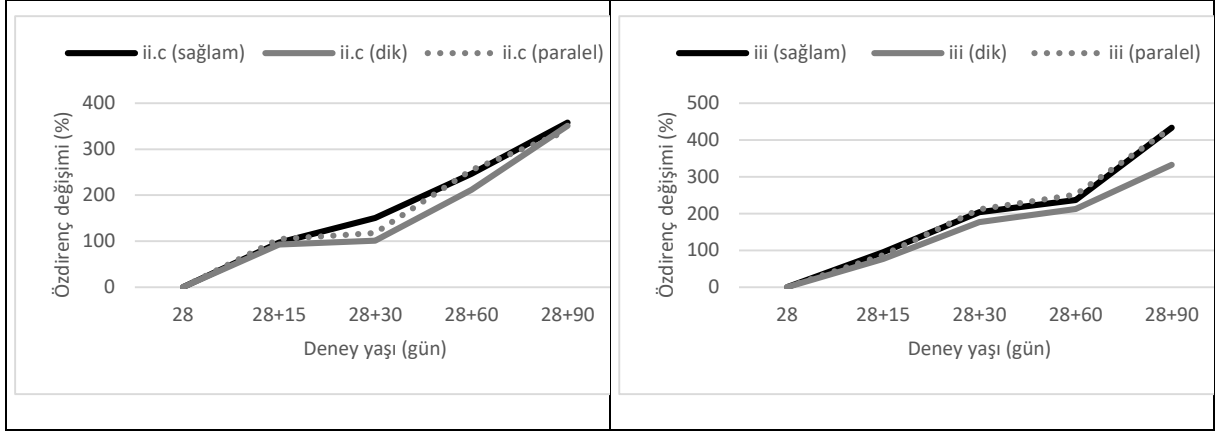
Agrega ve bağlayıcının birlikte optimize edildiği karışımların Şekil 4.25 ve Şekil 4.26'da verilen sonuçları dikkate alınarak kendiliğinden iyileşme performansları karşılaştırıldığında yine bütün karışımların kontrol karışıma göre daha fazla iyileşme gösterdiği görülmektedir. Bu kategoride yine HKİG testinde de benzer performans gösteren yüksek miktarda çimento içeren ii.b

karişımının en iyi performansı gösterdiği görülmektedir. Deney sonuçlarının genel olarak HKİG deneyi sonuçları ile benzerlik gösterdiği anlaşılmaktadır. HKİG testine göre oldukça pratik bir test yöntemi olan elektriksel öz direnç testinin HKİG testi yerine kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesi için kullanılabilmesi mümkün olduğu sonucuna varılmaktadır.



Şekil 4.25. Suya doymuş birlikte optimizasyon karişımında elektriksel öz direnç değişimi

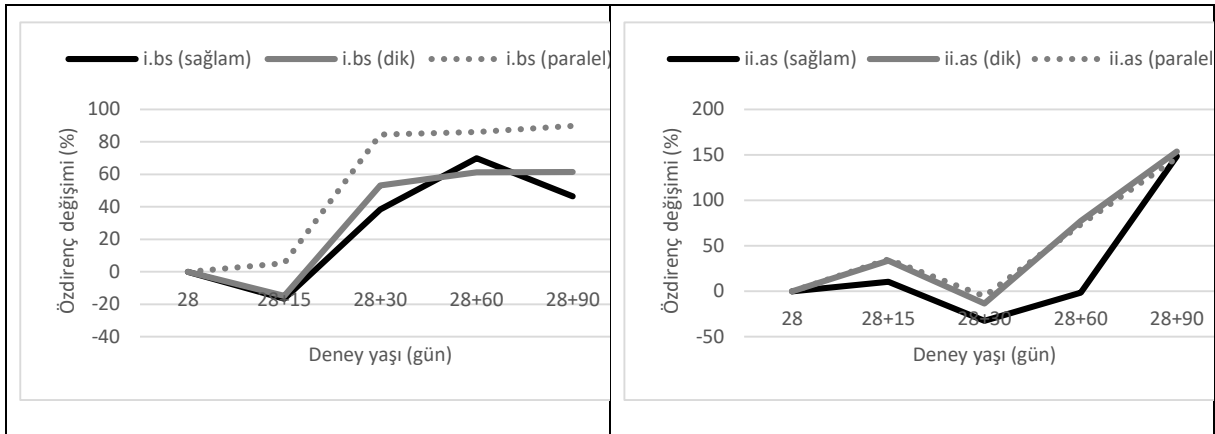




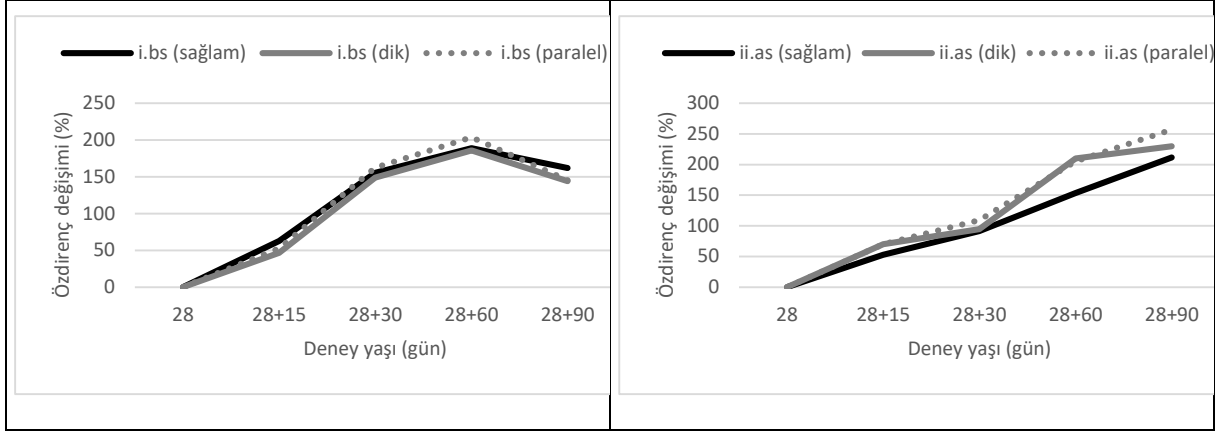
Şekil 4.26. Hava kuruğu birlikte optimizasyon karışımlarında elektriksel özdirenç değışimi

Silis dumanı içeren karışımlarda iyileşmenin değeriendirilmesi:

Silis dumanı içeren karışımların zamana bağılı özdirençlerindeki değışimler Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de sunulmaktadır. Silis dumanı içeren karışımlar oldukça yüksek özdirenç değeriğine çıkmaktadır. Silis dumanı içeren karışımlarda diğer bütün karışımların özdirenç değeriğinin on katı mertebesinde direnç değeriğeri ölçülmüştür. Benzer şekilde HKİG testi sonuçlarında da silis dumanı içeren karışımlar diğer karışımlardan yaklaşık 10 kat mertebesinde daha düşük sonuçlar vermişlerdir. Yine aynı şekilde kendiliğinden iyileşmenin silis dumanı içeren karışımlarda elektriksel yöntemler kullanılarak belirlenmesinin mümkün olamayacağı anlaşılmaktadır.



Şekil 4.27. Suya doymuş silis dumanı içeren karışımlarda elektriksel özdirenç değışimi

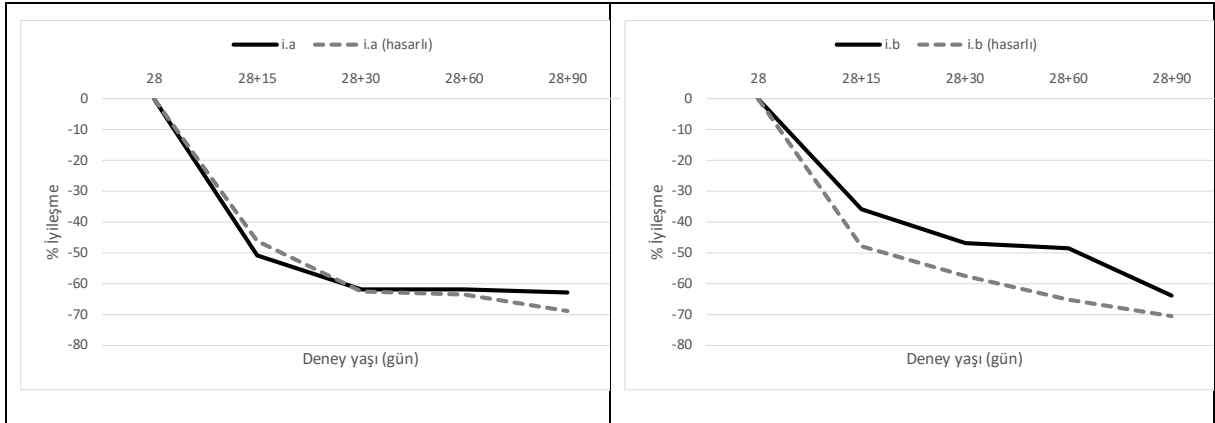
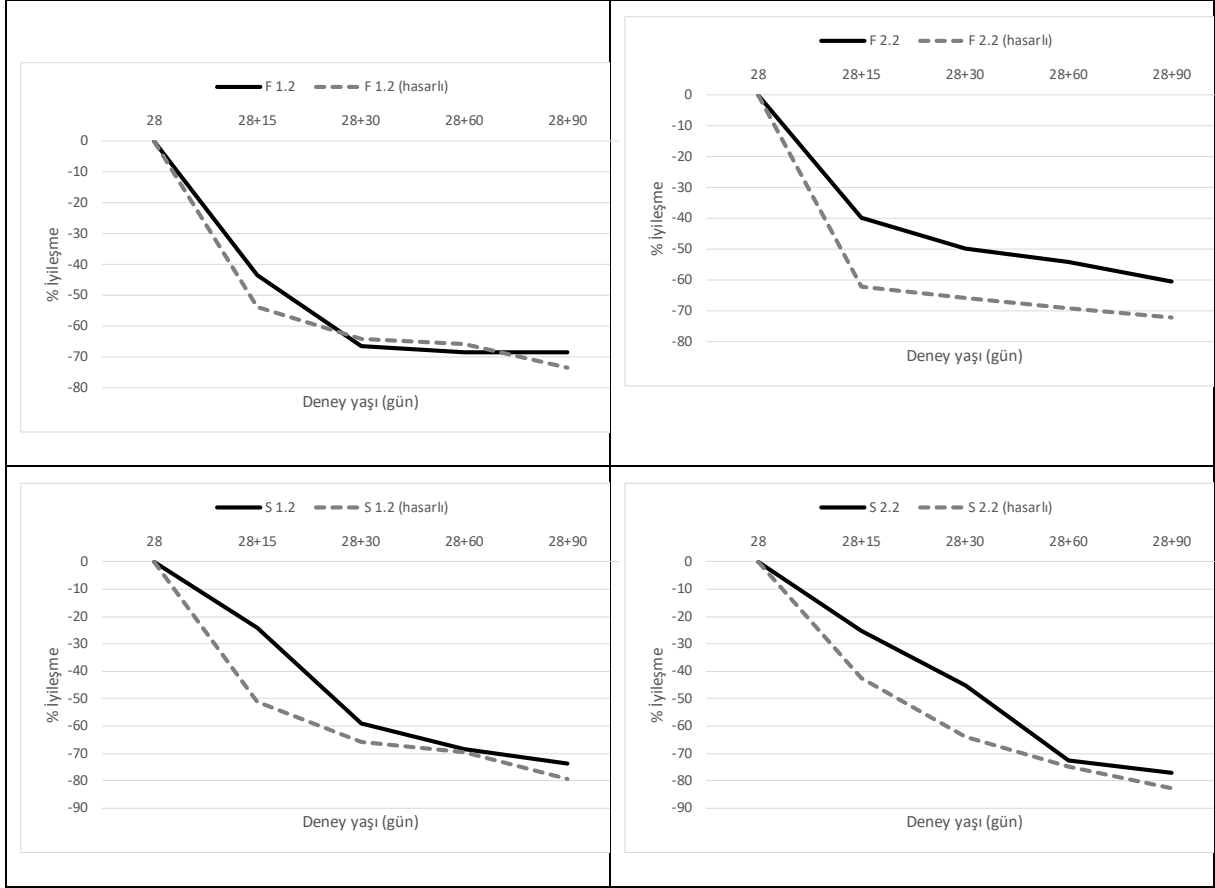


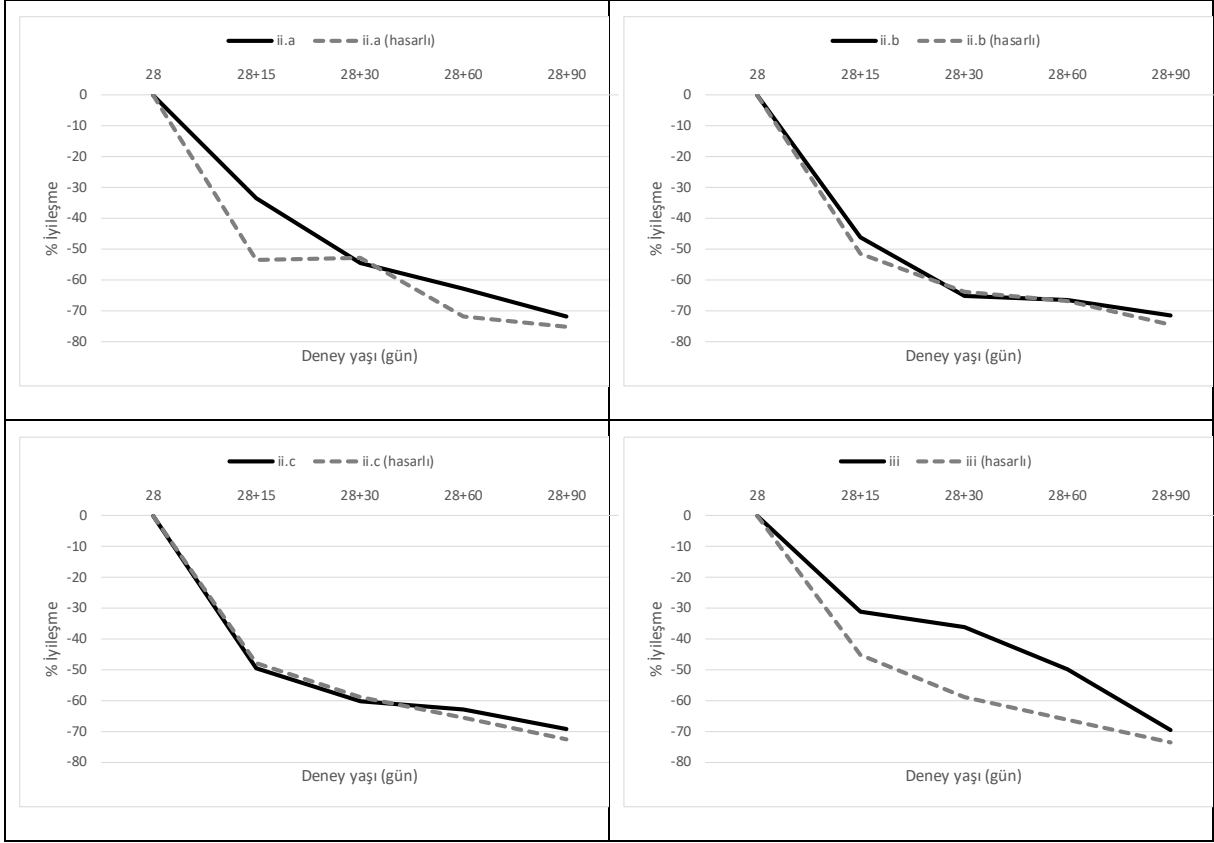
Şekil 4.28. Hava kuru silis dumanı içeren karışımlarda elektriksel özdirenç değişimi

4.3.5 Kılcal Su Emme

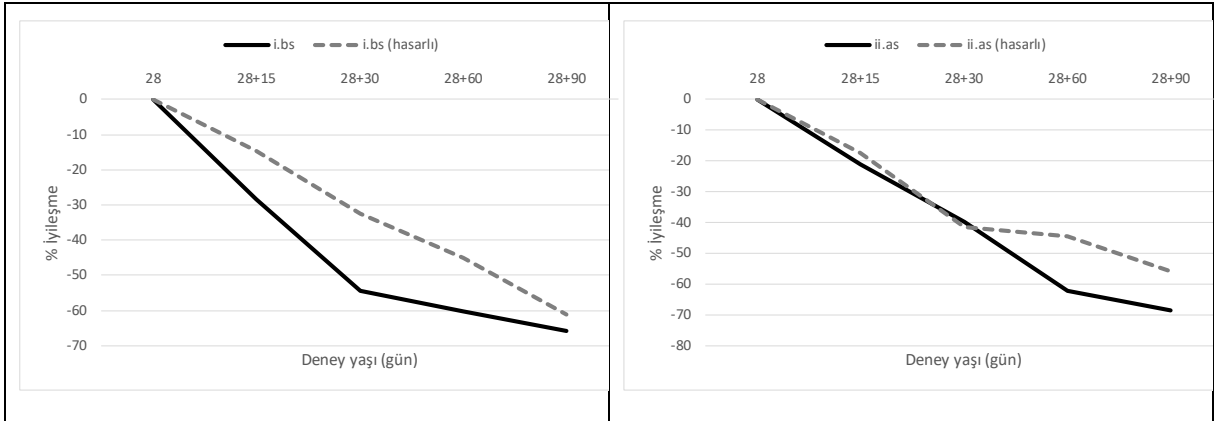
Kılcal su emme indeksinin belirlenmesi proje öneri formunda bulunmamaktadır. Bununla birlikte, tahribatsız bir deney yöntemi olan kılcal su emme deneyinin uygulanmasıyla çatlakların kapanma durumunun izlenebileceği düşünülerek deney programına dahil edilmiştir. Ø100x50 mm boyutlarında kesilen disk şeklinde numuneler kullanılarak deney gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla bir kısım numune sağlam bırakılarak bir kısım numunede ön yükleme ile hasar oluşturulmuştur. Tamamen kuru duruma getirilen numunelerin su emme miktarları 6 saat boyunca belirli aralıklarla takip edilmiş ve her bir TÇK karışımı için ön yüklemeyi takip eden 28+0, 28+15, 28+30, 28+60 ve 28+90 günlerde olmak üzere sağlam ve çatlattılmış numuneler için kılcal su emme indeksleri hesaplanmıştır.

Deney sonuçlarına göre, hidrasyon devam edip numune yaşı ilerledikçe kılcal su emme indeksi sürekli olarak azalmaktadır. Ayrıca numunelerde çatlak oluşumu suyun daha kolay absorbe edilmesini dolayısıyla daha yüksek kılcal su emme indeksi elde edilmesine sebep olmuştur. Zamanla tüm numunelerde azalma olduğuna göre, sonuçları kıyaslayabilmek amacıyla her deney yaşındaki kılcal su emme indeksinin 28+0. gününden farkı ilk günkü yani 28+0. günkü değerin %'si olarak ifade edilmiştir. Hasarlı numunelerdeki % değişimi sağlam numunelerdeki % değişimine göre daha fazla ise, bu durum numunelerde kendiliğinden iyileşme olduğunun göstergesi olarak kabul edilmiştir. Kılcal su emme indekslerinin % olarak değişimleri standart TÇK karışımları için, agrega ve bağlayıcıların ayrı ayrı optimizasyonu ile elde edilen TÇK karışımları için, agrega ve bağlayıcıların birlikte optimizasyonu ile elde edilen TÇK karışımları için ve silis dumanı içeren TÇK karışımları için Şekil 4.29–Şekil 4.32 aralığında verilmiştir.





Şekil 4.31. Agrega ve bağlayıcıların birlikte optimizasyonu ile hazırlanan TÇK karışımlarının kılcal su emme indekslerindeki değişim



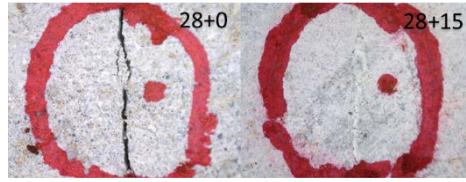
Şekil 4.32. Silis dumanı içeren TÇK karışımlarının kılcal su emme indekslerindeki değişim

Şekil 4.29–Şekil 4.32 ‘de kesikli çizgiler hasarlı numunelerdeki değişimi, düz çizgiler ise sağlam numunelerdeki değişimi göstermektedirler. Görüldüğü üzere 28 günden sonra sürekli olarak kılcal su emme indeksleri azalmaktadır. Bununla birlikte, eğer hasarlı numunelerdeki azalma

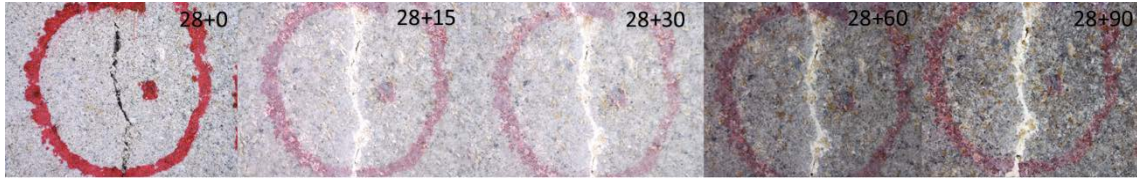
oranı sağlam numunelerdekinden daha fazla ise, kendiliğinden iyileşmenin meydana geldiğinden bahsedilebilir. Bu durumda, silis dumanı içermeyen bütün TÇK karışımlarında kendiliğinden iyileşmenin meydana geldiği anlaşılmaktadır. Silis dumanı içeren karışımlarda ise (Şekil 4.32) bu deney metodu ile kendiliğinden iyileşme gözlenememektedir. Silis dumanı içeren i.bs ve ii.as TÇK karışımlarının özellikle sağlam numuneleri için 28 günde belirlenen kılcal su emme indeksleri oldukça düşüktür. Silis dumanının çok reaktif ve ince taneli olmasından dolayı kılcal su emme indeksini düşürmesi beklenen bir davranıştır. Silis dumanı içeren numunelerin sahip olduğu çok küçük kılcal su emme indeksleri, bu numunelerde kendiliğinden iyileşmeyi belirlemeyi olumsuz etkilemiş olabilir.

4.3.6 Çatlakların Görsel Muayenesi

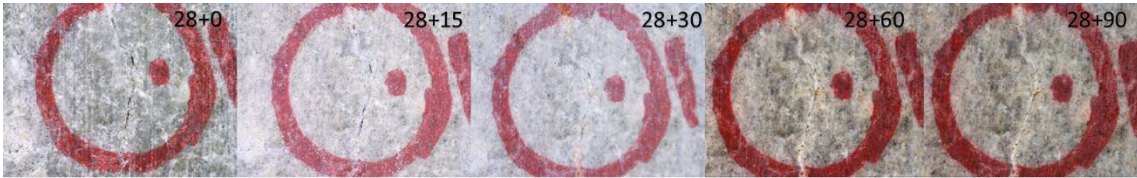
Çatlakların kapanma durumunu incelemek amacıyla disk şeklinde kesilmiş olan numuneler üzerindeki çatlakların genişlikleri zamana bağlı olarak önyükleme sonrasındaki her test yaşında çatlak mikroskobu ile ölçülmüştür. Bazı çatlaklar ise dijital mikroskop yardımıyla fotoğraflanmıştır. Zamanla numune sayısında azalmadan dolayı deney sonuçlarında tutarsızlık meydana gelmesini engellemek amacıyla, kirli numunelerdeki çatlaklar dikkate alınmamış, sadece tahribatsız yöntemlerde kullanılan disk numuneleri üzerindeki çatlaklar ölçülmüştür. Ancak zamanla görsel inceleme sonucu kirli numunelerin üzerindeki çatlakların tamamının kapanmasına rağmen, disk numuneleri üzerinde çatlakların kirli numuneleri kadar hızlı kapanmadığı görülmüştür. Bu durumun, yarma deneyi sırasında her ne kadar belirli deformasyon seviyelerine kadar ön yüklemeye yapılırsa da çatlakların eğilme deneyine göre daha kontrolsüz olarak açılmasından ve daha geniş çatlak açıklıklarına ulaşılmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bunun yanı sıra tahribatsız deneyler öncesinde ve sırasında numunelere uygulanan prosedürlerin de çatlakların tam olarak kapanmasını engellediği sanılmaktadır. Şekil 4.33'de her karışım için çatlakların zamana bağlı fotoğrafları örnek olarak verilmiştir. Bununla birlikte Şekil 4.34'de bütün karışımlardan elde edilen hasarlı numunelerin çatlak kapanma yüzdeleri sunulmuştur.



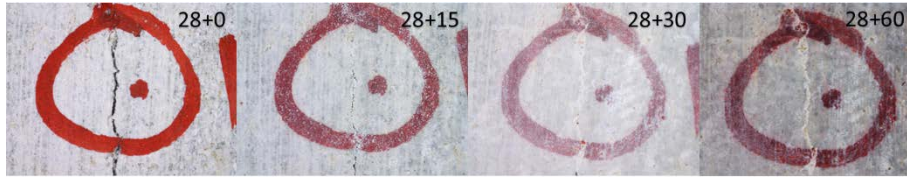
a. F 1.2



b. F 2.2



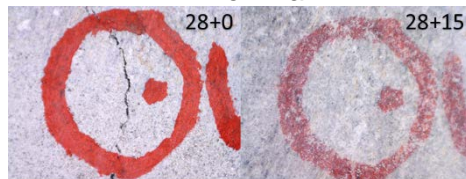
c. S 1.2



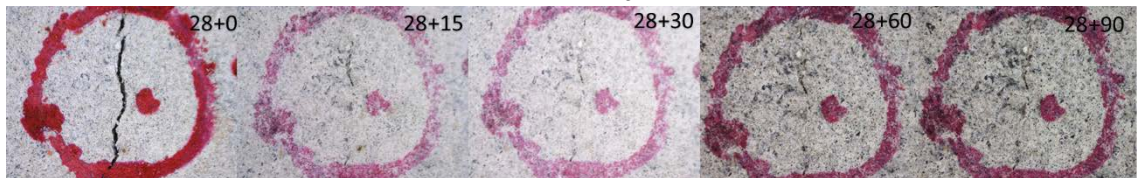
d. S 2.2



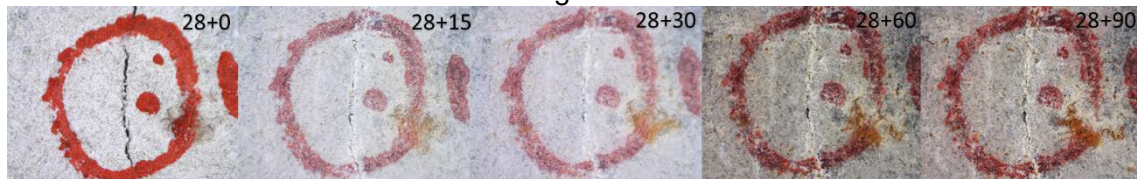
e. i.a



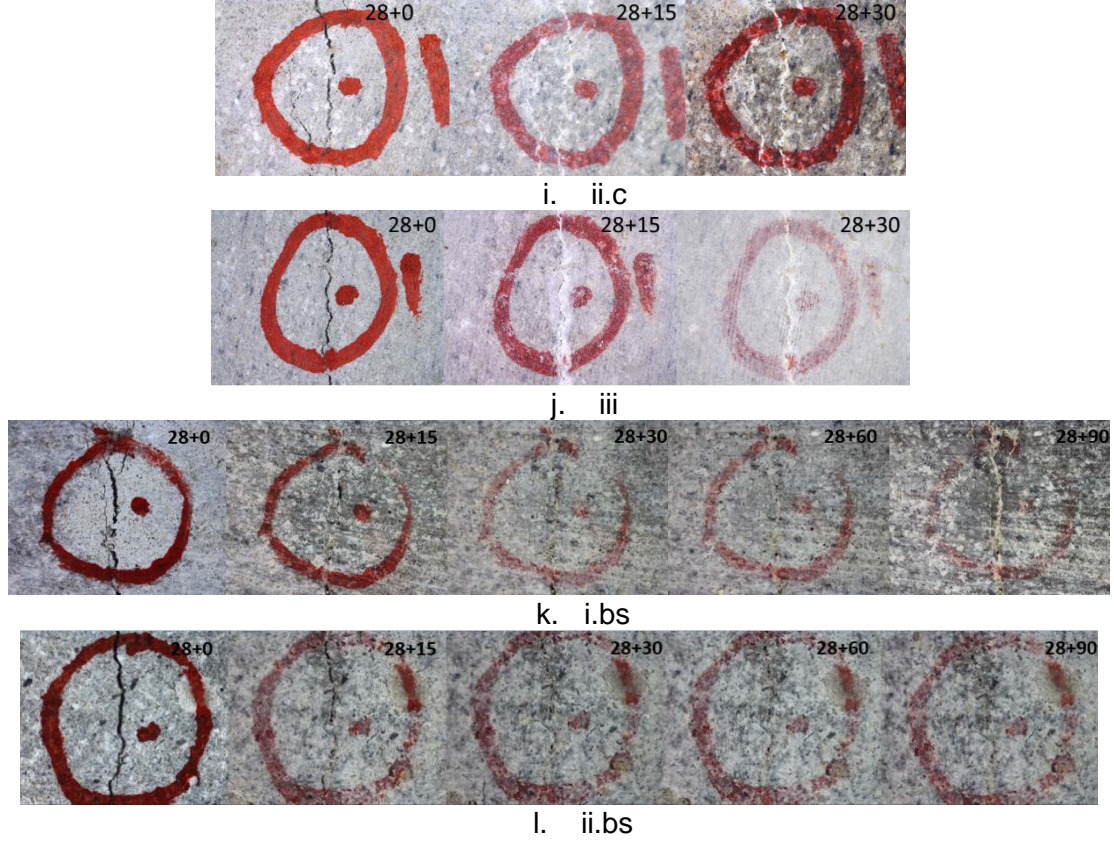
f. i.b



g. ii.a



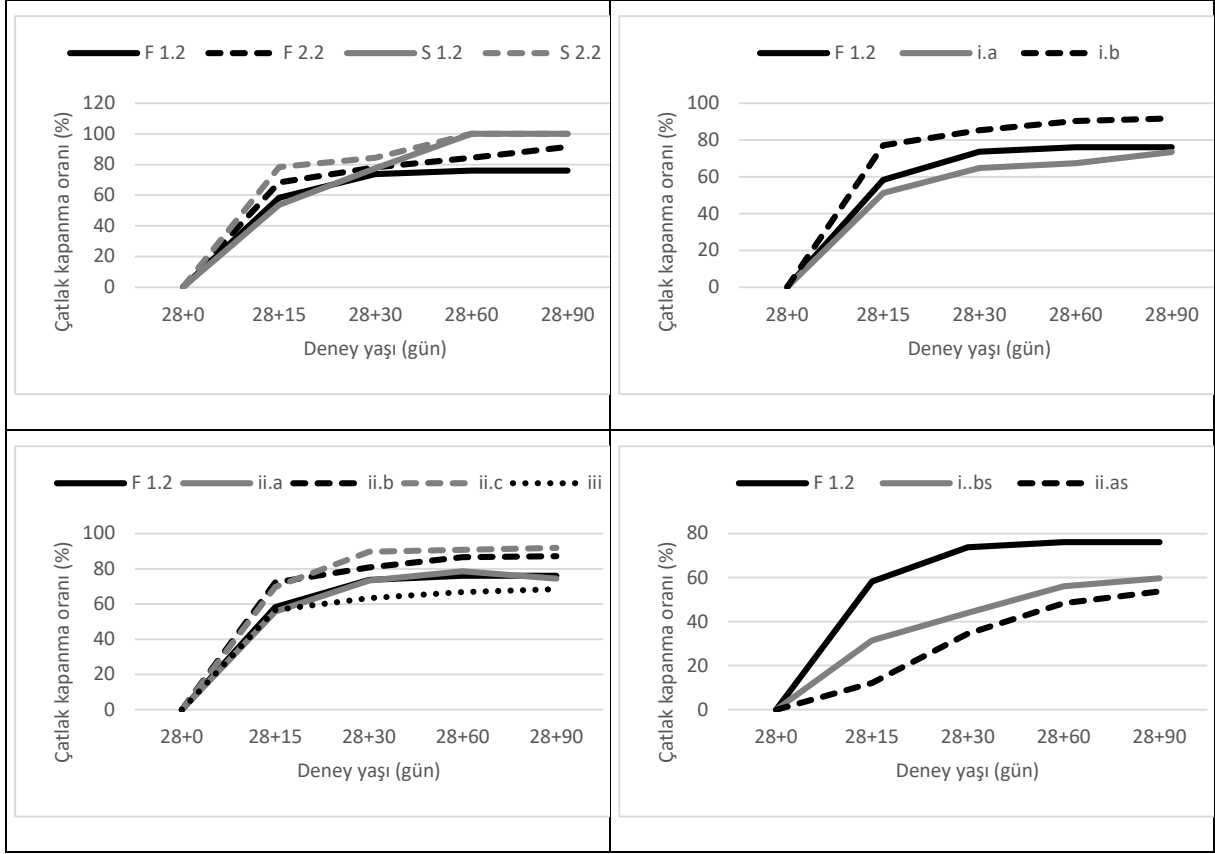
h. ii.b



Şekil 4.33. Çatlak görünümündeki zamana bağlı değişimler

Standart TÇK karışımlarında çatlak kapanma oranı:

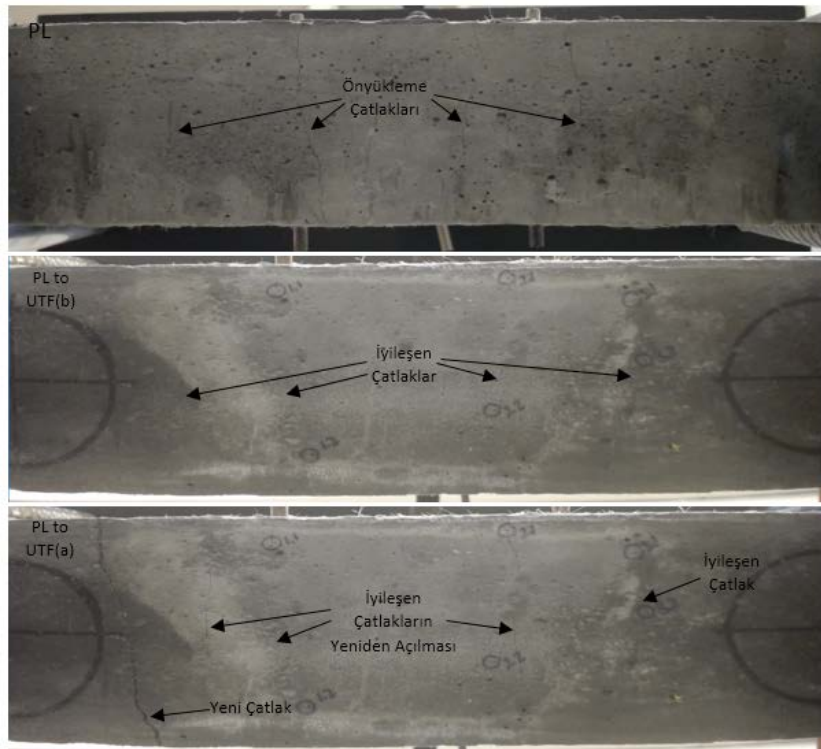
TÇK karışımları için çatlak kapanma yüzdeleri Şekil 4.34'de sunulmaktadır. Bu şekilden de anlaşılacağı üzere cüruf içeren numunelerde çatlaklar tamamen kapanmıştır. Bu kapanma performansı, cüruf içeren karışımlardaki CaCO_3 oluşumu ile açıklanabilmektedir. Cürufun kendiliğinden bağlayıcı özelliği ve yüksek aktivitesi nedeni ile hidrasyon sonucu oluşan Ca(OH)_2 puzolanik reaksiyonda tüketilmediği için karbonatlaşmaktadır. Bu durum çatlak üzerindeki beyaz izden anlaşılabilir. Ancak uçucu kül içeren karışımlarda da bu tür beyaz bir iz bulunmaktadır. Bu durum kullanılan uçucu külün yüksek CaO içeriğinden kaynaklı kendiliğinden bağlayıcılık özelliği olmasından ve Ca(OH)_2 'nin tamamen kullanılmayıp karbonatlaşmasından kaynaklanabilir. Her ne kadar çatlaklar cüruf içeren karışımlarda tamamen kapanmış olsa da, silis dumanı içeren karışımlar dışında bütün karışımlarda çatlak kapanma oranları oldukça yüksek değerlere ulaşmışlardır. Silis dumanı içeren karışımlar ise diğer karışımlardan farklı olarak çatlak üzerinde neredeyse hiç karbonatlaşma izi taşımamaktadır. Bu durum EDS analiz sonucunda elde edilen Ca/Si oranının bu karışımlar için düşük olması durumuyla da örtüşmektedir. Buna gerekçe olarak da silis dumanının Ca(OH)_2 tüketerek CaCO_3 oluşumuna izin vermemesidir.



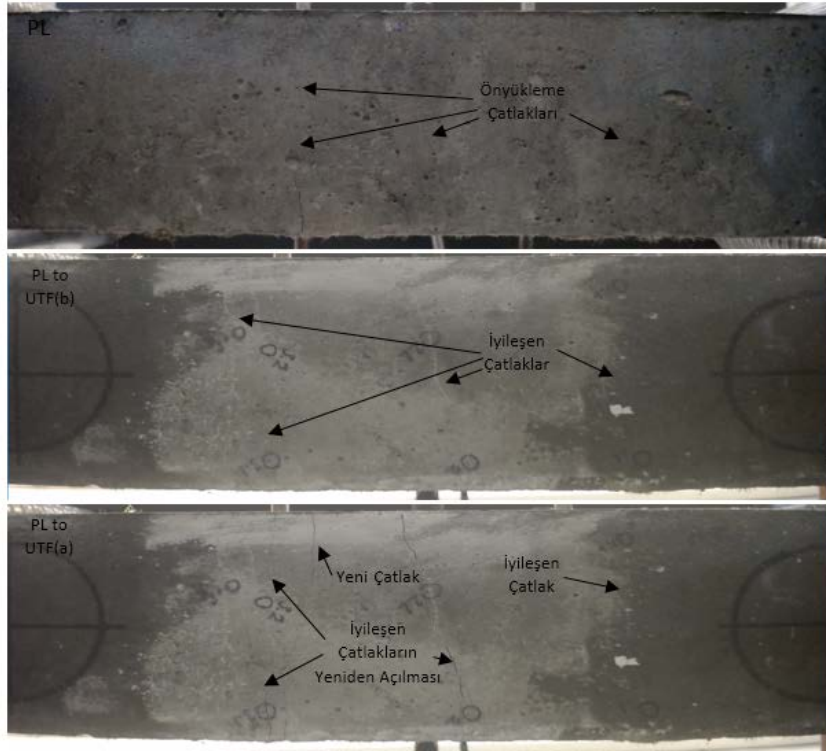
Şekil 4.34. TÇK karışımlarda çatlak kapanma oranı

Çatlak fotoğrafları ve çatlak kapanma oranları dışında, kendiliğinden iyileşmenin değerlendirilebilmesi amacıyla yeni bir görsel muayene yöntemi olarak eğilme deneyi sırasında numunelerin altında oluşan çatlakların yüklenme sırasında gelişimi de bir kamera sistemi yardımıyla incelenmiştir. Çekilen görüntülerin incelenmesi ile kendiliğinden iyileşmenin değerlendirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla ön yüklenme sırasında açılan çatlakların yeniden yüklenme sırasında tekrar açılıp açılmadığına bakılarak, çatlakların yeniden açılmaması durumunda kendiliğinden iyileşme ürünlerinin çatlakları kapatmakta ve çatlak yüzeylerini birbirine bağlamakta faydalı olduğu anlaşılacaktır. Ancak bu yöntem nicel bir değerlendirmeyi mümkün kılmamaktadır. Bununla birlikte bütün kiriş numuneleri için bu yöntemi kullanmak üretilen verilerin depolanması ve değerlendirmesinin zorluğu nedeniyle mümkün olmamıştır. Bu nedenle bazı testler sırasında bu yöntem kullanılmıştır. Her bir karışım için eğilme testi sırasında, ön yüklenme sonunda (PL), ön yüklenmiş numunenin kür edildikten sonra (PL to UTF- b) yeniden yüklenmesi sırasında kırılma oluşuncaya kadar (PL to UTF-a) elde edilen görüntüler Şekil 4.35-Şekil 4.46'de verilmiştir. Şekillerden de anlaşılacağı üzere hasarlı numunelerin yeniden yüklenmesi öncesinde çatlakların tamamen iyileştiği gözlenmiştir. Yeniden yüklenme sırasında bütün numunelerde eski çatlaklara ek olarak yeni çatlaklar

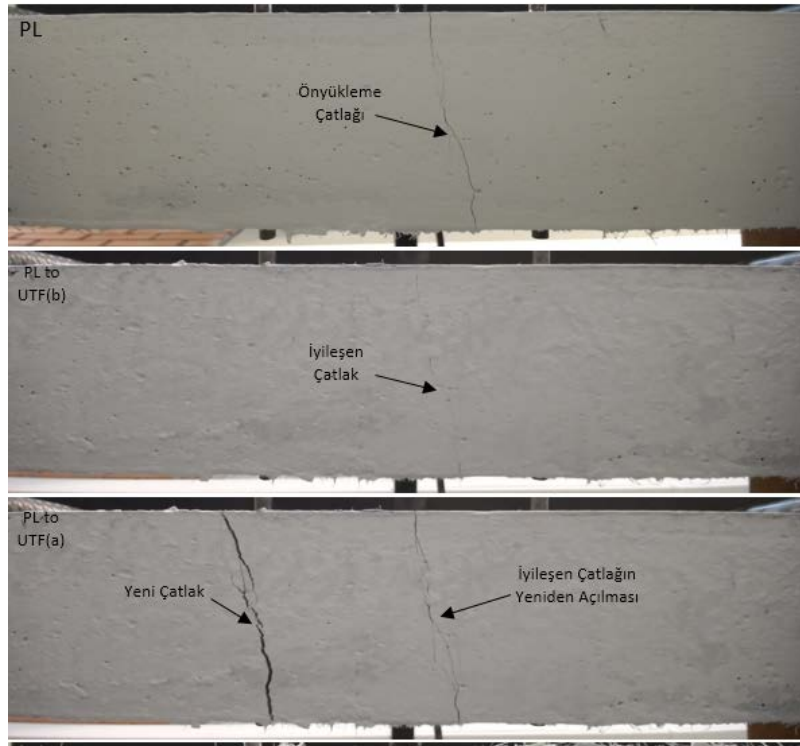
oluşmuş ve nihai kırılma çatlığının yeni veya eski olmasından bağımsız olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda bütün karışımlarda kendiliğinden iyileşme ürünlerinin çatlığı sağlam bir şekilde doldurduğu söylenebilir. Ancak yine şekillerden de görüleceği üzere, çatlak oluşumlarını kamera ile takip etmek numunelerin renginden ve çatlakların dar olmasından dolayı nicel bir değerlendirme yapmak için yeterli olmamaktadır. Daha iyi bir değerlendirme yapmak amacıyla numunelerin bazıları beyaza boyanmıştır, ancak bu durumda da bazı çatlak oluşumları boyanın altında kaldığı için gözlenememiştir.



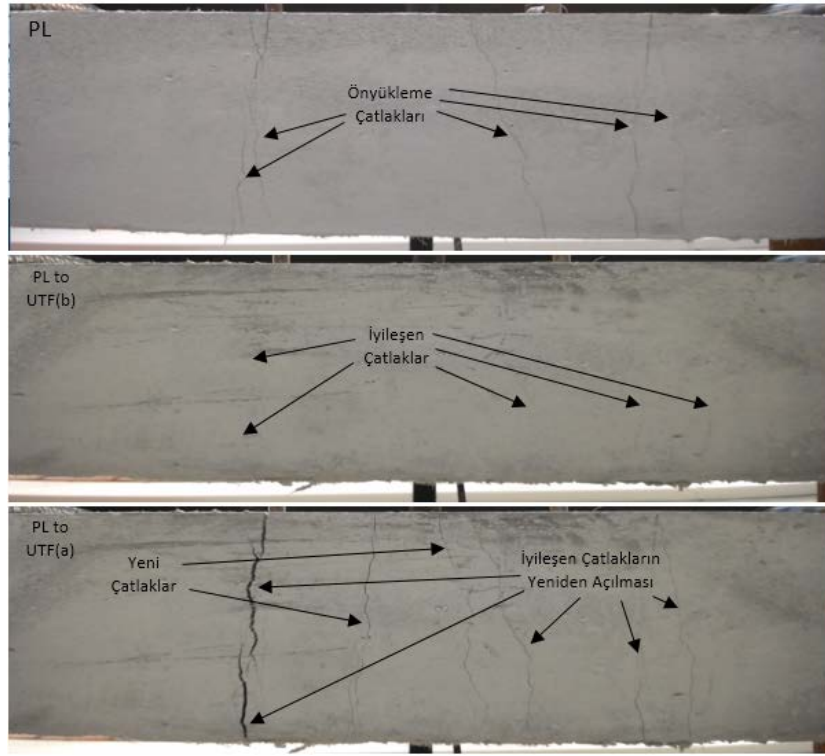
Şekil 4.35. F 1.2 numunesinin eğilme altında görüntüsü



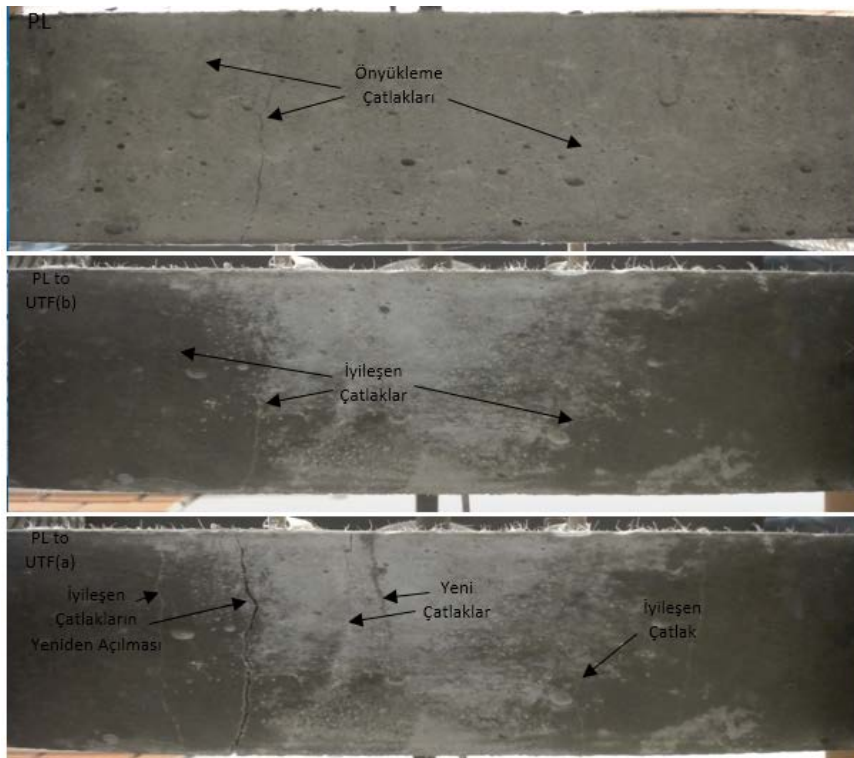
Şekil 4.36. F 2.2 numunesinin eğilme altında görüntüsü



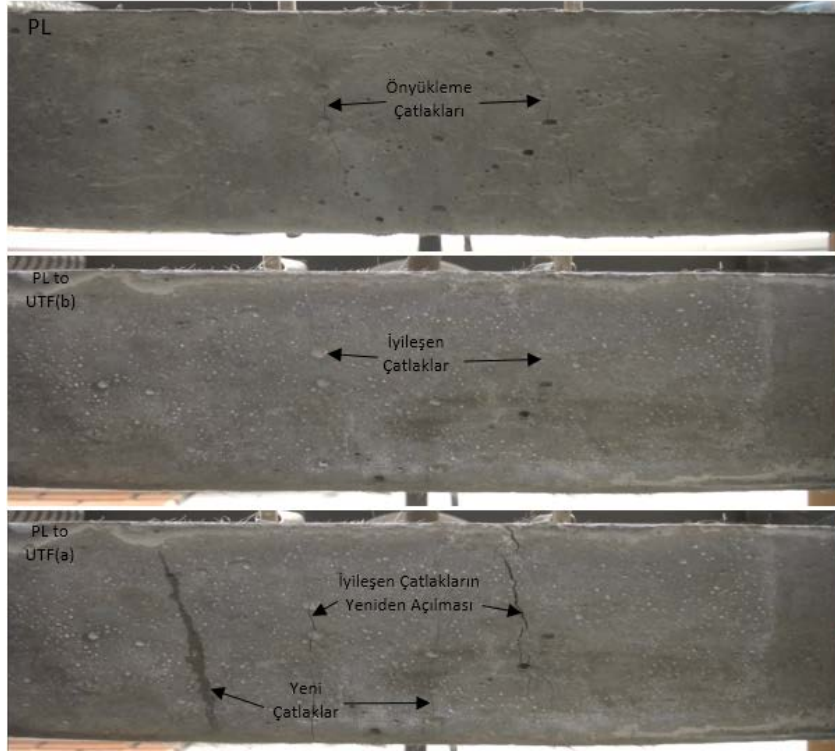
Şekil 4.37. S 1.2 numunesinin eğilme altında görüntüsü



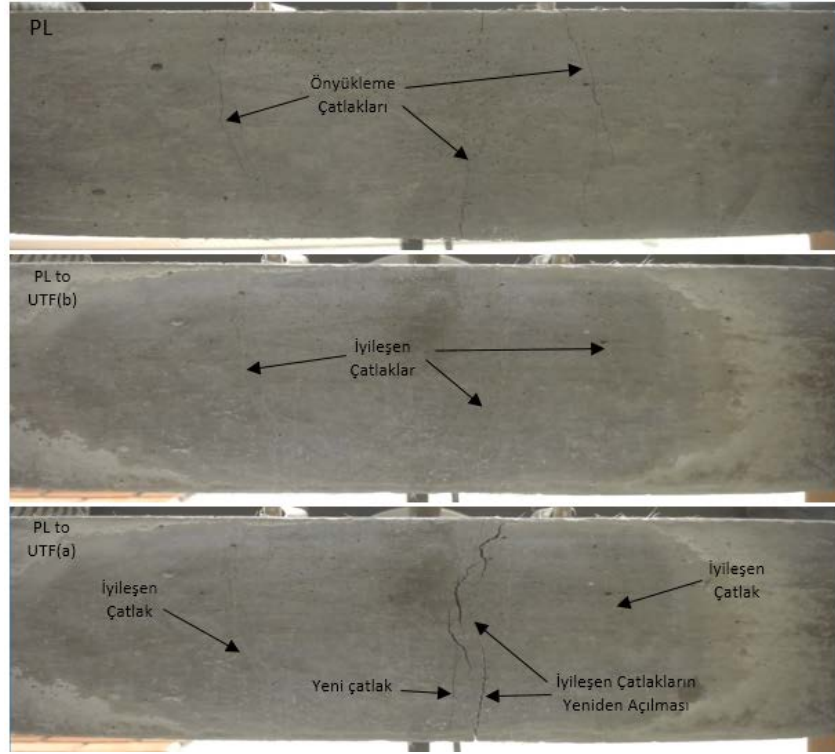
Şekil 4.38. S 2.2 numunesinin eğilme altında görüntüsü



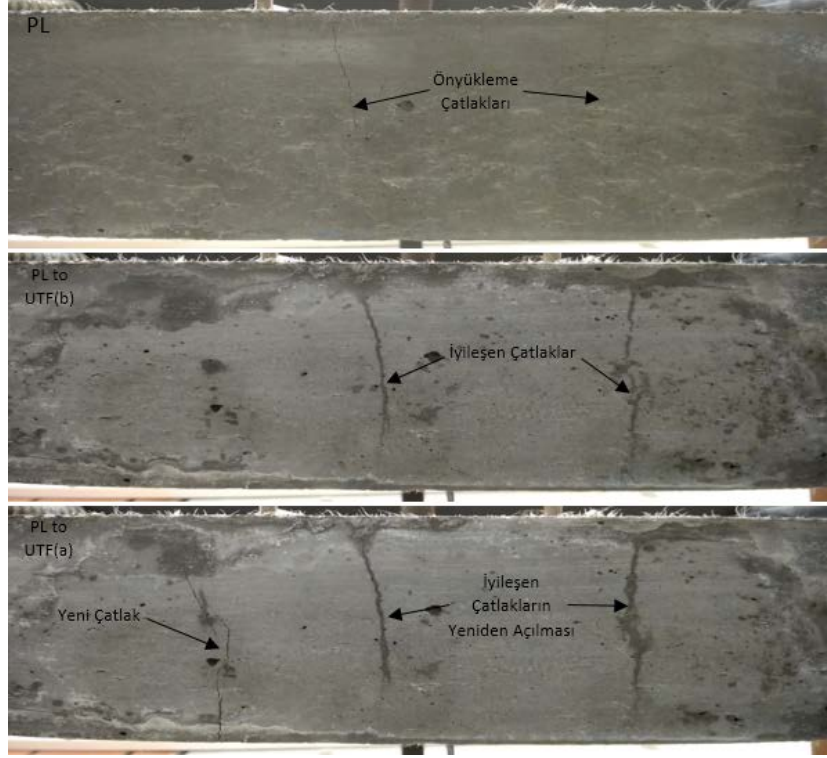
Şekil 4.39. i.a numunesinin eğilme altında görüntüsü



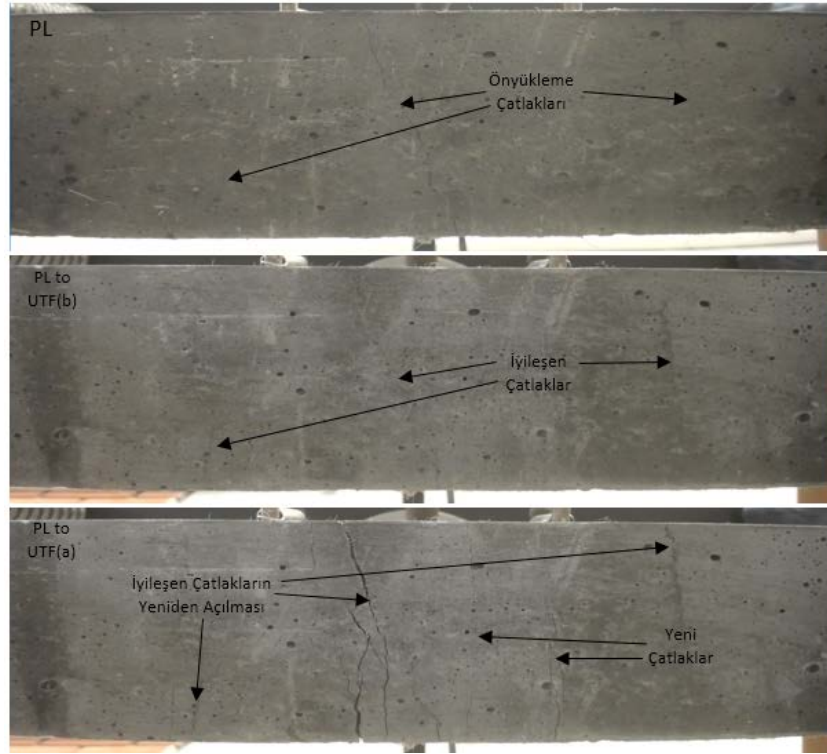
Şekil 4.40. i.b numunesinin eğilme altında görüntüsü



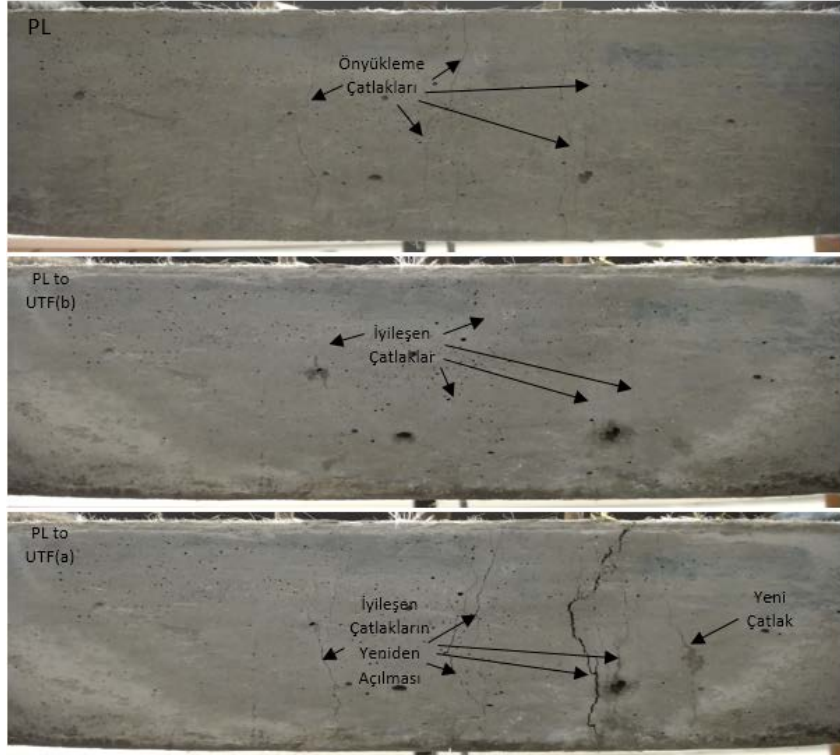
Şekil 4.41. ii.a numunesinin eğilme altında görüntüsü



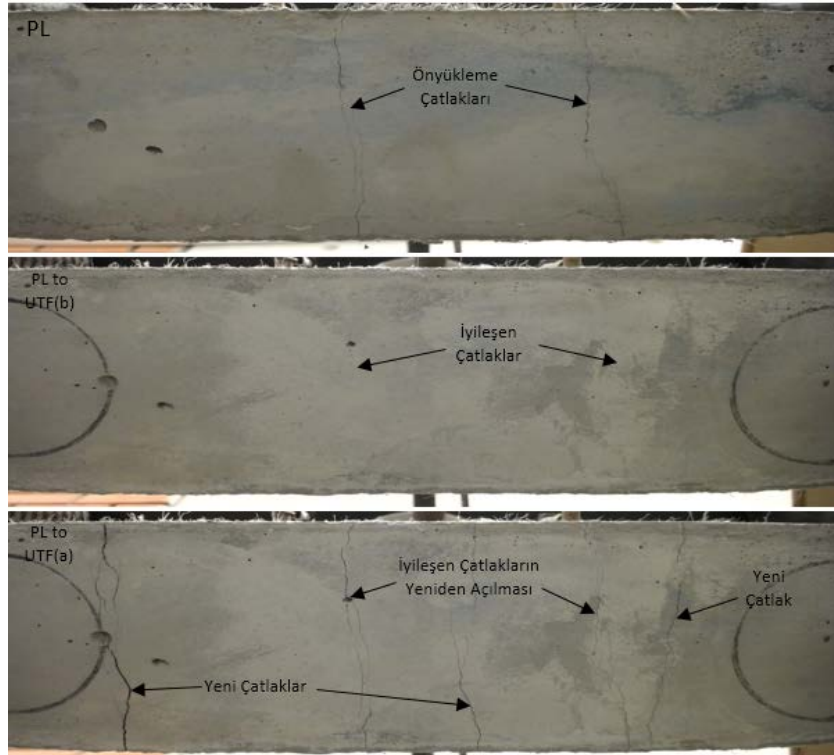
Şekil 4.42. ii.b numunesinin eğilme altında görüntüsü



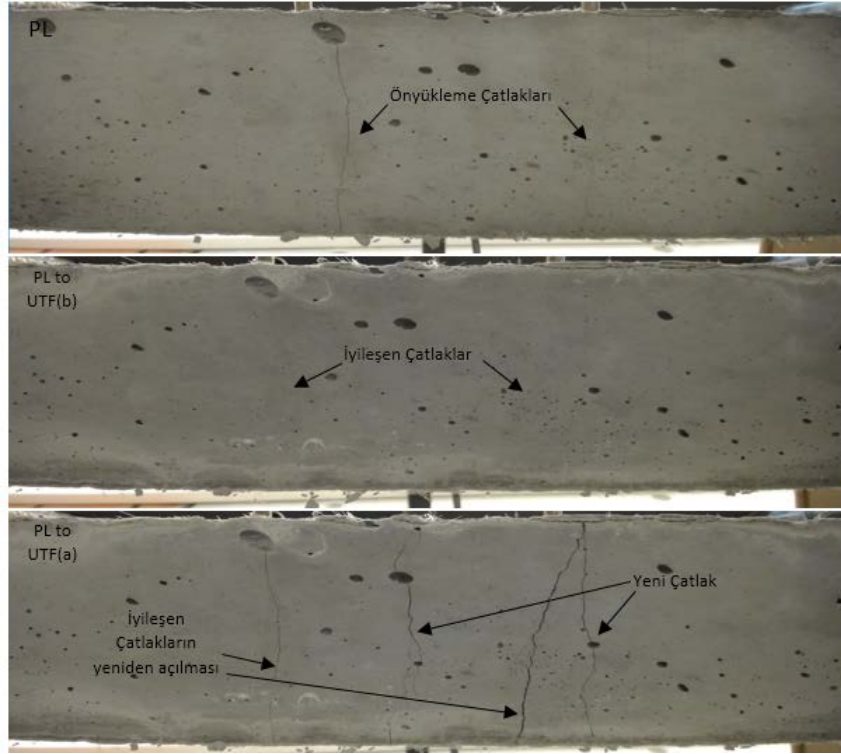
Şekil 4.43. ii.c numunesinin eğilme altında görüntüsü



Şekil 4.44. iii numunesinin eğilme altında görüntüsü



Şekil 4.45. i.bs numunesinin eğilme altında görüntüsü



Şekil 4.46. ii.as numunesinin eğilme altında görüntüsü

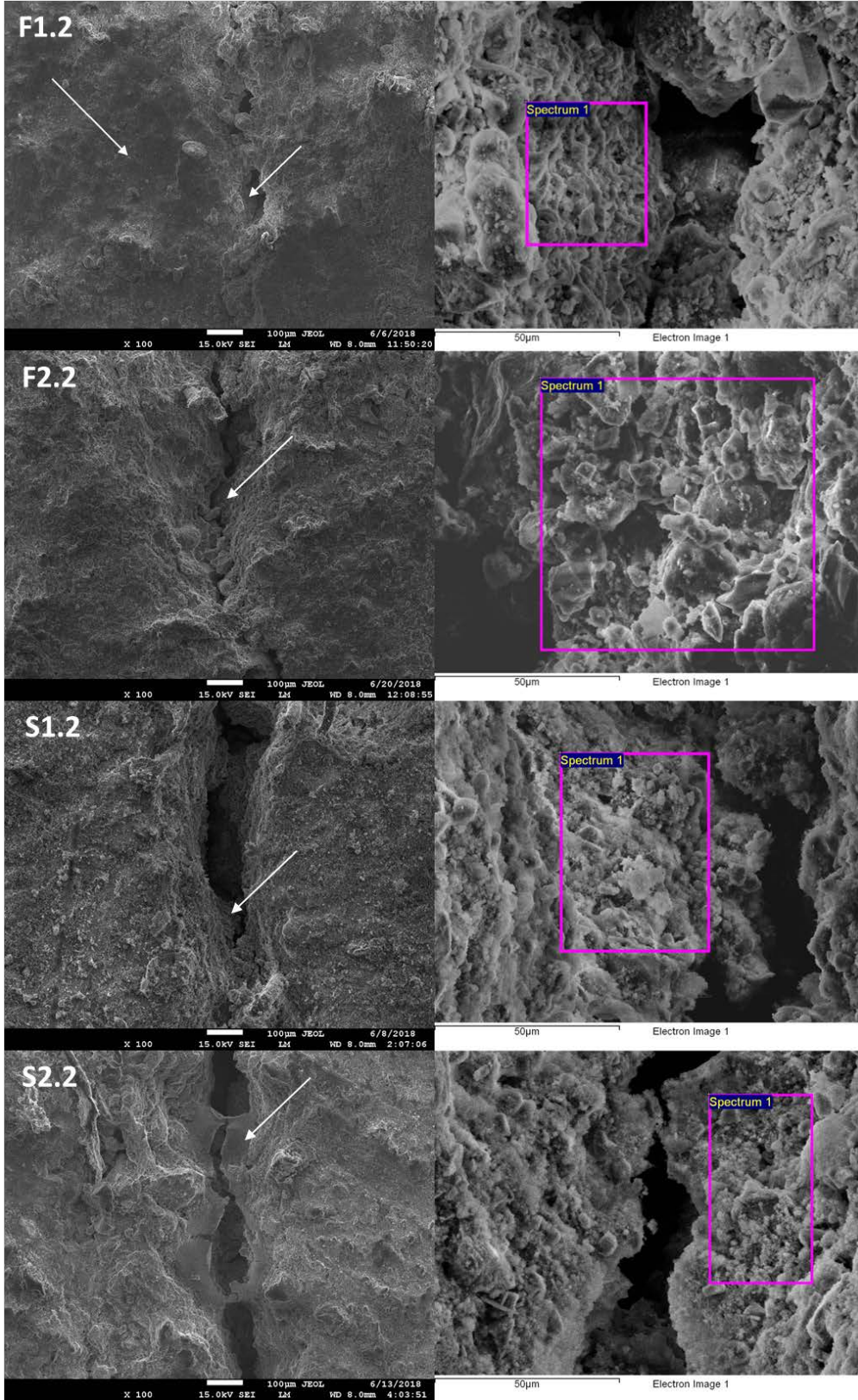
4.3.7 Çatlak Karakterizasyonu

İyileşme mekanizmasını gözlemlemek amacıyla önyükleme ile hasara uğratılmış numunelerin 90 günlük kendiliğinden iyileşme süreçleri sonunda, tüm TÇK karışımlarında mikro yapı incelemesi yapılmıştır. Bu amaçla çatlak çevresinden SEM görüntüleri alınarak, çatlak bölgesinin içinde EDS analizi uygulanmıştır. Ayrıca TÇK karışımlarından kazınarak alınan toz numuneler XRD ile de incelenmiştir.

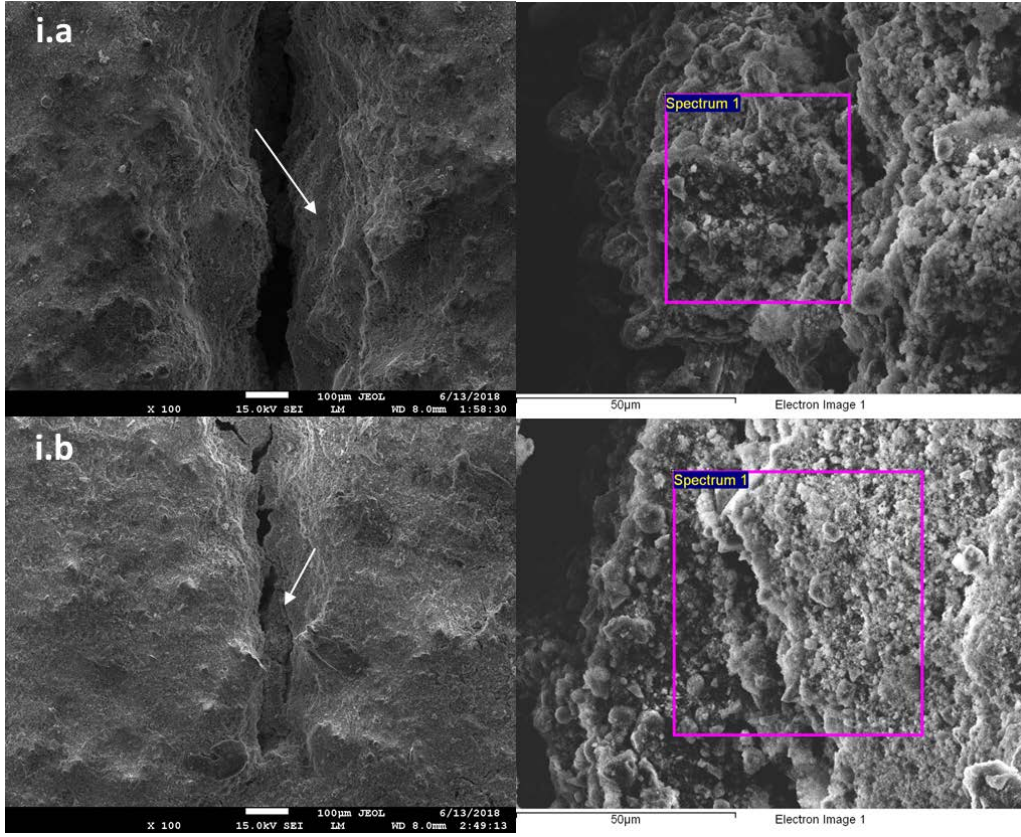
SEM görüntüleri standart TÇK karışımları, agrega ve bağlayıcıların ayrı ayrı optimize edildiği karışımlar, agrega ve bağlayıcıların birlikte optimize edildiği karışımlar ve silis dumanı içeren karışımlar için ayrı ayrı olmak üzere sırasıyla Şekil 4.47 , Şekil 4.48 , Şekil 4.49 , ve Şekil 4.50' de gösterilmiştir. Çatlakların içerisinde EDS ile belirlenen element analiz sonuçları ise tüm TÇK karışımları için Tablo 4.11'de listelenmiştir.

SEM görüntüleri incelendiğinde tüm TÇK karışımlarındaki çatlakların içinde kendiliğinden iyileşme ürünlerinin olduğu görülmektedir. Tüm karışımların EDS sonuçlarında ise elde edilen element yüzdelerinde oksijen (O), kalsiyum (Ca), karbon (C) ve silika (Si) elementlerinin baskınlığı açıkça görülmektedir. Literatürde "Si" elementinin baskınlığı çimentolu kompozitlerin kendiliğinden iyileşme ürünlerinden birisi olan karışık C-S-H/Ca(OH)₂ bileşiklerinin oluşumuna, "C" elementinin baskınlığı ise diğer bir kendiliğinden iyileşme ürünü olan CaCO₃ bileşiğinin

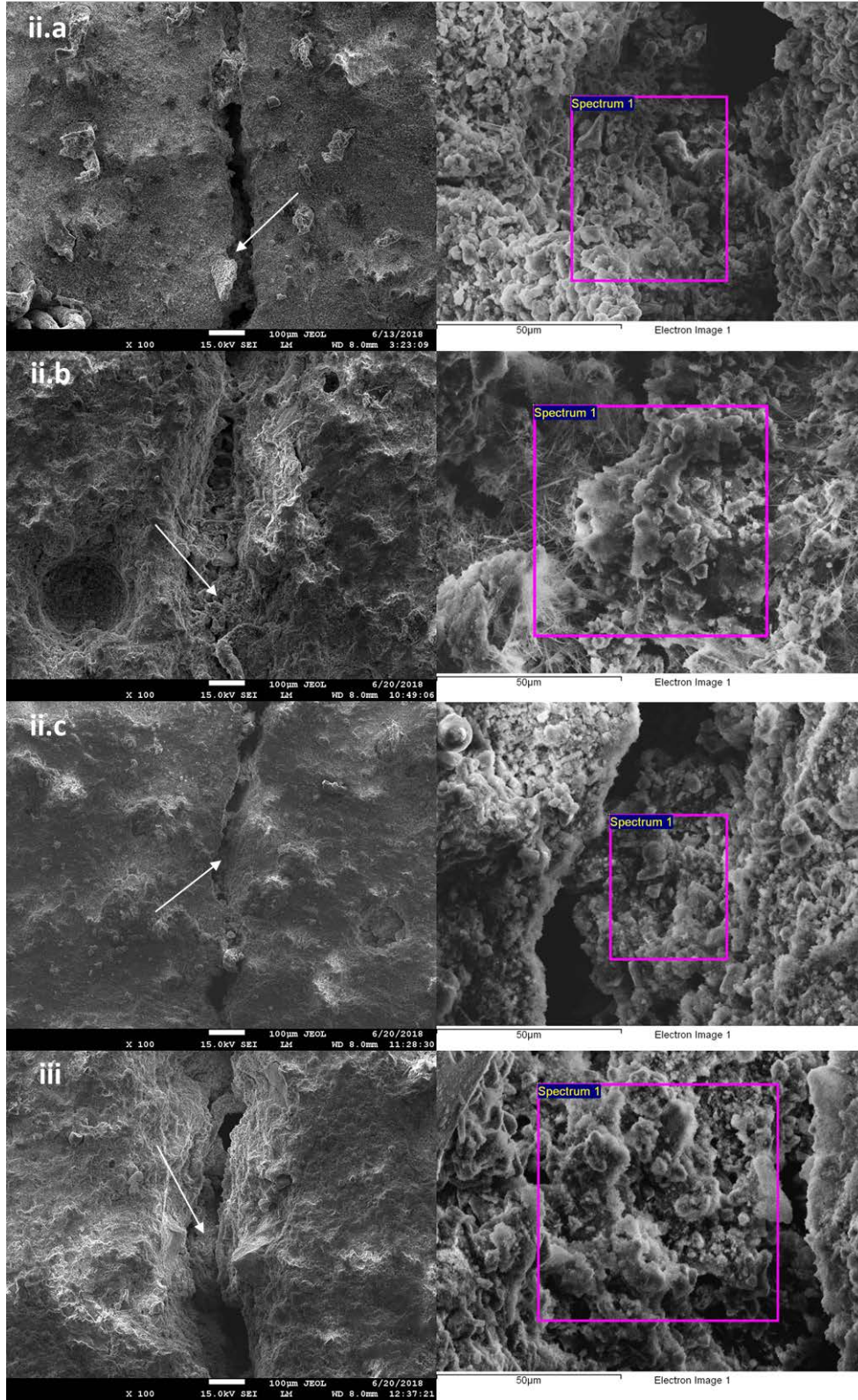
oluşumuna işaret etmektedir (Özbay vd., 2013-a; Siad vd., 2015). Kendiliğinden iyileşme sürecinde, CaCO_3 ürünü suyun varlığında matrisin içinden sızan Ca^{+2} ile CO_2 tepkimesi sonucunda çatlak yüzeyinde oluşmaktadır (Özbay vd., 2013-a). Diğer yandan, C-S-H ve Ca(OH)_2 bileşenleri ise hidrate olmamış bağlayıcıların devam eden hidratasyon ya da puzolanik reaksiyonlarının ürünü olarak ortaya çıkmaktadır (Fan ve Li, 2015). “C” elementi CaCO_3 içeriğinde bulunduğu için C/Ca oranının yüksekliği karbonatlaşmanın varlığına işaret etmektedir. “Si” elementi ise C-S-H jellerinin yapısında bulunduğu için Ca/Si oranının yüksekliği ortamda “Si” ile bileşik oluşturmayan “Ca”nın varlığına yani yine dolaylı olarak karbonatlaşmanın bulunduğu işaret eder. Burada kendiliğinden iyileşme ürünlerinin arasındaki en büyük fark mekanik ve geçirimsizlik özellikleri bakımından ortaya çıkmaktadır. C-S-H oluşumu hem mekanik hem geçirimsizlik özelliklerinin iyileşmesine katkı sağlarken, CaCO_3 oluşumu geçirimsizlik özelliklerinin iyileşmesine katkı sağlamaktadır (Fan ve Li, 2015).



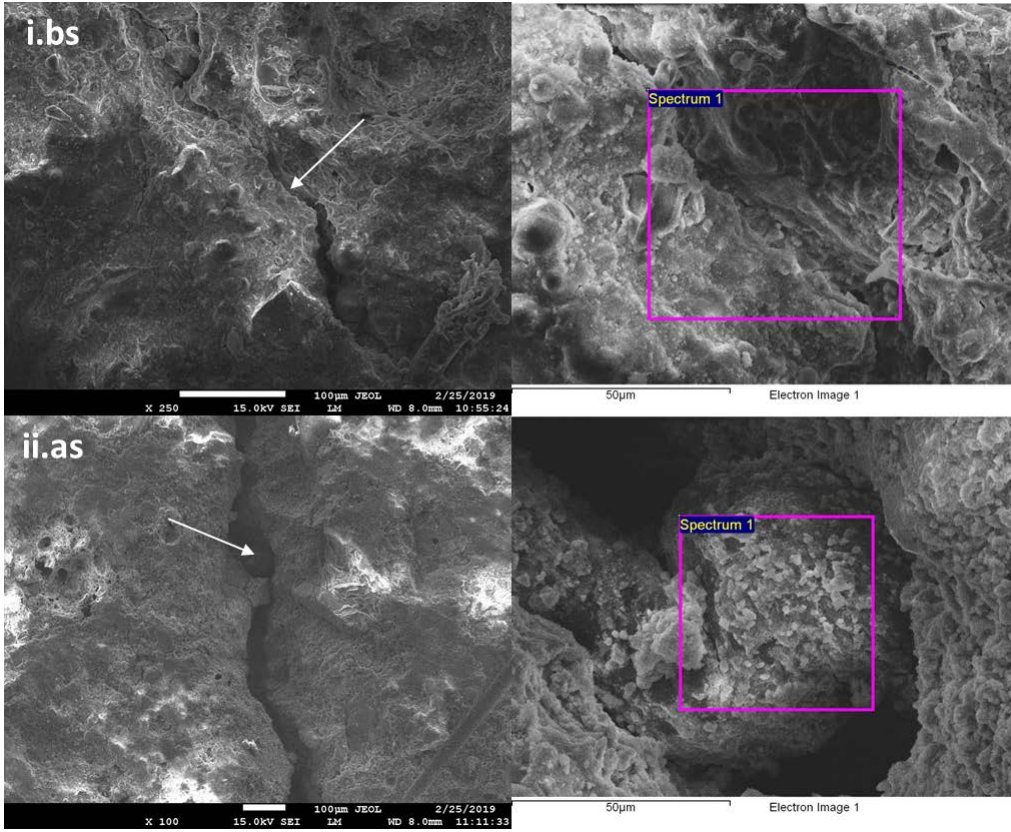
Şekil 4.47. Standart TÇK karışımlarının SEM görüntüleri



Şekil 4.48. Agrega ve bağlayıcıların ayrı ayrı optimizasyonu ile elde edilen TÇK karışımlarının SEM görüntüleri



Şekil 4.49. Agrega ve bağlayıcıların birlikte optimizasyonu sonucu elde edilen TÇK karışımlarının SEM görüntüleri



Şekil 4.50. Silis dumanı içeren TÇK karışımlarının SEM görüntüleri

Tablo 4.11. TÇK karışımlarında kendiliğinden iyileşme ürünlerinin EDS analiz sonuçları

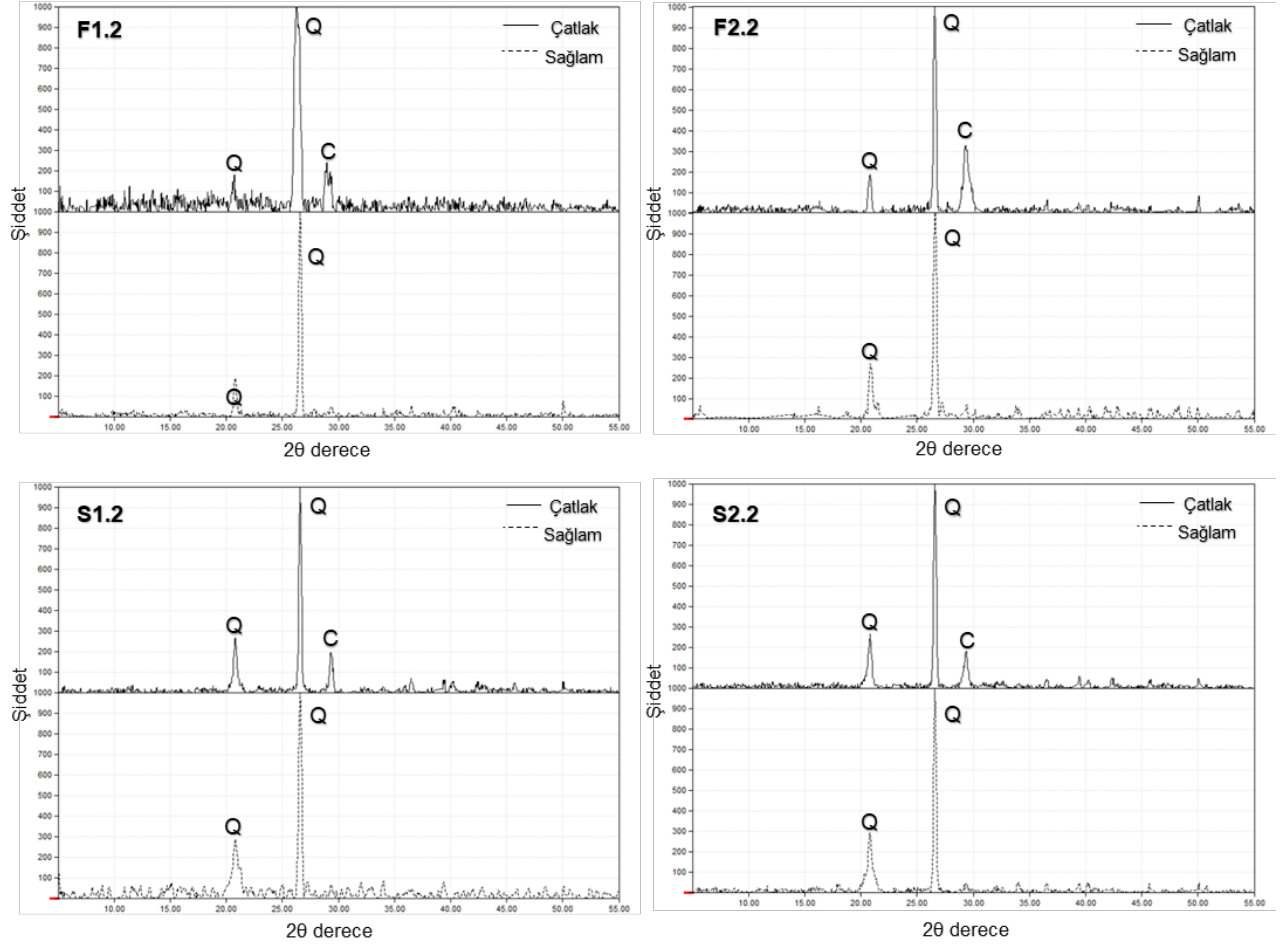
Elementler (%)	Karışım Kodu											
	F1.2	F2.2	S1.2	S2.2	i.a	i.b	ii.a	ii.b	ii.c	iii	i.bs	ii.as
C	11,4	13,2	12,3	13,0	11,1	12,7	13,2	14,5	14,3	12,9	11,9	11,7
O	53,8	51,7	52,7	52,2	54,8	52,8	55,3	55,5	55,6	54,2	55,3	54,7
Mg	0,4	0,6	1,2	1,5	0,5	1,3	0,5	1,0	1,2	1,8	1,2	1,5
Al	1,3	2,5	2,4	1,7	2,6	2,9	2,1	1,8	2,3	1,9	2,8	2,3
Si	10,5	11,3	13,2	15,4	8,6	12,1	11,8	7,5	10,6	12,0	14,5	15,0
S	0,1	0,9	0,9	0,4	0,4	0,9	0,5	1,2	0,6	0,3	0,7	0,6
K	0,5	0,5	0,6	0,4	1,5	0,5	0,4	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Ca	21,0	18,2	16,0	15,0	19,3	13,3	15,0	16,8	14,1	15,7	12,0	12,4
Fe	1,0	1,1	0,7	0,4	1,1	3,5	1,2	1,5	1,0	0,8	1,1	1,2
Ca/Si	2,0	1,6	1,2	1,0	2,2	1,1	1,3	2,2	1,3	1,3	0,8	0,8
C/Ca	0,5	0,7	0,8	0,9	0,6	1,0	0,9	0,9	1,0	0,8	1,0	0,9

Tablo 4.11’de görüldüğü üzere, bütün karışımlardaki çatlakların içinde “O”, “Ca”, “Si” ve “C” elementleri yüksek miktarda bulunmaktadır. Bu durum, beklenildiği üzere kendiliğinden iyileşme ürünlerinin karbonatlaşma mekanizması ile oluşan CaCO_3 ve/veya hidrate olmamış bağlayıcıların hidratasyonu neticesinde oluşan C-S-H jelleri ile Ca(OH)_2 olduğunu göstermektedir. Tablo 4.11’deki değerler incelendiğinde, elementlerin miktarlarının çok fazla sapmadığı, belli sınırlar içerisinde kaldığı görülmektedir. Bu sebeple, genel olarak bütün TÇK karışımlarının kendiliğinden iyileşme sürecinde her iki mekanizmanın da etkin olduğu söylenebilir. Özellikle öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren karışımlarda, düşük Ca/Si oranı ve yüksek “Si” muhtevası, çatlakların kapanmasında hidratasyon mekanizmasının daha etkin olduğu göstermektedir. Silis dumanı içeren i.bs ve ii.as karışımlarında ise yine “Si” miktarı nispeten yüksektir. Bu durum C-S-H varlığının yanı sıra karışımda bulunan hidrate olmamış silis dumanı tanelerinden de kaynaklanabilir. Silis dumanı içeren karışımların “C” muhtevası da diğer karışımlara kıyasla bir miktar düşüktür. Bu durum puzolanik reaksiyonlar esnasında yüksek miktarda tüketilen Ca(OH)_2 eksikliği nedeniyle minimum düzeyde karbonatlaşma reaksiyonu gerçekleşmesine işaret etmektedir. Tablo 3.4, 3.5 ve 3.6’da verilen karışım oranları incelendiğinde F 1.2 ile i.a karışımlarının ve i.b ile iii karışımlarının bağlayıcı kompozisyonlarının birbirinin aynısı olduğu, sadece agrega karışımlarının farklı olduğu görülmektedir. EDS sonuçlarına göre de benzer karışımların benzer kendiliğinden iyileşme ürünleri oluşturduğu söylenebilir. Ayrıca F 2.2 karışımının bağlayıcı kısmı i.b, ii.a, ii.c ve iii karışımları ile oldukça benzerdir. Yine bu TÇK karışımları için çatlak kapanma mekanizması sırasında oluşan kendiliğinden iyileşme ürünlerinin de benzer miktarlarda olduğu Tablo 4.11’de de görülmektedir. Çimento içeriği en yüksek olan ii.b karışımının kendiliğinden iyileşme ürünü diğer karışımlara kıyasla en yüksek miktarda “C” içeriğine sahiptir, yani yüksek miktarda

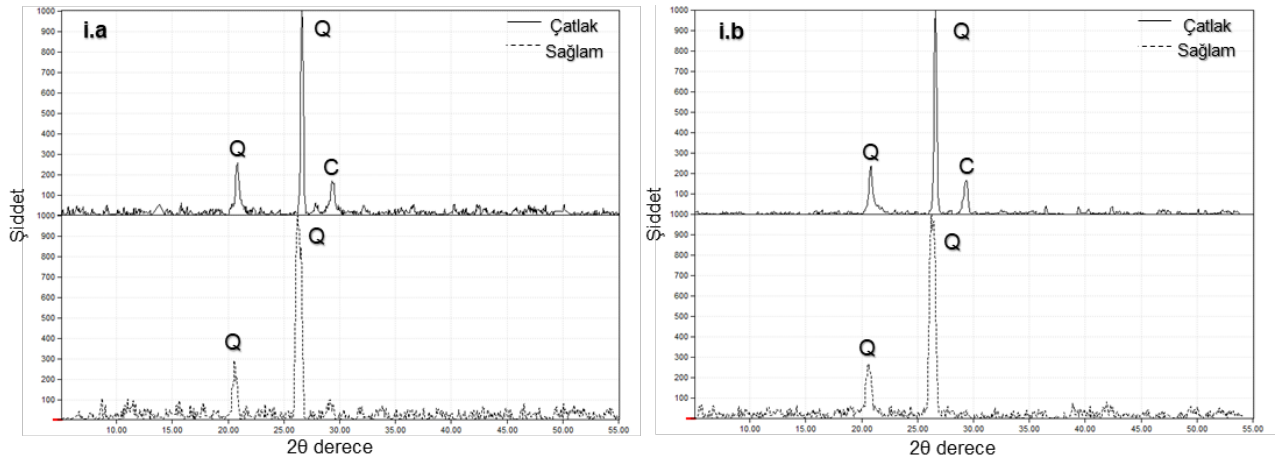
karbonatlaşma olduğu anlaşılmaktadır. Bu durumun yüksek çimento içeriğinden dolayı ortamda yüksek miktarda Ca(OH)_2 bulunmasından kaynaklanmış olabileceği düşünülmektedir.

TÇK karışımlarının 90 günlük kendiliğinden iyileşme süreci sonunda oluşturduğu ürünleri incelemek için, hasara uğratılmış numunelerin çatlaklarından ve hasara uğratılmamış numunelerin iç kısmından alınan toz örnekler XRD analizi uygulanmıştır. Karışımların XRD analizleri, standart TÇK karışımları, agrega ve bağlayıcıların ayrı ayrı optimizasyonu, agrega ve bağlayıcıların birlikte optimizasyonu ve silis dumanı içeren karışımlar için olmak üzere sırasıyla Şekil 4.51 , Şekil 4.52 , Şekil 4.53 ve Şekil 4.54’de verilmiştir. Her bir TÇK karışımı için sağlam kısımdan alınan toz numunelerin sonuçları ve çatlak içinden alınan toz numunelerin sonuçları birlikte verilmiştir.

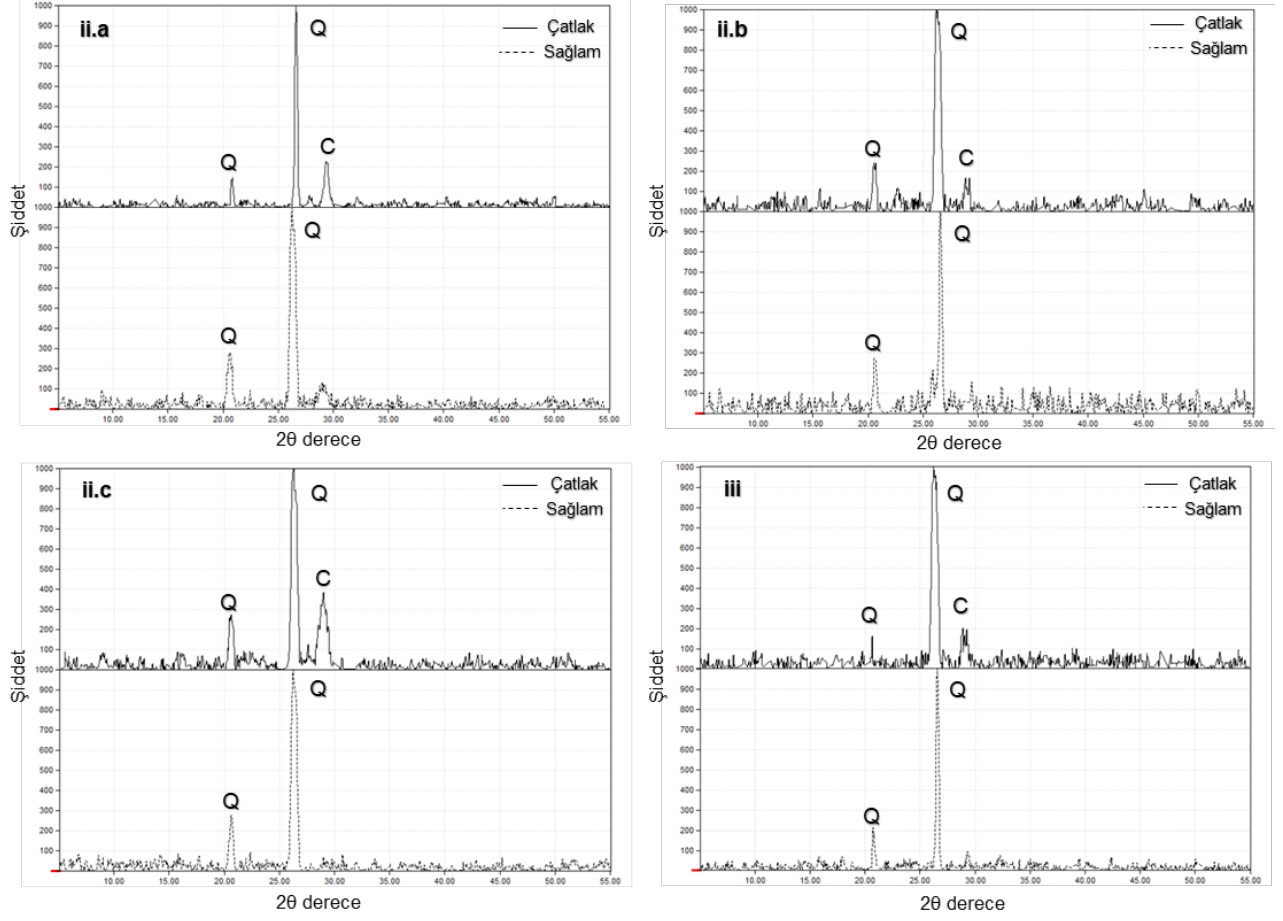
Genel olarak tüm karışımların XRD analizleri incelendiğinde kalsit ve kuvars piklerinin öne çıktığı açıkça görülmektedir. XRD analizinde görülen kalsit piki CaCO_3 ürünü oluşumuyla, kuvars piki ise C-S-H ürünü oluşumuyla ilişkilendirilmektedir (Siad vd., 2015). Burada kuvars pikleri 20.5 ve 26.5 2θ derece, kalsit piki ise 29.5 2θ derece etrafında yoğunlaşmaktadır. Tüm karışımlarda çatlak bölgesinden alınan ve sağlam bölgeden alınan örneklerin sonuçları kıyaslandığında, çatlak bölgesinden alınan örneklerin XRD analiz sonuçlarında sağlam bölgeden alınan örneklere kıyasla kalsit pikinin belirgin şekilde kendini gösterdiği görülmektedir. Bu TÇK karışımlarının sağlam kısımlarında karbonatlaşma bulunmadığını fakat kendiliğinden iyileşme sonucunda hem CaCO_3 hem de C-S-H jellerinin oluştuğuna işaret etmektedir. XRD analiz sonuçlarının SEM-EDS analiz sonuçlarını destekler nitelikte olduğu görülmektedir.



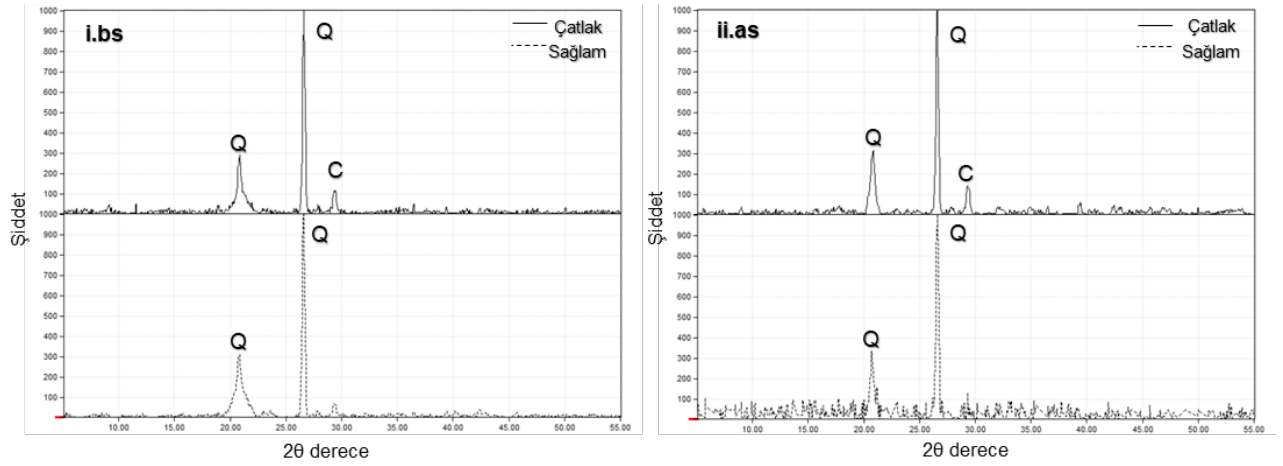
Şekil 4.51. Standart TÇK karışımlarının XRD analizleri (Q : Kuvars ve C : Kalsit)



Şekil 4.52. Agreg ve bağlayıcıların ayrı ayrı optimizasyonu ile elde edilen TÇK karışımlarının XRD analizleri (Q : Kuvars ve C : Kalsit)



Şekil 4.53. Agrega ve bağlayıcıların birlikte optimizasyonu sonucu elde edilen TÇK karışımlarının XRD analizleri (Q : Kuvars ve C : Kalsit)



Şekil 4.54. Silis dumanı içeren TÇK karışımlarının XRD analizleri (Q : Kuvars ve C : Kalsit)



5. SONUÇ

Bu çalışmada katı taneciklerin arasındaki boşluk miktarının optimize edilmesi ile çeşitli TÇK karışımları tasarlanmıştır. Modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen modeli kullanılarak TÇK karışımlarında bağlayıcı olan ve olmayan malzemeler ayrı ayrı ve birlikte optimize edilmek suretiyle toplam 8 adet yeni TÇK tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Literatürde sıklıkla karşılaşılan 4 standart karışım da yerel malzemelerle üretilmiştir. Belirlenen 12 farklı TÇK karışımının taze ve sertleşmiş haldeki boşluk miktarları, basınç dayanımları, eğilme altında dayanım ve orta açıklık sehim kapasiteleri ile kendiliğinden iyileşme performansları araştırılmıştır. Kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesi için kontrollü olarak hasara uğratılmış numuneler ile aynı yaşlardaki sağlam numunelere 4-noktalı eğilme deneyi uygulanarak eğilme dayanımı ve orta açıklık sehim kapasiteleri belirlenmiş, ultrases dalga geçiş hızları, elektriksel özdirenç değerleri, kılcal su emme indeksleri ve hızlı klor iyonu geçirimsizlikleri ölçülmüş, çatlakların zamanla değişimleri görsel yöntemle takip edilmiş ve kendiliğinden iyileşme ürünlerinin mikro yapıları incelenmiştir. Böylece, farklı şekillerde uygulanan tane boyutu optimizasyonu yönteminin TÇK'ların boşluk miktarı, mekanik ve kendiliğinden iyileşme özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Proje kapsamında elde edilen sonuç ve bulgular aşağıda maddeler halinde özetlenmektedir:

Optimizasyon ile belirlenen bütün karışımlar için taze haldeki boşluk miktarının referans olarak alınan F 1.2 karışımına göre daha düşük olduğu, optimizasyonun bu bağlamda amacına ulaştığı görülmektedir.

Her ne kadar optimizasyon ile taze haldeki boşluk miktarı düşürülmüşse de, sertleşmiş haldeki gözenek yapısının bağlayıcı malzemenin türü, miktarı ve agrega boyut ve miktarı ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Genel olarak bağlayıcı miktarı ve kullanılan puzolanların reaktifliği arttıkça (cüruf ve silis dumanı) boşluk yapısının küçüldüğü görülmektedir. Daha az reaktif olan uçucu kül ise diğer bağlayıcılara oranla boşluk yapısı üzerinde daha etkisizdir. Bununla birlikte ortalama boşluk çapı düşük olan karışımların aynı zamanda daha yüksek dayanım göstermesi ile boşluk yapısının incelenmesi yani jel boşluğu miktarının artması durumunda dayanım değerlerinin de arttığı anlaşılmaktadır.

Basınç dayanımı değerleri incelendiğinde optimizasyonla elde edilen karışımların erken yaşlarda F 1.2 kontrol karışımına kıyasla daha düşük basınç dayanımına sahip oldukları, fakat

ileri yaşlarda aradaki farkın azaldığı, hatta bağlayıcı içeriğine bağlı olarak kontrol karışımından daha yüksek değerlere ulaşabildiği görülmektedir.

Eğilme dayanımı sonuçları basınç dayanımı sonuçlarına benzer özellik göstermektedir. Sehım kapasiteleri karşılaştırıldığında ise silis dumanı içeren i.as ve ii.bs ile en yüksek çimento içeriğine sahip ii.b karışımları haricinde optimizasyon ile elde edilen TÇK'ların sehım kapasiteleri F 1.2 kontrol karışımına göre biraz daha fazladır.

Eğilme altında öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu içeren S 1.2 ve S 2.2, silis dumanı içeren i.bs ve ii.as ve en yüksek çimento içeriğine sahip ii.b karışımlarının F 1.2 kontrol karışımına göre hem hasarlı hem de hasarsız durumda sehım kapasiteleri tüm yaşlarda daha düşükken eğilme dayanımları daha yüksektir. Tüm hasarlı karışımların zaman içerisinde eğilme özelliklerinin iyileştiği görülmektedir.

Hasarlı numunelerin ultrases geçiş hızlarındaki artışın hasarsız numunelerin ultrases geçiş hızlarındaki artıştan fazla olması, tüm karışımlarda kendiliğinden iyileşmenin göstergesi olarak kabul edilmiştir. Silis dumanı içeren karışımlarda (i.bs ve ii.as) iyileşmenin genel olarak diğer karışımlara kıyasla daha az gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

Optimizasyon ile modellenen TÇK karışımları arasında benzer karışım oranlarına sahip karışımlar benzer klor iyonu geçirimsizliği davranışı göstermişlerdir. Silis dumanı içeren karışımlar haricindeki tüm TÇK'ların iletim özellikleri zamanla iyileşmiştir. Silis dumanı içeren karışımların ise iletim değerleri çok düşük olduğu için bu yöntemle güvenilir bir şekilde test edilemeyeceği düşünülmektedir.

Elektriksel öz direnç ölçüm deneyinin kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesinde en uygun kullanım yönteminin anlaşılması amacıyla farklı kombinasyonlarda testler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak, suya doygun numunelerin çatlak doğrultusunda test edilmesinin kendiliğinden iyileşme davranışını daha iyi yansıttığı belirlenmiştir.

Kılcal su emme deney yönteminin kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesinde özellikle silis dumanı içeren ve kılcal su geçirimsizliği çok düşük olan karışımlar için uygun olmadığı söylenebilir. Diğer karışımların su emme indekslerinde zamanla meydana gelen azalmanın, kendiliğinden iyileşmeyi ifade ettiği düşünülmektedir.

Görsel olarak çatlakların incelenmesi, zaman içerisinde tüm TÇK karışımlarında çatlak genişliklerinde azalma meydana geldiğini göstermiştir.

Kendiliğinden iyileşme ürünlerinin analiz sonuçları proje kapsamında test edilen tüm TÇK karışımlarında çatlak içerisinde hem hidrasyon hem de karbonatlaşma ürünlerinin meydana geldiğini, kendiliğinden iyileşmede her iki mekanizmanın da etkin olduğunu göstermiştir.



Sonuç olarak, proje kapsamında üretilen TÇK karışımlarının kendiliğinden iyileşme performansı sergilediği, optimizasyonun karışımların özelliklerine olumlu etki ettiği görülmektedir. Tane boyutu optimizasyonu ile toplam bağlayıcı miktarının yüksek olduğu veya silis dumanı gibi reaktivitesi yüksek olan bağlayıcıların kullanıldığı durumlarda ise kendiliğinden iyileşme performansları kontrol karışımına göre daha sınırlı olmuştur.



REFERANSLAR

Aldea, C., Song W., Popovics J. S., Shah S. P., 2000. "Extent of healing of cracked normal strength concrete", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 12, 92–96.

Alyousif , A., Lachemi M., Yildirim G., Sahmaran M. 2015. "Effect of self-healing on the different transport properties of cementitious composites", *Journal of Advanced Concrete Technology*, 13, 112–123.

Andersen P. J., Johansen, V., 1991. "Particle packing and concrete properties", *Material Science of Concrete: II*, Editörler: Skalny J., Mindess S., Westerville, Ohio: The American Ceramic Society Inc.

Andreasen, A. H. M. and Andersen, J., 1930. "Über die Beziehung zwischen Kornabstufung und Zwischenraum in Produkten aus losen Körnern (mit einigen Experimenten)". *Colloid & Polymer Science*, 50(3), 217-228, İçinde: Wang, X., Wang K., Taylor P., Morcoux G., 2014. "Assessing particle packing based self-consolidating concrete mix design method", *Construction and Building Materials*, 70, 439–452.

ASTM C 109, 2016. "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars", American Society for Testing and Materials.

ASTM C 1202, 2012. "Standard test method for electrical indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration", American Society for Testing and Materials.

ASTM C 597, 2016. "Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete", American Society for Testing and Materials.

ASTM C1260, 2014. "Standard Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)", American Society for Testing and Materials.

ASTM C1585, 2013. "Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes", American Society for Testing and Materials.

Clear, C. A. 1985. "The Effects of Autogenous Healing upon the Leakage of Water through Cracks in Concrete", Slough, Buckinghamshire: Wexham Springs.

Diamond, S., Sahu, S., 2006. "Densified silica fume: particle sizes and dispersion in Concrete" *Materials and Structures*, 39, 849–859.

Dinger, D. R., Funk, J. E., 1997. "Particle-packing phenomenon and their application in materials processing", *MRS Bulletin*, 22(12), 19-23.

Edvardsen, C. 1999. "Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete", *ACI*

Materials Journal, 96, 448–455.

Fan, S., Li, M., 2015. “X-ray computed microtomography of three-dimensional microcracks and self-healing in engineered cementitious composites”, *Smart Materials and Structures*, 24,1, 015021.

Fuller, W. B., Thompson S. E. 1907. “The laws of proportioning concrete”, *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 33, 222–298. İçinde: Wang, X., Wang K., Taylor P., Morcou G., 2014. “Assessing particle packing based self-consolidating concrete mix design method”, *Construction and Building Materials* 70, 439–452.

Funk, J. E., Dinger D. R. 1994. “Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions”, *Applied to Ceramic Manufacturing (e-kitap)*, Boston: Kluwer Academic Publishers.

Gagne, R., Argouges M., 2012. “A study of the natural self-healing of mortars using airflow measurements”, *Materials and Structures*, 45, 1625–1638.

Hunger, M. 2010. “An integral design concept for ecological self-compacting concrete”, PhD Thesis, Eindhoven, the Netherlands: Eindhoven University of Technology.

Ismail M., Toumi A., Francois R., Gagne R. 2004. “Effect of crack opening on local diffusion of chloride inert materials”, *Cement and Concrete Research*, 34, 711–716.

Jacobsen, S., Marchand J., Homain H., 1995. “SEM observations of the microstructure of frost deteriorated and self-healed concrete”, *Cement and Concrete Research*, 25, 1781–1790.

JSCE, Japan Society of Civil Engineers. “Recommendations for design and construction of high performance fiber reinforced cement composites with multiple fine cracks (HPFRCC)”, http://www.jsce.or.jp/committee/concrete/e/hpfrcc_JSCE.pdf. Son erişim tarihi: 14.05.2012.

Kan, L. L., Shi H. S., Sakulich A. R., Li V.C. 2010. “Self-healing characterization of engineered cementitious composite materials”, *ACI Materials Journal*, 107, 617–624.

Kanda, T., Saito T., Sakata N. 2003. “Tensile and anti-spalling properties of direct sprayed ECC”, *Advanced Concrete Technology*, 1(3), 269-282.

Keskin, S. B. 2012. “Dimensional Stability of Engineered Cementitious Composites”, PhD Thesis, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Ankara: Orta Doğu Teknik Üniversitesi.

Kumar, S. V., Santhanam, M., 2003. “Particle packing theories and their application in concrete mixture proportioning: A review”, *Indian Concrete Journal* 77(9):1324-1331

Lepech M. D., Li, V. C., 2009. “Water permeability of engineered cementitious composites”,



Cement and Concrete Composites, 31(10), 744–753.

Lepech, M. D., Li, V. C., Robertson R. E., Keoleian G.A. 2008. "Design of Green Engineered Cementitious Composites for Improved Sustainability", *ACI Materials Journal*, 105(6), 567-575.

Li, M., Li, V. C. 2011. "Cracking and healing of engineered cementitious composites under chloride environment", *ACI Materials Journal*, 108, 333–340.

Li, V. C. 1998. "Engineered cementitious composites - tailored composites through micromechanical modeling", *Fiber Reinforced Concrete: Present and the Future*. Editörler: Banthia, N., Bentur A., Mufti A., Montreal, Canada: Canadian Society for Civil Engineering.

Li, V. C., 2001. "J-integral applications to characterization and tailoring of cementitious materials", *Multiscale deformation and fracture in materials and structures*. Editörler: Chuang, T. J., Rudnicki J.W., The J.R. Rice 60th Anniversary Volume, 385-406 Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

Li, V. C., 2002. "Advances in ECC research", *SP 206-23 ACI Special Publication on Concrete: Material Science to Applications*, 373-400.

Li, V. C., 2003. "On engineered cementitious composites (ECC) – a review of the material and its applications", *Journal of Advanced Concrete Technology*, 1, 215-230

Li, V. C., Fischer G., Kim Y. Y., Lepech M., Qian S., Weimann M., Wang S. 2003. "Durable link slabs for jointless bridge decks based on strain-hardening cementitious composites", *Research Report RC-1438*, Michigan Department of Transportation.

Li, V. C., Herbert E., 2012. "Robust self-healing concrete for sustainable infrastructure", *Journal of Advanced Concrete Technology*, 10, 207–218.

Li, V. C., Kanda T. 1998." Engineered cementitious composites for structural applications", *Journal of Materials in Civil Engineering*, 10(2), 66-69.

Li, V. C., Lepech M. 2004. "Crack resistant concrete material for transportation construction", *Transportation Research Board 83rd Annual Meeting*, Washington D.C.

Li, V. C., Leung C. K. Y., 1992. "Steady state and multiple cracking of short random fiber composites", *ASCE Journal of Engineering Mechanics*, 118, 2246-2264.

Li, V. C., Mishra D. K., Wu H. C. 1995. "Matrix design for pseudo strain-hardening fiber reinforced cementitious composites", *Materials and Structures*, 28(10), 586-595.

Li, V. C., Mishra D.K., Naaman A. E., Wight J. K., La Fave J. M., Wu H. C., Inada Y. 1994." On the shear behavior of engineered cementitious composites", *Journal of Advanced Cement*

Based Materials, 1(3), 142-149.

Li, V. C., Wang S., Wu C. 2001. "Tensile strain-hardening behaviour of PVA-ECC", ACI Materials Journal, 98(6), 483-492.

Li, V. C., Wu C., Wang S., Ogawa A. and Saito T. C. 2002. "Interface tailoring for strain-hardening PVA-ECC", ACI Materials Journal, 99(5), 463-472.

Li., M., Şahmaran M., Li V. C. 2007. "Effect of cracking and healing on durability of engineered cementitious composites under marine environment", High Performance Fiber Reinforced Cement Composites (HPFRCC5), Mainz, Germany.

Lin, Z., Kanda T., Li V. C., 1999. "On interface property characterization and performance of fiber reinforced cementitious composites", Concrete Science and Engineering, 1, 173-184

Miyazato, S., Hiraishi Y. 2005. "Transport properties and steel corrosion in ductile fiber reinforced cement composites", 11th International Conference on Fracture Turin, Italy.

Mueller, F. V., Wallevik O. H., Khayat K. H. 2014. "Linking solid particle packing of Eco-SCC to material performance", Cement & Concrete Composites, 54, 117–125.

Ozbay, E., Sahmaran M., Lachemi M., Yucel H.E. 2013-a. "Self-healing of microcracks in high volume fly ash incorporated engineered cementitious composites", ACI Materials Journal, 110, 33–44.

Ozbay, E., Sahmaran M., Yucel H. E., Erdem T. K., Lachemi M., Li V.C. 2013-b. "Effect of sustained flexural loading on self-healing of engineered cementitious composites", Journal of Advanced Concrete Technology, 11, 167–179.

Qian, S., Zhou J., De Rooij M. R., Schlangen E., Ye G., Van Breugel K. 2009. "Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials", Cement and Concrete Composites, 31, 613–621.

Qian, S., Zhou J., Schlangen E. 2010. "Influence of curing condition and precracking time on the self-healing behavior of engineered cementitious composites", Cement and Concrete Composites, 32, 686–693.

Reinhardt, H. W., Jonkers, H., Van Tittelboom, K., Snoeck, D., De Belie, N., De Muynck, W. 2013., "Recovery against environmental action", Self-healing Phenomena in Cement-based Material, RILEM State-of-the-Art-Reports, Editörler: M. de Rooji, K. Van Tittelboom, N. De Belie, E. Schlangen , Dordrecht: Springer.

Reinhardt, H., Jooss M. 2003. "Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width", Cement and Concrete Research, 33, 981–985.

Sahmaran M., Lachemi M., Hossain K.M.A., Ranade R., Li, V.C. 2009. "Influence of Aggregate Type and Size on Ductility and Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites", *ACI Materials Journal*, 106(3), 308-316.

Sahmaran, M., Li M., Li V. C. 2007. "Transport properties of engineered cementitious composites under chloride exposure", *ACI Materials Journal*, 104(6), 604-611.

Sahmaran, M., Li V. C. 2008. "Durability of mechanically loaded engineered cementitious composites under highly alkaline environments", *Cement and Concrete Composites*, 30(2), 72-81.

Sahmaran, M., Li V. C. 2009-a. "Durability properties of micro-cracked ECC containing high volumes fly ash", *Cement and Concrete Research*, 39(11), 1033-1043.

Sahmaran, M., Li, V. C. 2009-b. "Influence of microcracking on water absorption and sorptivity of ECC", *Materials and Structures*, 42(5), 593-603.

Sahmaran, M., Li V. C., 2007. "De-icing salt scaling resistance of mechanically loaded engineered cementitious composites", *Cement and Concrete Research*, 37, 1035–1046.

Sahmaran, M., Li V. C., Andrade C. 2008. "Corrosion resistance performance of steel-reinforced engineered cementitious composite beams", *ACI Materials Journal*, 105(3), 243-250.

Sahmaran, M., Yildirim G., Erdem T.K. 2013. "Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials", *Cement and Concrete Composites*. 35, 89–101.

Sahmaran, M., Yildirim G., Hasiloglu G. A., Keskin, S. B., Keskin, Ö. K., Lachemi, M., 2017. "Self-Healing of Cementitious Composites to Reduce High CO₂ Emissions", *ACI Mater. J.*, 114, 93-104.

Sahmaran, M., Yildirim G., Ozbay E., Ahmed K., Lachemi M. 2014. "Self-healing ability of cementitious composites: effect of addition of pre-soaked expanded perlite", *Magazine of Concrete Research*, 66, 409–419.

Shi, C., 2004. "Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results", *Cement Concrete Research*, 34, 537–545.

Siad, H., Alyousif A., Keskin Ö. K., Keskin B. S., Lachemi M., Sahmaran M., Hossain A. 2015. "Influence of limestone powder on mechanical, physical and self-healing behavior of Engineered Cementitious Composites", *Construction and Building Materials*, 99, 1-10.

Spragg, R., Bu, Y., Snyder, K., Bentz, D., Weiss, J., 2013. "Electrical Testing of Cement-Based Materials: Role of Testing Techniques, Sample Conditioning and Accelerated Curing", Joint Transportation Research Program, West Lafayette, Indiana: Indiana Department of Transportation and Purdue University.

Talbot, A. N., Richart, F. E., 1923. "The strength of concrete in relation to the cement, aggregates and water." University of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin No. 137.

Wang, S., Li V. C. 2007." Engineered cementitious composites with high-volume fly ash", ACI Materials Journal, 104(3), 233-241.

Wang, S., Li V. C., 2007. "Engineered cementitious composites with high-volume fly ash". ACI Mater. J., 2007; 104, 233–41.

Wang, X., Wang K., Taylor P., Morcous G., 2014. "Assessing particle packing based self-consolidating concrete mix design method", Construction and Building Materials, 70, 439–452.

Wu, M., Johannesson B., Geiker M. 2012. "A review: self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material", Construction and Building Materials, 28, 571–583.

Yang, E. H., Li V. C., 2007. "Numerical study on steady- state cracking of composites", Composites Science and Technology, 67, 151-156.

Yang, E. H., Li V.C., 2010, "Strain-hardening fiber cement optimization and component tailoring by means of a micromechanical model", Construction and Building Materials, 24(2), 130-139.

Yang, Y., Lepech M. D., Yang E.H., Li V. C. 2009. "Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet–dry cycles", Cement and Concrete Research, 39, 382–390.

Yildirim, G., Alyousif A., Sahmaran M., Lachemi M. 2015-b. "Assessing the self-healing capability of cementitious composites under increasing sustained loading", Advances in Cement Research, 27(10), 581-592.

Yildirim, G., Keskin Ö. K., Keskin S. B., Sahmaran M., Lachemi M. 2015-a. "A review of intrinsic self-healing capability of engineered cementitious composites: Recovery of transport and mechanical properties", Construction and Building Materials, 101, 10–21.

Yu, R., Spiesz P., Brouwers H. J. H. 2014. "Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC)", Cement and Concrete Research, 56, 29–39.



Yu, R., Spiesz P., Brouwers H. J. H. 2015-a. "Development of an eco-friendly Ultra-High Performance Concrete (UHPC) with efficient cement and mineral admixtures uses", *Cement & Concrete Composites*, 55, 383–394.

Yu, R., Spiesz P., Brouwers H. J. H. 2015-b. "Development of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC): Towards an efficient utilization of binders and fibres", *Construction and Building Materials*, 79, 273–282.

Zhu, Y., Zhang Z., Yang Y., Yao Y. 2014. "Measurement and correlation of ductility and compressive strength for engineered cementitious composites (ECC) produced by binary and ternary systems of binder materials: Fly ash, slag, silica fume and cement", *Construction and Building Materials*, 68, 192–198.

TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

Proje Yürütücüsü:	Dr. Öğr. Üyesi SÜLEYMAN BAHADIR KESKİN
Proje No:	116M202
Proje Başlığı:	Tane Boyutu Optimizasyonunun Lif Donatılı Yüksek Performanslı Çimentolu Kompozitlerin Mekanik Ve Kendiliğinden İyileşme Davranışına Etkisi
Proje Türü:	3501 - Kariyer
Proje Süresi:	24
Araştırmacılar:	ÖZLEM KASAP KESKİN
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	MUĞLA SITKI KOÇMAN Ü. MÜHENDİSLİK F. İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/03/2017 - 01/03/2019
Onaylanan Bütçe:	278329.0
Harcanan Bütçe:	223668.53
Öz:	<p>Tasarlanmış Çimentolu Kompozitler (TÇK) tasarımlarından kaynaklanan çoklu mikro çatlaklanma davranışları ve bünyelerinde bulunan yüksek miktardaki bağlayıcılar sayesinde kendiliğinden iyileşme özelliğine sahip yüksek performanslı lif donatılı çimentolu kompozitlerdir. Ancak bu kompozitler tasarımları gereği özel malzemeler ve belirli karışım oranlarında üretilebilmektedir. Bu projenin amacı tane boyutu optimizasyonu yöntemi ile TÇK tasarımı yapmaktır. Proje kapsamında literatürdeki TÇK tasarımları referans olarak alınarak, modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen modeli uygulanarak yerel malzemelerle TÇK tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla, tane boyutu optimizasyonu ile tasarlanan 8 TÇK karışımı ile literatürde sıklıkla karşılaşılan 4 standart TÇK karışımı olmak üzere toplam 12 farklı TÇK'nın mekanik özellikleri ve kendiliğinden iyileşme performansları incelenmiştir.</p> <p>Proje kapsamında literatürdeki TÇK karışımları dikkate alınarak, bu karışımlar içerisindeki granüler malzemelerin tane boyutu dağılımlarına bağlı olarak, modifiye edilmiş Andreasen ve Andersen yöntemiyle bağlayıcı olan ve olmayan kısım ayrı ayrı ve birlikte olmak üzere çeşitli şekillerde optimize edilmiştir. Bu amaçla kullanılan toz malzemeler çimento, uçucu kül, öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu, silis dumanı ve farklı boyutlardaki kuvars kumlarıdır. Böylece hem bağlayıcı malzemelerin daha etkin kullanımının sağlanması, hem de optimizasyonla elde edilmiş sıkı içyapının mekanik ve kendiliğinden iyileşme davranışına etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir.</p> <p>Tüm TÇK karışımlarının 7, 28 ve 90. günlerde olmak üzere basınç dayanımı ve eğilme özellikleri belirlenmiştir. Kendiliğinden iyileşme performansının belirlenmesi için ise 28.günde ön yüklemeye ile hasara uğratılan numunelerin eğilme altındaki davranışları, ultrases geçiş hızları, elektriksel özdirenç değerleri, hızlı klor iyonu geçirimsizliği, kılcal su emme indeksleri ve çatlak genişlikleri ön yüklemeye takip eden 0, 15, 30, 60 ve 90. günlerde belirlenmiştir. Proje sonucunda tüm ECC karışımlarında kendiliğinden iyileşme özelliği elde edilmiştir.</p>
Anahtar Kelimeler:	Tasarlanmış Çimentolu Kompozitler, tane boyutu optimizasyonu, kendiliğinden iyileşme
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır