

Farklı Granülometrilili Geçirimli Polimer Betonun Özelliklerinin Belirlenmesi ve
Modellenmesi

Abdurrahim Emre Özdemir

DOKTORA TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Aralık 2024

Modeling and Determination of Pervious Polymer Concrete Properties with Different
Granulometry

Abdurrahim Emre Özdemir

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Civil Engineering

December 2024

Farklı Granülometrilı Geçirimli Polimer Betonun Özelliklerinin Belirlenmesi ve
Modellenmesi

Abdurrahim Emre Özdemir

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğı Uyarınca
İnşaat Mühendisliğı Anabilim Dalı
Yapı Bilim Dalında
DOKTORA TEZİ
Olarak hazırlanmıştır.

Danışman: Doç. Dr. Mehmet Canbaz

“Bu tez ESOGÜ-BAP tarafından FDK-2022-2391 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir.”

Aralık 2024

ONAY

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Doktora öğrencisi **Abdurrahim Emre Özdemir**'in DOKTORA tezi olarak hazırladığı ***“Farklı Granülometrilili Geçirimli Polimer Betonun Özelliklerinin Belirlenmesi ve Modellenmesi”*** başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman : Doç. Dr. Mehmet Canbaz

İkinci Danışman :-

Doktora Tez Savunma Jürisi:

Üye: Doç. Dr. Mehmet Canbaz

Üye: Prof. Dr. İlker Bekir Topçu

Üye: Doç. Dr. Gökhan Durmuş

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Arda Büyüksungur

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Uğur Albayrak

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun tarih ve
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr.

Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Mehmet Canbaz danışmanlığında hazırlamış olduğum “Farklı Granülometrilili Geçirimli Polimer Betonun Özelliklerinin Belirlenmesi ve Modellenmesi” başlıklı Doktora tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tezde yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 23/12/2024

Abdurrahim Emre Özdemir

ÖZET

Küresel iklim değişikliği, artan kentleşme ve doğal kaynakların tükenmesi, yağmur suyunun etkili bir şekilde yönetimini sağlayacak yenilikçi yapı malzemelerine duyulan ihtiyacı artırmıştır. Geçirimli beton, sürdürülebilir kentleşme için önemli bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Literatürde bu konuda gerçekleştirilen çalışmaların çoğunlukla geleneksel çimento ile edilen geçirimli beton üzerine odaklandığı, ancak çimento hamuru yerine polimer reçine kullanımının sınırlı sayıda olduğu görülmüştür. Bu tez, bağlayıcı olarak polyester ve epoksi reçine, agrega olarak ise farklı tane çaplarında kalsit ve bazalt kırma taş kullanılarak üretilen geçirimli polimer betonların mekanik ve dayanıklılık özelliklerini belirlemeyi ve elde edilen bulgularla literatüre katkı sağlamayı amaçlamaktadır.

Geçirimli polimer betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen tezde, numunelerin birim ağırlıkları, ultrases geçiş hızları, geçirimsizlik katsayıları, boşluk oranları, eğilme dayanımları, basınç dayanımları ve yarmada çekme dayanımları incelenmiştir. Agresif ortam koşullarına dayanıklılığının değerlendirilmesi için numuneler, 28 ve 56 donma-çözülme çevrimi, %10'luk HCl ve %10'luk MgSO₄ çözeltilerinde 90 ve 180 gün boyunca bekletilerek ayrıca 50°C ve 100°C sıcaklıklarda etüvde bekletilerek koşullandırılmıştır. Numunelerin mikro yapısında oluşan değişimler SEM görüntüleri, EDS analizi ve Mikro-BT taramalarıyla incelenmiştir. Python programı kullanılarak reçine türünün, agrega türünün ve agrega tane çapının geçirimsizlik katsayısına etkisi lineer regresyon analizi ile matematiksel olarak modellenmiştir.

Sonuç olarak polimer reçine kullanılarak % 40 boşluk oranlarında, geçirimsizlik katsayısı 11 mm/s'nin, basınç dayanımı 11 MPa'nın üzerinde geçirimli betonlar elde edilmiştir. Epoksi reçine ile üretilen numunelerin polyester bağlayıcılı numunelere göre daha yüksek mekanik dayanım ve geçirimsizlik özellikleri sunduğunu ve agresif koşullar altında üstün performans sergilediği görülmüştür. Bu tez, geçirimli polimer betonların çevresel katkılarına, mekanik özelliklerine ve dayanıklılık performansına dikkat çekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Geçirimli beton, polimer, dayanıklılık, Mikro BT, FE-SEM

SUMMARY

Global climate change, increasing urbanization and the depletion of natural resources have increased the need for innovative building materials to effectively manage rainwater. Pervious concrete is considered as an important solution for sustainable urbanization. In the literature, it was observed that most of the studies on this subject focused on pervious concrete made with traditional cement, but the use of polymer resin instead of cement paste was limited. This study aims to determine the mechanical and durability properties of pervious polymer concretes produced using polyester and epoxy resins as binders and calcite and basalt crushed stone with different grain diameters as aggregates and to contribute to the literature with the findings obtained.

In the study carried out to determine the physical and mechanical properties of permeable polymer concrete, unit weights, ultrasonic pulse velocities, permeability coefficients, void ratios, flexural strengths, compressive strengths and splitting tensile strengths were investigated. In order to evaluate the resistance to aggressive environmental conditions, the specimens were conditioned for 28 and 56 freeze-thaw cycles, kept in 10% HCl and 10% MgSO₄ solutions for 90 and 180 days, and kept in an oven at 50°C and 100°C. The changes in the microstructure of the samples were examined using SEM images, EDS analysis, and Micro-CT scans. The effect of resin type, aggregate type and aggregate grain diameter on the permeability coefficient was mathematically modeled by linear regression analysis using Python software.

As a result, permeable concretes with a void ratio of 40%, permeability coefficient of more than 11 mm/s and compressive strength of more than 11 MPa were obtained using polymer resin. It was observed that the specimens produced with epoxy resin offered higher mechanical strength and permeability properties than the specimens with polyester binder and exhibited superior performance under aggressive conditions. This study highlights the environmental contributions, mechanical properties and durability performance of permeable polymer concretes.

Keywords: Permeable concrete, polymer, durability, Micro-CT, FE-SEM

TEŞEKKÜR

Doktora tezim süresince bana rehberlik eden, her aşamada desteğini esirgemeyen, bilgi ve deneyimleriyle yolumu aydınlatan değerli danışman hocam Doç. Dr. Mehmet CANBAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Sürecin her aşamasında ilgi ve katkılarını esirgemeyen, değerli bilgi ve tecrübeleriyle çalışmalarına yön veren Doç. Dr. Gökhan DURMUŞ'a ve Dr. Öğr. Üyesi Arda BÜYÜKSUNGUR'a içtenlikle teşekkür ederim. Tez izleme jürimde yer alarak sağladığı kıymetli değerlendirme, uyarı ve düzeltmelerle çalışmamın gelişmesinde ve başarılı bir şekilde sonuçlanmasında önemli katkılar sağlayan saygıdeğer hocam Prof. Dr. İlker Bekir TOPÇU'ya şükranlarımı sunarım.

Doktora sürecim boyunca birlikte eğitim gördüğüm, bilgi ve tecrübelerini paylaşarak desteğini esirgemeyen değerli arkadaşım Dr. Serdal ÜNAL'a teşekkür ederim.

Bu süreçte bana destek olan, anlayış ve teşvikleriyle katkıda bulunan değerli yöneticim İsmail KAYNARCA'ya ve değerli iş arkadaşlarım Dr. Bayram AKKUŞ'a ve Dr. Elvan SAYIN'a teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi her türlü fedakârlığı gösteren canım anneme ve babama; sevgisi, sabrı ve sonsuz desteğiyle her zaman yanımda olan, bu süreçte en büyük güç kaynağım olan sevgili eşime en içten teşekkürlerimi sunarım. Senin varlığın ve anlayışın olmadan bu yolculuğu tamamlamam mümkün olmazdı.

Ve canım kızım... Senden çaldığım vakitlerin telafisinin olmadığını bilerek, sana olan sevgimi hep yüreğimde hissederek çalıştım. Minik gülüşün ve bana verdiğin sonsuz sevgiyle bu zorlu yolculukta en büyük motivasyon kaynağım oldun. Sana borcumu ödemek için sabırsızlanıyorum.

Bu tezi FDK-2022-2391 nolu proje kapsamında destekleyen Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Geçirimli Beton.....	5
2.2. Geçirimli Polimer Beton.....	11
2.3. Python Programlama Dili ile Makine Öğrenmesi	14
2.4. Regresyon Analizi ile Matematiksel Eşitlik Modelleme	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	17
3.1. Kullanılan Malzemeler	18
3.1.1. Polyester reçine	19
3.1.2. Epoksi reçine	19
3.1.3. Kalsit	20
3.1.4. Bazalt.....	20
3.2. Geçirimli Polimer Beton Numunelerinin Hazırlanması	20
3.3. Geçirimli Polimer Beton Numunelere Yapılan Deneyler	22
3.3.1. Fiziksel ve mekanik özellik deneyleri	22
3.3.1.1. <u>Birim ağırlık deneyi</u>	22
3.3.1.2. <u>Ultrases geçiş süresi deneyi</u>	23
3.3.1.3. <u>Boşluk oranı deneyi</u>	23
3.3.1.4. <u>Geçirimlilik deneyi</u>	24
3.3.1.5. <u>Eğilme dayanımı deneyi</u>	26
3.3.1.6. <u>Basınç dayanımı deneyi</u>	27
3.3.1.7. <u>Yarmada çekme dayanımı deneyi</u>	27

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
3.3.2. Dayanıklılık deneyleri	28
3.3.2.1. <u>Asit dayanıklılığı deneyi</u>	28
3.3.2.2. <u>Sülfat dayanıklılığı deneyi</u>	28
3.3.2.3. <u>Donma-çözülme deneyi</u>	29
3.3.2.4. <u>Sıcaklık etkisi deneyi</u>	29
3.4. Mikroyapı Analizleri	29
3.5. Geçirimli Betonun Mikro BT ile Analizi.....	31
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	32
4.1. Fiziksel ve Mekanik Özelik Deneylerinin Değerlendirilmesi	32
4.1.1. Birim ağırlık deney sonuçları.....	32
4.1.2. Ultrases geçiş süresi deney sonuçları	33
4.1.3. Boşluk oranı deney sonuçları	34
4.1.4. Geçirimlilik deney sonuçları	35
4.1.5. Eğilme dayanımı deney sonuçları	36
4.1.6. Basınç dayanımı deney sonuçları.....	37
4.1.7. Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları.....	38
4.2. Dayanıklılık Deney Sonuçları	39
4.2.1. Asit dayanıklılığı deney sonuçları.....	39
4.2.2. Sülfat dayanıklılığı deney sonuçları.....	53
4.2.3. Donma-çözülme deney sonuçları	64
4.2.4. Sıcaklık etkisi deney sonuçları	74
4.3. Mikroyapı İncelemeleri	85
4.3.1. Kimyasal etki altında kalan numunelerin mikroyapısı.....	85
4.3.2. Isıl etki altında kalan numunelerin mikroyapısı	90
4.4. Mikro-BT ile 3B Analiz.....	95
4.5. Geçirimlilik Verileri ile Regresyon Analizi	100
4.6. Literatürdeki Diğer Sonuçlarla Karşılaştırma.....	107
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	108
KAYNAKLAR DİZİNİ	113

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil	Sayfa
3.1. Yöntem	17
3.2. Deneysel çalışmada kullanılan agregalar	21
3.3. Üretilen numuneler	21
3.4. Geçirimlilik deney düzeneği.....	26
3.5. D-Ç deney aleti ve deney numuneleri	29
3.6. Numunelerin kaplanması (a) ve Mikroyapı analizinde kullanılan SEM cihazı (b).....	30
3.7. Mikro-BT cihazı	31
4.1. Geçirimli polimer betonun birim ağırlıkları	32
4.2. Geçirimli polimer betonun ultrases geçiş hızları.....	33
4.3. Geçirimli polimer betonun boşluk oranları	34
4.4. Geçirimli polimer betonun geçirimsizlik katsayıları	36
4.5. Geçirimli polimer betonun eğilme dayanımı.....	37
4.6. Geçirimli polimer betonun basınç dayanımı	38
4.7. Geçirimli polimer betonun yarmada çekme dayanımı	39
4.8. Asit etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin eğilme dayanımı değerleri	40
4.9. Asit etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin basınç dayanımı değerleri	41
4.10. Asit etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin y. çekme dayanımı değerleri.....	41
4.11. Asit etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin boşluk oranı değerleri	42
4.12. Asit etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin geçirimsizlik değerleri	43
4.13. Asit etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin değişimleri	44
4.14. Asit atağının polyester-kalsit bağları ile etkileşimi	45
4.15. Asit atağının polyester-bazalt bağları ile etkileşimi	46
4.16. Asit etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin eğilme dayanımı değerleri.....	46
4.17. Asit etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin basınç dayanımı değerleri	47
4.18. Asit etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin y. çekme dayanımı değerleri	48
4.19. Asit etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin boşluk oranı değerleri	49
4.20. Asit etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin geçirimsizlik değerleri.....	50
4.21. Asit etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin değişimleri.....	51
4.22. Asit atağının epoksi-kalsit bağları ile etkileşimi	52

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil

Sayfa

4.23. Asit atağının epoksi-bazalt bağları ile etkileşimi	52
4.24. Sülfat etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin eğilme dayanımı değerleri	53
4.25. Sülfat etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin basınç dayanımı değerleri	54
4.26. Sülfat etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin y. çekme dayanımı değerleri	55
4.27. Sülfat etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin boşluk oranı değerleri	56
4.28. Sülfat etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin geçirimsizlik değerleri	57
4.29. Sülfat etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin değişimleri	58
4.30. Sülfat etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin eğilme dayanımı değerleri	59
4.31. Sülfat etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin basınç dayanımı değerleri	60
4.32. Sülfat etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin y. çekme dayanımı değerleri	60
4.33. Sülfat etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin boşluk oranı değerleri	61
4.34. Sülfat etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin geçirimsizlik değerleri	62
4.35. Sülfat etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin değişimleri	63
4.36. D-Ç etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin eğilme dayanımı değerleri	64
4.37. D-Ç etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin basınç dayanımı değerleri	65
4.38. D-Ç etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin y.çekme dayanımı değerleri	66
4.39. D-Ç etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin boşluk oranı değerleri	67
4.40. D-Ç etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin geçirimsizlik değerleri	67
4.41. D-Ç etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin değişimleri	68
4.42. D-Ç etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin eğilme dayanımı değerleri	69
4.43. D-Ç etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin basınç dayanımı değerleri	70
4.44. D-Ç etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin y. çekme dayanımı değerleri	71
4.45. D-Ç etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin boşluk oranı değerleri	72
4.46. D-Ç etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin boşluk oranı değerleri	72
4.47. D- Ç etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin değişimleri	73
4.48. Sıcaklık etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin eğilme dayanımı değerleri	74
4.49. Sıcaklık etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin basınç dayanımı değerleri	75
4.50. Sıcaklık etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin y. çekme dayanımı değerleri ..	76
4.51. Sıcaklık etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin boşluk oranı değerleri	77

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil

Sayfa

4.52. Sıcaklık etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin geçirimsizlik değerleri	78
4.53. Sıcaklık etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin değişimleri	78
4.54. Sıcaklık etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin eğilme dayanımı değerleri	79
4.55. Sıcaklık etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin basınç dayanımı değerleri	80
4.56. Sıcaklık etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin y. çekme dayanımı değerleri	81
4.57. Sıcaklık etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin boşluk oranı değerleri	82
4.58. Sıcaklık etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin geçirimsizlik değerleri	83
4.59. Sıcaklık etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin değişimleri	84
4.60. Polyester-kalsit numunelerin kimyasal etkiler altında FE-SEM görüntüleri	85
4.61. Polyester-bazalt numunelerin kimyasal etkiler altında FE-SEM görüntüleri	86
4.62. Epoksi-kalsit numunelerin kimyasal etkiler altında FE-SEM görüntüleri	88
4.63. Epoksi-bazalt numunelerin kimyasal etkiler altında FE-SEM görüntüleri	89
4.64. Polyester-kalsit numunelerin ısı etkiler altında FE-SEM görüntüleri	90
4.65. Polyester-bazalt numunelerin ısı etkiler altında FE-SEM görüntüleri	91
4.66. Epoksi-kalsit numunelerin ısı etkiler altında FE-SEM görüntüleri	92
4.67. Epoksi-bazalt numunelerin ısı etkiler altında FE-SEM görüntüleri	93
4.68. Epoksi-bazalt numunelerin 2B kesit görüntüleri (CT Dilimi)	95
4.69. Epoksi-bazalt numunelerinin 3B model görüntüleri	95
4.70. Epoksi-bazalt (7-8 mm) numunelerin kesit görüntüleri	96
4.71. Epoksi-bazalt numunelerin agresif koşullarda oluşan 3B model görüntüleri	96
4.72. Kontrol numunelerinin deneysel ve tahmin edilen geçirimsizlik katsayıları	102
4.73. Asit etkisinde numunelerin deneysel ve tahmin edilen geçirimsizlik katsayıları	103
4.74. Sülfat etkisinde numunelerin deneysel ve tahmin edilen geçirimsizlik katsayıları	104
4.75. D-Ç etkisinde numunelerin deneysel ve tahmin edilen geçirimsizlik katsayıları	105
4.76. Sıcaklık etkisinde numunelerin deneysel ve tahmin edilen geçirimsizlik katsayıları	106

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge

Sayfa

3.1. Polyester reçinenin fiziksel ve kimyasal özellikleri	19
3.2. Epoksi reçinenin fiziksel ve kimyasal özellikleri	19
3.3. Kalsit agregası kimyasal analizi	20
3.4. Bazalt agregası kimyasal analizi.....	20
4.1. Polyester-kalsit numunelerin ısı etkiler altında SEM analizleri.....	86
4.2. Polyester-bazalt numunelerin ısı etkiler altında SEM analizleri	87
4.4. Epoksi-kalsit numunelerin ısı etkiler altında SEM analizleri.....	87
4.4. Epoksi-bazalt numunelerin kimyasal etkiler altında SEM analizleri	89
4.5. Polyester-kalsit numunelerinin ısı etkiler altında SEM analizleri.....	91
4.6. Polyester-bazalt numunelerin ısı etkiler altında SEM analizleri	92
4.7. Epoksi-kalsit numunelerin ısı etkiler altında SEM analizleri.....	93
4.8. Epoksi-bazalt numunelerin ısı etkiler altında SEM analizleri.....	94
4.9. Deneysel ve 3B analiz ile elde edilen boşluk oranları.....	98
4.10. Matematiksel eşitliklerdeki katsayılar ve istatistik kontrol parametreleri.....	101
4.11. Literatürde yapılan benzer çalışmalar ve sonuçları	107
5.1. En yüksek değerlerin elde edildiği bileşenler.....	109

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

CSH	Kalsiyum Silika Hidrat
CO ₂	Karbon Dioksit
HCl	Hidroklorik Asit
MgSO ₄	Magnezyum Sülfat
SBR	Stiren Bütadien Kauçuk

Kisaltmalar

Acıklama

ACI	Amerikan Beton Enstitüsü (American Concrete Institute)
EDS	Enerji-dağılımlı spektroskopi
FE-SEM	Alan Emisyonlu Taramalı Elektron Mikroskobu
ITZ	Arayüz Geçiş Bölgesi
Mikro-BT	Mikro Bilgisayarlı Tomografi
OPC	Geleneksel Portland Çimentosu
PC	Geçirimli Beton
PCC	Geçirimli Polimer Beton
SP	Süper akışkanlaştırıcı
SD	Silis Dumanı
s/ç	Su-çimento oranı
TS EN	Türk Standartları European Norm
UGH	Ultrases dalga hızı, km/s
UK	Uçucu kül

1. GİRİŞ ve AMAÇ

İnsanların yeryüzündeki faaliyetleri sonucunda iklim değışikliğı ve küresel ısınma gibi olguların ortaya çıkması çeşitli alanlarda sorunlar oluşmuştur. Bunlardan bazıları yeraltı su kaynaklarının tükenmesi, kuraklık, tarım topraklarının zarar görmesi, ani seller, kentlerde ısı adalarının oluşmasıdır. Yoğun yağışlardan sonra yağmur sularının altyapıya sızması, şehirlerde sellere ve su baskınlarına neden olmaktadır. Bu durum hem insanlara hem de yapılara zarar vermektedir. Geçirimli beton, yağış ile beraber oluşan yüzey suyunun alttaki katmanlara iletilmesini, arıtılmasını, depolanmasını veya yeniden kullanım için belirlenmiş bir kaynağa yönlendirilmesini sağlayarak yağış potansiyelinin verimli bir şekilde kullanılmasını amaçlayan bir çözüm olarak önerilmiştir. Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), geçirimli betonu “yağmur suyunun hızla sızmasını sağlamak için yüksek gözenekliliğe sahip, az miktarda ince agrega içeren veya hiç içermeyen özel beton” olarak tanımlanmaktadır ve gözenekli beton olarak da adlandırmaktadır (Wang vd., 2024).

Küresel iklim değışikliğı ile birlikte gündeme gelen sünger şehir inşasında temel bir yapı malzemesi olarak geçirimli beton, son yıllarda birçok araştırmacının ilgisini çekmiştir. Geçirimli betonun içindeki birbirine bağlı gözenek yapısı, yağmur suyunun hızla yer altına sızmasını sağlayarak sel akışını etkili bir şekilde azaltır ve su basması riskini önemli ölçüde düşürür. Ayrıca, bu beton türü, yağmur suyunu filtreleyip arıtarak kirletici maddelerin nehirlerle, göletlere ve yeraltı sularına karışmasını önler. Geçirimli beton, otoparklar, kaldırımlar, peyzaj bahçeleri, yürüyüş yolları, yol kenarları, gürültü bariyerleri ve otoyollar gibi düşük taşıyıcı kapasiteye sahip yapılarda yaygın olarak kullanılmaktadır. İklim değışikliğı ve küresel ısınmanın etkileri, çevresel ve ekonomik zorlukların yanı sıra toplumsal yapıyı da tehdit etmektedir. Bu bağlamda, geçirimli beton gibi sürdürülebilir inşaat malzemeleri, kentlerde su yönetimi ve altyapı planlamasında kritik bir rol oynamaktadır. Yağmur suyunun yer altı sularına geri kazandırılması, yeraltı su kaynaklarının tükenmesini engelleyerek ekosistemin dengede kalmasına önemli bir katkı sağlar. Bu nedenle, geçirimli betonun yaygın kullanımı, iklim değışikliğı ile mücadelede önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir (Adresi vd., 2023).

Polimer reçineler, dayanım, dayanıklılık ve kimyasallara direnç açısından geleneksel çimentoya göre önemli avantajlar sunar ve bu özelliklerin kritik olduğu belirli uygulamalarda tercih edilen bir alternatif haline gelmiştir (Özdemir vd., 2024). Bu tezde, geçirimli beton üretiminde çimento yerine bağlayıcı olarak polyester ve epoksi reçineler kullanılmıştır. Polyester reçine, düşük maliyeti, kimyasal direnci ve hızlı kürlenme süresi nedeniyle inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılırken, epoksi reçine yüksek mekanik özellikleri ve kimyasal direnciyle öne çıkmaktadır. Epoksi ve polyester reçinelerinin beton bağlayıcı olarak kullanılması, su geçirimsizliğini korurken betonun ömrünü uzatır ve çeşitli iklim koşulları ve ağır yükler altında performansını iyileştirir (Balaguru ve Shah, 1992; Nodehi, 2022). Geleneksel çimento bazlı betonların üretimi sırasında yüksek miktarda karbon emisyonu salınırken, reçine bazlı bağlayıcılar daha çevre dostu bir alternatif sunmaktadır. Araştırmalar, reçine bazlı bağlayıcıların karbon ayak izini önemli ölçüde azalttığını ve betonun mekanik özelliklerinde iyileştirmeler sağladığını göstermektedir. Bu nedenle, polyester ve epoksi reçineleri hem çevresel sürdürülebilirlik hem de inşaat performansı açısından umut vadeden malzemeler olarak görülmektedir. (Colangelo vd., 2020; Jiang vd., 2021).

Agregalar, betonun içyapısını ve mekanik özelliklerini belirleyen en önemli bileşenlerden biridir. Geçirimli betonda agreganın boyutu, betonun mekanik özelliklerini ve geçirgenliğini doğrudan etkilediği için önemlidir. Geçirimli beton, suyun geçmesine izin verecek, yüzey akışını azaltacak ve yeraltı suyunun yeniden beslenmesine yardımcı olacak şekilde tasarlanmıştır, ancak agrega boyutunun seçimi etkinliğini etkileyebilir. Bu tezde agrega olarak kullanılan bazalt volkanik kökenlidir ve yüksek mekanik özelliklere sahiptir. Bazalt agregalarının betonun mekanik dayanımını artırdığı ve yapının uzun ömürlülüğüne önemli ölçüde katkıda bulunduğu çeşitli çalışmalarda doğrulanmıştır (Zheng vd., 2022; Ingrao vd., 2014). Öte yandan kalsit, kalsiyum karbonat yapısıyla betona mekanik stabilite sağlar ve mikro yapısal boşlukları doldurarak betonun su geçirgenliğini optimize eder. Agreganın boyutları, betonun geçirimsizliği ve mekanik dayanımı arasındaki dengeyi sağlamak için kritik öneme sahiptir. Farklı boyutlardaki agrega kullanımının betonun dayanımını ve geçirimsizliğini optimize etmede nasıl etkili olduğunu gösteren birçok çalışma vardır (Dias vd., 2024; Wu vd., 2023). Bu tezde 2-3 mm, 5-6 mm, 7-8 mm olmak üzere üç farklı tane çapında kalsit ve bazalt agregalar kullanılarak, agrega boyutlarının betonun dayanım, dayanıklılık özellikleri ve geçirimsizlik katsayısı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Beton yapılar, asit dökülmeleri, asit yağmurları, drenaj kanalizasyonları, kimyasal fabrikalar, sıcak su kaynakları, endüstriyel atıklar gibi çeşitli koşullar altında kimyasal etkilerle karşılaşabilir. Özellikle tesisler ve fabrikalarda önemli miktarda serbest asit bulunması, betonun etkisi altında kaldığı kimyasal yoğunluğun yüksek değerlere ulaşmasına neden olabilir. Nitrik asit, hidroklorik asit ve asetik asit gibi asitler, beton için son derece agresif ortamlar oluşturur (Umale ve Joshi, 2019). Ayrıca, kalsiyum, magnezyum, sodyum, potasyum ve amonyum sülfat içeren topraklar, yağmur ya da drenaj suyu ile karıştığında mineralleri çözer ve suyu sülfat içerikli hale getirir. Bu sulu çözeltiler, betonun yüzeyindeki boşluklardan girer ve betonun yapısal bütünlüğünü bozar. Tarımsal topraklardaki gübreler, deniz suyu ve kanalizasyonlardan gelen sülfat mineralleri de betonun dayanıklılığını olumsuz etkiler (Nadir ve Ahmed, 2022). Bu tezde, bağlayıcı olarak polyester ve epoksi reçine, agrega olarak ise kalsit ve bazalt kullanılan geçirimli polimer betonların kimyasal dayanıklılığı değerlendirilmiştir. Asit etkisinde ve sülfat etkisinde bırakılan betonlar, %10 HCl ve %10 $MgSO_4$ çözeltilerinde 90 ve 180 gün süreyle bekletilmiştir.

Çeşitli araştırmalar, geçirimli betonun yüksek geçirimliliği nedeniyle gözenek yapısının su ile doymayacağına ve dolayısıyla D-Ç hasarının oluşmayacağı görüşünü savunsa da, soğuk iklimdeki geçirimli betonların, doymamış ya da kısmen doymuş koşullarda D-Ç hasarlarına karşı hassas olduğu bildirilmiştir. Artan kullanım ömrüyle birlikte, kaldırım yüzeyindeki aşınma, rüzgarla taşınan ince taneciklerin birikmesi ve bozulmuş topraklardan gelen akışlar, betonun geçirimliliğini ve D-Ç dayanıklılığını önemli ölçüde azaltan tıkanmalara yol açar. Etkili bir gözenek yapısına sahip geçirimli beton, suyun hareketi için yeterli boşluğa sahip olmalı ve bu sayede D-Ç direncini korumalıdır (Wu vd., 2016). Polimer betonlar, bağlayıcı olarak kullanılan reçinelerin ısıya karşı duyarlılığı nedeniyle, yüksek sıcaklık altında bozunabilir ve dayanım kayıpları gözlemlenebilir. Reçinenin türü, polimer betonun ısı etkiler karşısındaki dayanıklılığını etkileyen önemli bir faktördür (Elalaoui vd., 2012). Bu tezde geçirimli polimer betonun ısı etkiler karşısındaki dayanıklılığını incelemek amacıyla, numuneler 28 ve 56 D-Ç çevriminde ve 50°C ile 100°C sıcaklıklarda tutulmuştur. Kimyasal ve ısı etkiler altında kalan numuneler üzerinde eğilme dayanımı, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, boşluk oranı ve geçirimlilik deneyleri yapılmış ve standart kür koşullarında bekleyen kontrol numuneleri ile karşılaştırılmıştır.

Beton numunelerinin kimyasal ve ısı etkiler altında kalması durumunda, SEM ve EDS analizleri, betonun mikro yapısal değişikliklerini ve kimyasal bileşimini incelemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu analizler, betonun yüzey dokusunu, gözenekliliğini ve mikro yapısındaki değişiklikleri anlamaya yardımcı olur ve betonun dayanıklılığını ve mekanik özelliklerini değerlendirmek için kritik öneme sahiptir. Sıcaklık etkisinde mikroyapıdaki değişiklikler ve faz değişimlerini, kimyasal ortamlarda kalan betonlarda, SEM ve EDS, betonun mikro yapısındaki bozunmaları ve kimyasal bileşim değişikliklerini belirlemek için kullanılır (Chinchillas vd., 2019; Xie vd., 2020). Bu tezde kontrol numunelerinin, kimyasal ve ısı etkiler altında kalan numunelerinden alınan örnekler üzerinde SEM görüntüleri çekilmiş ve oluşan farklılıklar EDS analizleri ile yorumlanmıştır.

Mikro-bilgisayarlı tomografi (Mikro-BT) analizi, malzemenin geçirgenliği ve dayanıklılığını doğrudan etkileyen iç mikro yapıyı hasarsız bir şekilde görselleştirme ve ölçme özeliği nedeniyle geçirimli betonun incelenmesinde önemli bir rol oynamaktadır. (Sugiyama vd., 2021; Meinel vd., 2014). Mikro-BT, beton karışımlarının daha iyi tasarlanması ve optimize edilmesi için, gözenek boyutu, dağılımı ve bağlantısı gibi temel faktörler hakkında değerli bilgiler sağlar (Zhang vd., 2018). Bu teknik, betonun geçirgenliğini ve tıkanma önleme performansını inceleyerek, agrega boyutunun ve şeklinin gözenek durumu ve geçirgenlik üzerindeki etkilerini ortaya koyar (Hu vd., 2020; Yu vd., 2019). Bu tezde, kontrol numunelerinden, kimyasal ve ısı etkiler altında kalan numunelerden örnekler alınmış ve Mikro-BT ile tarama işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kesitler ve 3B görseller üzerinde gerçekleştirilen analizlerle toplam boşluk oranı, açık ve kapalı boşluk oranı değerleri hesaplanmış ve deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

Bu tezde, veri bilimi ve mühendislik analizlerinde yaygın olarak kullanılan Python programlama diliyle lineer regresyon analizi yapılmıştır (Onizhuk vd., 2017). Bu analiz, reçine türü, agrega türü ve tane çapının geçirimlilik katsayısı üzerindeki etkilerini incelemeye yardımcı olmuştur. Elde edilen matematiksel eşitlikler ile asit ve sülfat etkisi altındaki betonun, çevrim sayısı ve sıcaklık etkisi ile geçirimlilik katsayıları hesaplanmıştır. Bu analizler, betonun kimyasal ve ısı dayanıklılığına ilişkin önemli veriler sunmaktadır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. Geçirimli Beton

Geçirimli betonun basınç dayanımı, eğilme ve yarmada çekme dayanımı gibi mekanik özellikleri, kentsel altyapıda etkili bir şekilde uygulanması, yükleri taşıması ve çevre koşullarına dayanıklılığını sağlayıp uzun kullanım ömrüne sahip olması için çok önemlidir. Geçirimli betonun mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi üzerine farklı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Geçirimli beton, yüksek boşluk oranı nedeniyle geleneksel betona göre daha düşük basınç dayanımına sahiptir. Yapılan çalışmalarda yüksek performanslı çimento bazlı matrislerin kullanılması veya elyaf ile güçlendirme gibi uygulamalar geçirimli betonun dayanımını önemli ölçüde artırmıştır (Al Shareedah vd., 2020; Zhong vd., 2015).

Geçirimli betonun dayanımını artırmak için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemler uygulama amaçlarına göre ikiye ayrılabilir. İlk yöntem, bitişik agregalar arasındaki çimento hamurunun bağlanma bölgesini artırmaktır. Agregalar yüzeyleri genellikle ince bir çimento hamuru tabakasıyla kaplıdır ve geçirimli betonun dayanımı esas olarak agregalar arası bağlanma bölgelerindeki çimento hamurunun kalınlığı tarafından belirlenir. Bitişik agregalar arasındaki bağlanma bölgesini artırmak için ince agregalar ile beraber bağlayıcı miktarı artırılabilir. Bu durumda dayanım artmakla beraber boşluk oranı ve geçirimsizlik azalmaktadır. İkinci yöntem ise arayüz geçiş bölgesinin dayanımını artırmaktır. Bu dayanımı artırmak için yüksek dayanım değerlerinde bağlayıcı ve kullanılan bağlayıcı ile uyumlu, dayanıklılığı yüksek agregalar tercih edilmelidir (Liu vd., 2019).

Venkati ve Manjulavani 2024'te yaptıkları çalışmada, agregalar boyutunun geçirimli betonun mekanik özelliklerini üzerine etkisini incelemek üzere basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Geçirimli beton üretiminde 4.75-10 mm, 10-12 mm ve 12-16 mm olmak üzere üç farklı boyutta agregalar kullanılmış ve % 0 ile % 30 arasında değişen oranlarda uçucu kül çimentonun yerini almıştır. Toplam yirmi bir karışım tasarımı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, %20 UK içeren ve 12-16 mm agregalar çaplı karışımda 19.97 MPa ile en yüksek basınç dayanımının elde edildiğini ortaya koymuştur. Bu karışım ile üretilen geçirimli betonun hem dayanım hem de çevresel sürdürülebilirliği dengeleyerek kullanıma uygun özellikler gösterdiği belirtilmiştir (Venkati ve Manjulavani, 2024).

Günümüzde enerji maliyetlerinin yüksekliği, betonun üretim maliyetini olumsuz yönde etkilemektedir. Bunun yanı sıra, betonun dayanıklılık sorunları nedeniyle yapıların ömrü genellikle yaklaşık 50 yıl ile sınırlıdır. Bu durum, bilim insanlarını, agregaların yeniden kullanımını araştırmaya yöneltmiştir (Topçu ve Hocaoglu, 2023). Geçirimli beton üretiminde doğal agrega ve çimento yerine geri dönüştürülmüş beton agregaları ve endüstriyel atıklar kullanılarak mekanik özelliklerin iyileştirilmesi ve sürdürülebilirliğin artırılmasının amaçlandığı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. (El-Hassan vd., 2019).

Polipropilen lifler, çelik tel örgü veya cam elyaf gibi güçlendirme malzemelerinin eklenmesi, geçirimli betonun eğilme ve çekme dayanımlarını artırarak yüksek yük taşıma kapasitesi gerektiren uygulamalar için daha uygun hale getirmiştir (Wu vd., 2023; Tang vd., 2019). Ayrıca geçirimli betonun, D-Ç çevrimleri ve asit etkisi gibi çevresel faktörlere karşı direncini artırmak için cüruf veya endüstriyel atık gibi katkı maddeleri kullanılmış ve olumlu sonuçlar elde edilmiştir. İyileştirilmiş mekanik özellikler, malzemenin zaman içinde işlevsel kalmasını sağlar, yağmur suyu akışını azaltmak ve yeraltı sularını yeniden şarj etmek gibi geçirimli betonun çevresel yararına da katkıda bulunur (Anwar vd., 2022). Geçirimli betonda daha yüksek dayanımlar elde etmek için birçok araştırmacı agrega tane çapı üzerine yoğunlaşmıştır. Daha küçük tane çaplı agregalar kullanılarak genellikle daha yüksek dayanım elde edilmiş ancak daha düşük geçirimlilik sağlanmıştır (Feric vd., 2023).

Chockalingam vd. tarafından 2023'te yapılan çalışmada agrega boyutu, deney numunesinin şekli ve boyutlarının geçirimli betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırılmıştır. Agrega boyutları 10 mm, 12.5 mm ve 20 mm olan üç farklı karışım hazırlanmıştır. 100x100x100 mm, 150x150x150 mm, 200x200x200 mm boyutlu küp numuneler ile $\Phi 50 \times 100$ mm, $\Phi 100 \times 200$ mm, $\Phi 150 \times 300$ mm silindir şeklindeki numuneler üzerinde dayanım deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda agrega boyutu ve deney numunesinin yüksekliği arttıkça, geçirimli betonun basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı azalmıştır. Özellikle, küp numunelerin basınç dayanımının uç sürtünmesi nedeniyle silindir numunelerin basınç dayanımından daha yüksek olduğu görülmüştür. Numune boyutu arttığında küpler için % 38-41 ve silindirler için % 32-37'lik basınç dayanımı düşüşleri ile daha küçük boyutlu numunelere göre önemli dayanım kayıpları gözlemlenmiştir. Ayrıca, küp numunelerde yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımları, basınç dayanımının sırasıyla yaklaşık %17'si ve % 34'ü kadardır (Chockalingam vd., 2023).

Yu vd. 2019'da yaptığı çalışmada agrega boyutunun geçirimli betonda gözenek yapısını, çimento hamuru kalınlığını ve betonun basınç dayanımını nasıl etkilediğine odaklanarak, geçirimli betonda agrega boyutu ile basınç dayanımı arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. % 40 boşluk oranı elde edilecek şekilde tasarlanmış, 2.36 mm ile 15 mm arasında değişen farklı agrega boyutları ile karakterize edilen sekiz grup geçirimli beton numunesi elde edilmiştir. Basınç dayanımının agrega boyutuyla birlikte 7 mm'ye kadar hızla arttığını, daha büyük tane çaplarında agrega boyutunun basınç dayanımı üzerindeki etkisinin ihmal edilebilir hale geldiğini göstermişlerdir. Dayanımdaki bu değişim öncelikle agrega boyutunun gözenek özellikleri üzerindeki etkisine, özellikle de basınç dayanımı ile ters orantılı olan küçük gözeneklerin ($0-1.5 \text{ mm}^2$) içeriğine bağlanmaktadır. Çalışma ayrıca basınç dayanımının en çok gözenek yapısının düzensizliğine duyarlı olduğunu, ortalama agrega boyutuna ise daha az duyarlılık gösterdiğini ortaya koymaktadır. Geçirimli betonda çimento hamur kalınlığının önemli bir etkiye sahip olduğu ve hamur kalınlığı arttıkça dayanımın arttığını belirtilmiştir. Bu bulgular, agrega boyutu, gözenek yapısı ve çimento hamurunun kalınlığının birleşik etkisini vurgulayarak, geçirimli betonun mekanik özelliklerini etkileyen faktörlerin değerlendirilmesini sağlamıştır (Yu vd., 2019).

Claudino vd. 2022'de geçirimli betonun hidrolik iletkenliği ile mekanik dayanımı arasında optimizasyon sağlamak için çimento hamuru ve agrega granülometrisi ile karışım tasarımı önermektedir. Tasarım, s/ç oranlarını (0.30, 0.35, 0.40), hedef boşluk oranları (%15, %17.5, %20) ve ince agrega içeriklerini (% 0, % 10, %20) değiştiren deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. Sonuçlar, %15 ve %17.5 boşluk oranına sahip karışımların en iyi performansı gösterdiğini ve ince agrega içeriğinin geçirimlilik ve basınç dayanımını olumlu yönde etkilediğini ortaya koymuştur. 11.9 ile 23.8 MPa arasında dayanım elde edilen tasarımlardan özellikle, 0.35 s/ç oranı ve %10 ince agrega içeriği ile hem mekanik hem de geçirimlilik gereksinimlerini karşılayan iyi dengelenmiş bir karışım olduğu ifade edilmiştir. Çalışmada, %15 ve %17.5 boşluk oranları karışımların yaya ve hafif trafik kullanımı için gerekli basınç dayanımını ve eğilme dayanımlarını karşıladığı, % 20 boşluk oranlı karışımların dayanım değerlerinin ise yetersiz kaldığı sonucuna varılmıştır. Ayrıca, ince agrega içeriğinin hem mekanik dayanımı hem de geçirgenliği önemli ölçüde etkilediği ve %10 ince agrega içeriği ile optimum denge sağlandığı belirtilmiştir (Claudino vd., 2022).

Liu vd. (2018), geçirimli betonun D-Ç dayanıklılığı, mekanik özellikleri ve geçirimlilik performansı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla farklı agrega boyutları, boşluk oranları ve s/ç oranlarını içeren bir deney tasarımı gerçekleştirmiştir. Araştırmada, geçirimli betonun birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, geçirimlilik katsayısı ve D-Ç çevrimlerine dayanıklılığı değerlendirilmiştir. Sonuçlar, boşluk oranının mekanik ve geçirgenlik özelliklerini etkileyen en önemli faktör olduğunu göstermiştir. Daha yüksek boşluk oranları, daha iyi geçirgenlik sağlarken basınç ve eğilme dayanımlarını düşürmektedir. En iyi performans, %15 boşluk oranı ve küçük agrega boyutları (4.75-9.5 mm) ile elde edilmiştir. Araştırmada, geçirimlilik katsayısının etkin boşluk oranıyla doğrusal bir ilişki gösterdiği ve agrega boyutu ve s/ç oranı gibi diğer faktörlerin bu özellik üzerinde sınırlı bir etkisinin olduğu gözlemlenmiştir. D-Ç dayanıklılığı açısından, küçük agrega boyutlarının ve düşük boşluk oranlarının, çatlak oluşumunu azaltarak geçirimli betonun kullanım ömrünü artırdığı belirtilmiştir. D-Ç çevrimleri sonucu geleneksel betonda görüldüğü gibi kütle kaybı görülmediği fakat oluşan çatlaklardan dolayı 20 ile 80 D-Ç arasında numunelerin bütünlüğünü kaybettiği ve dayanım deneylerinin gerçekleştirilemediği belirtilmiştir. Mekanik dayanım ve geçirimlilik arasında ters bir ilişki bulunmuş ve optimum karışım tasarımının belirlenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Araştırma, geçirimli betonun karışım tasarımının, uygulama amacına göre mekanik dayanım, geçirimlilik ve dayanıklılık arasında bir denge kurmayı gerektirdiğini ortaya koymuştur (Liu vd., 2018).

Daukšys vd. 2023'te gerçekleştirdikleri çalışmada, iri agrega tane çapının ve geometrik şeklinin geçirimli betonun fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini analiz etmiştir. Beton karışımını hazırlamak üzere 4-16 mm ve 8-16 mm tane çaplı çakıl ve kırmataş olmak üzere dört tip agrega kullanılmıştır. Parçacık boyutu ile beraber yuvarlak ve dikdörtgen olan agrega şekli de dikkate alınmıştır. Bu çalışma, parçacık boyutu ve şeklinin geçirimli betonun fiziksel ve mekanik özelliklerini etkilediğini göstermiştir. Boşluk oranları % 21 ile % 25 arasında değişen numunelerde kırmataşın köşeli ve keskin kenarlı olmasının, geçirimli betonun daha yüksek açık gözenekliliğe etkisi olduğu gözlenmiştir. Parçacık boyutu 4-16 mm olan çakıl içeren numunelerde 15.0 MPa'ya ulaşan daha yüksek basınç dayanımı elde edilmiştir. Daha büyük agrega tane çapında basınç dayanımının düştüğü, geçirimli betonun özelliklerinin daha ileri düzeyde incelenmesinde, agrega ile çimento hamuru arasındaki arayüzün iyileştirilmesi gerektiği ifade edilmiştir (Daukšys vd., 2023).

Naazeer vd. 2023'te yaptıkları çalışmada, uçucu kül ve silis dumanı ile modifiye edilmiş geçirimli betonun dayanım, dayanıklılık ve mikro yapısal özelliklerini araştırmaktadır. Dört farklı agrega gradasyonu (2.36-4.75 mm, 4.75-6.3 mm, 6.3-10 mm ve 10-12 mm) ve üç farklı oranda UK ve SD kullanılarak dokuz farklı geçirimli beton karışımı hazırlanmıştır. Bu karışımların performansı, birim ağırlık, boşluk oranı, geçirimsizlik, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, asit direnci olmak üzere çeşitli deneylerle değerlendirilmiştir. Ayrıca, taramalı elektron mikroskobu ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi kullanılarak mikro yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda %10 UK ve SD ilavesinin hem dayanımı hem de dayanıklılığı önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Bu iyileşme, iyi gelişmiş C-S-H ve C-A-S-H jelleri ile daha yoğun bir mikro yapının oluşmasına bağlanmış ve hem mekanik hem de dayanıklılık özelliklerini geliştirmiştir. UK ve SD belli oranda kullanılması durumunda, geçirimli betonun geçirgenliğinin kabul edilebilir sınırlar kalarak basınç dayanımını artırmada önemli bir etkisi olduğu vurgulanmıştır (Naazeer vd., 2023).

Lian ve Zhuge 2010'da gerçekleştirdikleri çalışmada, yağmur suyu yönetimi için ekonomik ve çevre dostu bir alternatif olarak, yapısal dayanımı artırılmış yeni bir tür geçirimli beton geliştirmeyi amaçlamıştır. Farklı karışım tasarımları hazırlanarak, geçirimli betonun basınç dayanımı ve geçirgenlik özellikleri üzerinde yapılan deneylerle bu malzemenin performansı iyileştirilmeye çalışılmıştır. Araştırma, optimum agrega türleri ve karışım bileşenlerini belirleyerek, daha yüksek dayanım ve geçirgenlik özelliklerine sahip geçirgen beton üretimi amaçlanmıştır. Dolomit agregasının, özellikle yol inşaatı gibi uygulamalarda aşındırmaya karşı yüksek direnç gösterdiği ve diğer agregalara göre daha iyi dayanım sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda basınç dayanımı ile geçirgenlik arasında ters bir ilişki olduğunu ortaya konmuş ve optimal karışım tasarımının belirlenmesi büyük önem taşıdığı vurgulanmıştır. Silika dumanının, yüksek boşluk oranı nedeniyle betonun dayanımını artırmadığı, bunun yerine karışımın içindeki ince partiküllerin sıkışarak ayrışmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada optimum s/ç oranı 0.32 olarak belirlenmiş ve 2 mm/s üzerinde geçirimsizlik katsayısı elde edilmiştir. Bununla birlikte, s/ç oranı 0.36'ya yükseltildiğinde, geçirimli betonun uzun süreli kullanımda akış yolunun tıkanması sorunlarına karşı daha dayanıklı olabileceği ve daha düşük yapısal dayanımın gerekli olduğu durumlarda kullanılabileceği ifade edilmiştir (Lian ve Zhuge, 2010).

Hung vd. 2021’de gerçekleştirdikleri çalışmada, farklı agrega karışım oranlarının geçirimli betonun gözeneklilik ve su geçirgenlik katsayıları üzerindeki etkileri incelenmiş ve uygun basınç dayanımı koşulunu karşılayan optimum karışım oranı belirlemeyi amaçlamışlardır. Deneysel tasarım kapsamında, farklı boyutlarda agrega içeren üç farklı karışım oranı önerilmiş ve hazırlanan numunelerde gözeneklilik ve geçirgenlik özellikleri, Mikro-BT görüntü analizleri ile değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, % 50 5-10 mm agrega, % 45 2-5 mm agrega ve % 5 kum içeren karışım oranının en uygun performansı sağladığını göstermiştir. Bu oranın, 0.1 mm/s geçirgenlik katsayısı, %11.6 boşluk oranı ve 18 MPa basınç dayanımı sağlayarak hem dayanım hem de geçirgenlik açısından uygun bir yapı sunduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, ince agregaların karışım içindeki oranı arttıkça gözeneklilik ve su geçirgenliğinin azaldığı ve boşluk oranı azaldıkça basınç dayanımının arttığı belirtilmiştir. Agrega tane boyutu küçüldükçe, agrega ile bağlayıcı arasında oluşan yüzey alanını artırarak betonun dayanımını iyileştirdiği belirtilmiştir. Geçirimli beton teknolojisinin sürdürülebilir kalkınmaya katkı sağlayabileceği ve kentlerde oluşan yağışın olumsuz etkilerini azaltabileceği gösterilmiştir (Hung vd., 2021).

Liu vd. 2018’te gerçekleştirdikleri çalışmada, geçirimli betonun temel özellikleri olan geçirgenliğini ve mekanik performansını artırmaya odaklanmıştır. Geleneksel Portland çimentosu, silika dumanı, süper akışkanlaştırıcı ve kireçtaşı agregası kullanan araştırmacılar, s/ç oranı, süper akışkanlaştırıcı içeriği ve agrega boyutu gibi faktörlerin gözenekliliği, geçirgenliği ve basınç dayanımını nasıl etkilediğini incelemiştir. Gözenekliliği ölçmek için su yer değiştirme yöntemi ve görüntü işleme teknolojisi gibi gelişmiş yöntemler kullanılmıştır. Araştırma, tek boyutlu agrega kullanımında ölçülen gözeneklilik değerlerinin tasarım boşluk oranına daha yakın olduğunu, karışık boyutlu agregalarda ise ayrışma etkileri nedeniyle sapmaların daha belirgin olduğunu ortaya koymuştur. Agrega boyutu, gözenek dağılımını etkileyen en önemli faktör olarak belirlenmiş ve daha büyük agregaların etkili gözenek boyutunu ve geçirgenliği artırdığı gözlemlenmiştir. Pratik uygulamalar için s/ç oranı 0.26-0.30, % 0.5 süperakışkanlaştırıcı, % 5 silika dumanı, %15-21 tasarım gözenekliliği ve 4.75-9.5 mm veya 9.5-16 mm agrega boyutları önerilmektedir. Bu parametreler ile üretilen geçirimli betonun geçirgenlik özellikleri ve mekanik dayanım arasında kullanıma uygun bir denge sağladığı ortaya konmuştur (Liu vd., 2018).

2.2. Geçirimli Polimer Beton

Polimer reçine bağlayıcıların çimento yerine betonda kullanılmasının birçok avantajı bulunmaktadır. İlk olarak, polimer betonlar, geleneksel çimento betonlarına göre çok daha yüksek mekanik dayanım ve dayanıklılık özelliklerine sahiptir. Örneğin, epoksi ve polyester reçine bazlı polimer betonlar, basınç, çekme, eğilme ve darbe dayanımı gibi özelliklerde çimento ile elde edilen geleneksel betona göre üstün performans sergilemektedir (Nodehi, 2021). Ayrıca, polimer betonlar kimyasal direnci yüksek malzemeler olup, agresif çevre koşullarında daha uzun ömürlüdürler (Jamshidi vd., 2012). Polimer reçineler, çimento üretiminin yüksek karbon ayak izine sahip olmasından dolayı çevresel sürdürülebilirlik açısından da avantajlıdır. Çimento üretimi, yüksek enerji tüketimi ve CO₂ emisyonları ile bilinirken, polimer reçineler daha düşük karbon ayak izine sahiptir ve bu da onları daha çevre dostu bir seçenek haline getirir (Gorninski vd., 2004). Ayrıca, polimer betonlar hızlı kürlenme özellikleri sayesinde yapıların daha kısa sürede kullanıma alınmasını sağlar, bu da özellikle hızlı küre ihtiyaç duyulan bakım ve onarım çalışmalarında büyük bir avantajdır. Polimer bağlayıcılar, yüksek mekanik dayanım, kimyasal direnç, çevresel sürdürülebilirlik ve hızlı kürlenme gibi üstün özellikleri sayesinde çimento yerine tercih edilmektedir. Bu özellikler, polimer betonları özellikle agresif çevre koşullarında ve sürdürülebilir yapı malzemeleri arayışında ideal bir alternatif haline getirmektedir (Murcia vd., 2023).

Polimerlerin geçirimli beton üretimine kullanılmasının en temel amacı boşluk oranı miktarı ve geçirimlilik özeliği korunurken mekanik ve dayanıklılık özelliklerini geliştirmektir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda SBR, polivinil asetat ve lateks gibi polimerlerin, geçirimli betonun basınç ve eğilme dayanımını önemli ölçüde arttırdığı gözlenmiştir. Bu iyileştirme sonucunda, malzemenin mekanik gerilimlere daha iyi dayandığı ve çeşitli yapısal uygulamalarda kullanım için daha uygun hale geldiği ifade edilmiştir (Borhan vd., 2020). Polimer modifikasyonları, D-Ç çevrimleri, asit ve sülfat etkisi gibi çevresel faktörlere karşı geçirimli betonun dayanıklılığını arttırarak zorlu koşullarda uzun süreli kullanım için daha güvenilir hale getirmiştir (Giustozzi vd., 2016). Polimer modifiyeli geçirimli beton üretiminde lateks boya gibi atık malzemelerin kullanılmasının, yalnızca geçirimli betonun özelliklerini iyileştirmekle kalmadığı, aynı zamanda atık ürünleri geri dönüştürerek ve geleneksel beton üretimiyle ilişkili karbon ayak izini azaltarak çevresel sorunlara da çözüm getiren bir alternatif oluşturduğu belirtilmiştir (Said ve Quiroz, 2018).

Giustozzi 2016'da polimer modifikasyonunun geçirimli betonun mekanik ve fonksiyonel özellikleri üzerindeki etkilerini incelediği çalışmada, farklı polimer türlerinin ve içeriklerinin beton performansı üzerindeki rolünü değerlendirmiştir. Çalışmada kullanılan polimerler arasında katyonik SBR lateks, polivinil asetat, etilen vinil asetat ve anyonik SBR lateks yer almıştır. Portland çimentosu ile hazırlanmış karışımlar 0.30 ve 0.35 s/ç oranları ile hazırlanmış; ancak 0.30 s/ç oranının üstün mekanik performans sağladığı tespit edilmiştir. İki agrega gradasyonu (2-6 mm ve 4-11 mm) %80 ve %20 oranlarında karıştırılmış, ayrıca %5 ince kum ilavesiyle boşluk yapısının ve dayanımın iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Polimer modifikasyonunun geçirgenlik ve boşluk oranlarını büyük ölçüde değiştirmeden mekanik performansı artırdığını göstermiştir. Özellikle, polivinil asetat en iyi sonuçları verirken, SBR polimerlerin etkinliğinin sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Polimerlerin, çimento hidrasyon reaksiyonlarını geciktirerek daha uzun kürlenme sürelerinde dayanımın gelişmesine katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, ince kum ilavesinin mekanik dayanımı artırmada tek başına polimer modifikasyonundan daha etkili olduğu, ancak düşük boşluk oranları ve drenaj sorunlarına yol açabileceği belirtilmiştir. Gelecekte, polimerlerin toz formunun etkisinin ve farklı kürlenme koşullarının uzun vadeli performans üzerindeki etkilerinin daha fazla incelenmesi gerektiği vurgulanmıştır (Giustozzi, 2016).

Suyun yüzeyde birikmesi veya akıp gitmesi yerine içinden geçmesini sağlayarak, yağmur suyu akışını azaltan taşkın ve erozyonu önlemeye yardımcı olan, yeraltı suyu kaynaklarının yenilenmesine olanak tanıyan özel bir beton türü olan geçirimli betonun avantajlarına rağmen iyileştirilmesi gereken bazı özellikleri üzerinde çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Geçirimli betonda farklı agrega boyutlarının kullanımı sonucunda dayanım artışı ve mineral katkı maddeleri ve liflerin eklenmesi ile geçirimli betonun performansının arttığı bilinmektedir. Polyester veya polipropilen gibi polimer bazlı malzemelerden yapılan yüksek çekme dayanımına sahip ve kimyasal bozunmaya dirençli geogridlerin kullanımı ile geçirimli betonda yüklerin daha etkili bir şekilde aktarıldığı, dayanım ve dayanıklılık özeliğinin arttığı gözlenmiştir. Kullanılan geogridler sayesinde geçirimli betonun eğilme dayanımının arttığı, oluşan çatlak genişliklerinin sınırlandığı ve çatlak yayılmasının kontrol altına alındığı belirtilmiştir (Hari ve Mini, 2024).

Huang vd. 2010 tarafından yapılan çalışmada, polimer modifikasyonu ile geçirimli betonun geçirgenlik ve mekanik dayanım özelliklerinin dengelenmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Çalışmada 4.75 mm, 9.5 mm ve 12.5 mm agregâ boyutları kullanılan karışımlarda lateks, SBR, doğal kum ve polipropilen lif katkılarının beton performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Bulgular, lateks ve kum ilavesinin boşluk oranını %20–30 aralığında tuttuğunu, geçirimlilik değerlerini ise 10-20 mm/s seviyesinde koruduğunu göstermiştir. Basınç dayanımı açısından, lateks ve kumun birlikte kullanımı dayanımı önemli ölçüde artırarak, agregâ boyutuna bağılı olarak 12.5 MPa ilâ 16 MPa aralığında değerler elde edilmesini sağlamıştır. Ayrıca, polipropilen lifin % 0.9 oranında kullanımı yarmada çekme dayanımını artırmış ve bu değerler 1.5 MPa ile 2 MPa arasında değişim göstermiştir. Deneyler, lateks ve kum katkısının çimento hidratasyon ürünleriyle birlikte bir ağı yapısı oluşturduğunu ve bu ağı geçirimli betonun dayanım özelliklerini iyileştirdiğini ortaya koymuştur. Ancak, kullanılan polipropilen lifin karışımda homojen dağılmaması durumunda, dayanım artışında oldukça sınırlı bir etki gözlenmiştir. Çalışmada ayrıca agregâ boyutunun dayanım üzerinde etkili olduğu, daha küçük agregâ boyutlarının daha yüksek basınç dayanımı sağladığı gözlenmiştir. Sonuç olarak, lateks, kum ve lifin doğru oranlarda kullanımıyla hem yeterli geçirimliliğe hem de mekanik dayanım özelliklerine sahip karışımların elde edilebileceği gösterilmiştir (Huang vd., 2010).

Sha vd. 2024'te gerçekleştirdikleri çalışmada geçirimli betonun gözenek özelliklerinin mekanik performansına etkisini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. geçirimli beton için optimal SD ve SA dozajları sırasıyla %5 ve %0.5 olarak belirlenmiş ve 0.22-0.32 s/ç önerilmiştir. Gözenek boyutu ve boşluk oranının hem geçirgenlik hem de mekanik özellikler üzerinde önemli etkileri olduğunu vurguladıkları çalışmada, boşluk oranı %12'den %27'ye çıktığında geçirimlilik katsayısının arttığını, basınç dayanımının ise yaklaşık %30 oranında azaldığı gözlenmiştir. En yüksek dayanım, s/ç oranının 0.28 olduğu durumda elde edilmiştir. Boşluk oranı ile basınç dayanımı arasında negatif, boşluk oranı ile geçirgenlik katsayısı arasında ise ikinci dereceden polinomsal bir ilişki gözlemlenmiştir. Geçirimli beton numunelerinde, %12–27 boşluk oranı aralığında, 3.29-4.66 mm/s geçirimlilik katsayısına ve 7.5-12.3 MPa basınç dayanımına ulaşmıştır. Artan gözenek boyutu ve boşluk oranı, geçirimlilik katsayısını artırırken mekanik dayanımı düşürmüştür (Sha vd., 2024).

2.3. Python Programlama Dili ile Makine Öğrenmesi

Python programlama dili, son yıllarda bilimsel araştırmalar, mühendislik uygulamaları ve veri analizi alanlarında oldukça popüler bir araç haline gelmiştir. Bunun temel nedenlerinden biri, Python'un geniş ve sürekli gelişen kütüphane ekosistemidir. Pandas, NumPy, SciPy, scikit-learn gibi güçlü kütüphaneler, veri analizi ve makine öğrenmesi süreçlerinde araştırmacılara büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Ayrıca, Matplotlib ve Seaborn gibi görselleştirme araçları, verilerin daha anlaşılır hale getirilmesi ve analizlerin görsel olarak sunulması konusunda önemli avantajlar sunmaktadır (Nagpal ve Gabrani, 2019). Python'un açık kaynaklı yapısı, kullanıcı dostu sözdizimi ve çoklu platform desteği (Windows, macOS, Linux), dilin yaygın olarak kullanılmasını sağlayan diğer faktörlerdir. Ayrıca, Python'un güçlü topluluk desteği, kullanıcıların karşılaştıkları zorluklarla başa çıkabilmesi için geniş bir bilgi kaynağı sunmaktadır. Python programlama dilinin esnek yapısı, basit programlamadan, karmaşık veri biliminden makine öğrenmesine kadar geniş bir yelpazede kullanıcılara uygulama imkânı tanımaktadır (Oliphant, 2007).

Makine öğrenmesi, veri bilimi alanının temel bileşenlerinden biri olup, Python programlama dili bu alanda önemli bir rol oynamaktadır. Python, makine öğrenmesi algoritmalarının geliştirilmesi, test edilmesi ve uygulanması için uygun bir platform sunar. Scikit-learn ve TensorFlow gibi kütüphaneler, doğrusal regresyon, karar ağaçları, yapay sinir ağları gibi algoritmaların kolayca uygulanabilmesine imkân verir (Hao ve Ho, 2019). Makine öğrenmesi, veriden öğrenme sürecine dayandığı için, Python'un veri işleme ve modelleme araçları, araştırmacıların bu süreçleri daha verimli hale getirmelerini sağlar. Ayrıca, Python'un esnekliği, farklı veri türleriyle çalışmayı kolaylaştırırken, algoritmaların çeşitli veri kümeleri üzerinde test edilmesi ve optimize edilmesi sürecini hızlandırır. Bu özellikler, Python programlama dilini büyük veri ve karmaşık modelleme gerektiren projelerde tercih edilen bir dil haline getirmektedir (Cutler ve Dickenson, 2020).

Python ile mühendislik bilimleri başta olmak üzere birçok farklı alanda, çeşitli analiz ve modeller yapılmaktadır. Bu tezde Python programlama dilinde makine öğrenmesi yöntemi ile lineer regresyon analizi yapılmıştır. Analiz sonucunda standard küre koşullarında ve agresif ortamlarda geçirimsizlik katsayısını veren matematiksel eşitlikler elde edilmiştir.

2.4. Regresyon Analizi ile Matematiksel Eşitlik Modelleme

Makine öğrenmesi yöntemleriyle regresyon analizi gerçekleştirilirken, takip edilmesi gereken temel adımlar bulunmaktadır. Bu adımlar, veri toplama ve hazırlama, verilerin eğitim ve test setlerine ayrılması, uygun regresyon modelinin seçilmesi ve yapılandırılması, modelin eğitim verileriyle eğitilmesi, modelin performansının test verileriyle değerlendirilmesi, modelin tahminlerde bulunması ve sonuçların yorumlanması olarak sınıflandırılabilir. Bu süreçler, ihtiyaç duyulan doğru modelin oluşturulabilmesi ve en verimli sonuçların elde edilebilmesi için oldukça büyük önem taşımaktadır (Loh, 2011).

Regresyon analizinde, modelin doğruluğunu ve güvenilirliğini değerlendirmek amacıyla çeşitli hata ölçütleri ve istatistiksel katsayılar kullanılır. Bu katsayılar arasında, modelin bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkisini ne ölçüde açıkladığını belirleyen determinasyon katsayısı (R^2) önemli bir yer tutar. R^2 , modelin veri setindeki varyansı açıklama oranını gösteren bir istatistiksel ölçüt olup, yüksek bir R^2 değeri, modelin bağımsız değişkenlerin bağımlı değişken üzerindeki etkilerini başarıyla yansıttığını ve tahminlerin doğru olduğunu gösterir. Diğer taraftan, düşük bir R^2 değeri ise modelin veri setindeki varyansı yeterince açıklayamadığını, dolayısıyla tahminlerin güvenilirliğinin düşük olduğunu işaret eder. Regresyon analizinde, modelin başarısını daha ayrıntılı bir şekilde incelemek için başka istatistiksel katsayılar ve ölçütler de kullanılabilir. Ancak determinasyon katsayısı (R^2), genellikle ilk tercih edilen ve en yaygın kullanılan ölçütlerden biridir, çünkü modelin genel açıklama gücünü hızlı bir şekilde özetler ve analizde önemli bir temel sağlar (Chicco vd., 2021). Bu katsayı, modelin varyansının toplam varyansa oranını ifade eder ve (2.1)'de belirtilen formülle hesaplanır:

$$R^2 = 1 - (RSS/TSS) \quad (2.1)$$

RSS (Hata Kareleri Toplamı) : Modelin tahminlerinin gerçek değerlerden sapmalarının karelerinin toplamını ifade eder.

TSS (Toplam Varyans): Bağımlı değişkenin değerlerinin, ortalamadan sapmalarının karelerinin toplamını ifade eder (Chicco vd., 2021).

R^2 değeri, 0 ile 1 arasında değişen bir değere sahiptir. 1'e yakın bir R^2 değeri, modelin veri setindeki değişkenliği daha iyi açıkladığını gösterse de, modelin uygunluğunu tam olarak değerlendirebilmek için diğer faktörler ve istatistiksel ölçütler de göz önünde bulundurulmalıdır (Ash ve Shwartz, 1999). Çeşitli kaynaklar, regresyon analizinin doğruluğunu değerlendirmek amacıyla hata ölçütlerinin kullanılmasını önermektedir. R^2 , MSE ve RMSE, doğrusal modellerin performansını değerlendirmek için yaygın olarak başvurulanan temel araçlar arasında yer alırken, MAE ise hata büyüklüklerine eşit ağırlık vermesi ve modelin tahmin hatalarını doğrudan yansıtmaması nedeniyle tercih edilmektedir (Chicco vd., 2021).

MSE (Mean Squared Error - Ortalama Kare Hata): MSE, modelin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerler arasındaki farkların karelerinin ortalamasıdır. Düşük MSE değeri, modelin yüksek doğrulukla tahminler yaptığını gösterir. MSE, genellikle modelin performansını nicel olarak değerlendirirken kullanılır ve sürekli değişkenler için uygun bir hata ölçütüdür. (2.2), (2.3) ve (2.4)'de belirtilen Formüllerde (n) veri noktalarının sayısını (y_i) gerçek değeri ve ($\hat{y}_i$) tahmini değeri temsil etmektedir. (Chai ve Draxler, 2014).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2.2)$$

RMSE (Root Mean Squared Error - Kök Ortalama Kare Hata): RMSE, MSE'nin karekökü alınarak elde edilen bir hata ölçütüdür. RMSE değeri ne kadar küçükse, modelin doğruluğu o kadar yüksek demektir. RMSE, özellikle regresyon analizlerinde sıklıkla kullanılır (Hodson, 2022).

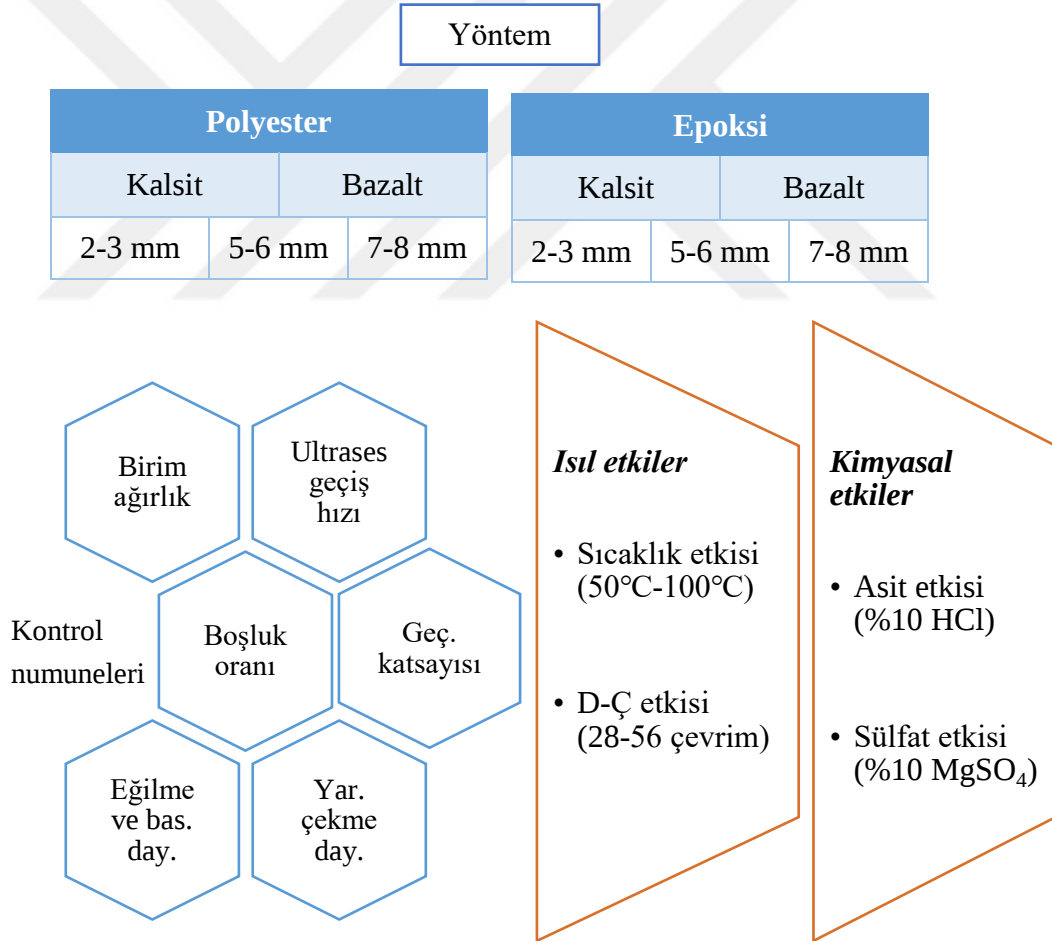
$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (2.3)$$

MAE (Mean Absolute Error - Ortalama Mutlak Hata): MAE, modelin tahmin ettiği değerler ile gerçek değerler arasındaki mutlak farkların ortalamasıdır. MAE, her hata büyüklüğüne eşit ağırlık verir, bu da modelin hatalarını eşit şekilde değerlendirir (Chai ve Draxler, 2014).

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (2.4)$$

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu tezde, geleneksel çimento hamuru yerine polimer reçine kullanılarak geçirimli beton üretilmiş ve bu betonun fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bağlayıcı malzeme olarak polyester ve epoksi olmak üzere iki farklı polimer reçine kullanılmıştır. Geçirimli beton üzerine çalışmalarda esas olarak gözenekliliğin ve geçirimliliğin nasıl artırılacağına odaklanılmış ve tek boyutlu agrega kullanımının olumlu performans gösterdiği ifade edilmiştir (Yahia ve Kabagire, 2014). Bu doğrultuda, tez kapsamında 2-3 mm, 5-6 mm ve 7-8 mm çaplarında kalsit ve bazalt kökenli kırmataşlar tercih edilmiştir. Tezin yöntemine ilişkin şema Şekil 3.1’de sunulmaktadır.



Şekil 3.1. Yöntem

Üretim aşamasında gerçekleştirilen deneme dökümleri sonucunda, reçine miktarının agrega miktarına oranı kütlece %6 olarak belirlenmiştir. Polyester reçine ile yapılan üretimde sertleştirici olarak metil etil keton peroksit ve hızlandırıcı olarak kobalt oktoat kullanılmıştır. Epoksi reçine üretiminde ise çift bileşenli döküm tipi epoksi reçine kullanılmıştır. Numunelere, $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta 7 gün süreyle standart kür koşulları uygulanmıştır. Numune üretiminde, iki farklı boyutta numune kalıbı kullanılmıştır. Numuneler, 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik şekilli ve 95 mm çapında, 150 mm uzunluğunda silindirik numune olarak üretilmiştir. Üretilen numunelere, standart kür koşullarına ek olarak dayanıklılık özelliklerini belirlemek amacıyla ikisi kimyasal ve ikisi ısı olmak üzere toplam dört farklı agresif ortam koşulu uygulanmıştır. Geçirimli polimer betonun kimyasal etkilere karşı dayanıklılığının değerlendirilmesi amacıyla, numuneler %10 derişimli HCl ve %10 derişimli MgSO_4 çözeltilerinde 90 ve 180 gün süreyle bekletilmiştir. D-Ç etkisine dayanıklılığının belirlenmesi için, numunelere -20°C ve 20°C arasında toplamda 28 ve 56 D-Ç çevrimi uygulanmıştır. Sıcaklık etkisinin incelenmesi amacıyla ise numuneler 50°C ve 100°C sıcaklıklarda etüvde bekletilmiştir.

Numuneler üzerinde birim ağırlık, ultrases geçiş süresi (UGS), boşluk oranı, geçirimsizlik katsayısı, basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Her bir karışım serisi için üç numunenin ortalama değerleri alınarak değerlendirme yapılmıştır. Geçirimli polimer beton üretiminde reçine türünün, agrega türünün ve agrega tane çapının etkileri, standart kür koşullarında ve farklı agresif ortam koşullarındaki dayanım ve dayanıklılık deneyleri ile ayrıntılı bir şekilde incelenmiş ve kontrol numuneleri ile karşılaştırılmıştır. Mikroyapı analizlerinde, kontrol numuneleri ile agresif ortam koşullarına bırakılan numunelerin FE-SEM analizi gerçekleştirilmiş ve elde edilen mikro yapı görüntüleri EDS analizi sonuçlarından yararlanılarak incelenmiştir.

3.1. Kullanılan Malzemeler

Geçirimli polimer beton numunelerin üretim aşamasında polyester reçine, sertleştirici ve hızlandırıcı, çift bileşenli epoksi reçine, 2-3 mm, 5-6 mm, 7-8 mm kalsit ve bazalt kırmataşlar kullanılmıştır. Ayrıca agresif kimyasal ortamlarda geçirimsiz betonun dayanıklılığın incelemek için HCl ve MgSO_4 ile uygun oranlarda çözelti oluşturulmuştur.

3.1.1. Polyester reçine

Bu tezde, geçirimli polimer beton numunelerinin üretiminde bağlayıcı olarak Turkuaz Polyester marka TP100 döküm tipi ortoftalik esaslı doymamış polyester reçine kullanılmıştır. Çizelge 3.1’de kullanılan polyestere ait fiziksel ve kimyasal özellikler sunulmuştur. Polyester reçine ile beraber sertleştirici olarak metil etil keton peroksit, hızlandırıcı olarak ise kobalt oktoat kullanılmıştır. Sertleştiriciler, hızlandırıcılarla veya ısıyla aktive edilen kimyasallardır ve polyester reçinenin kürlenme sürecini düzenlemektedir. Bu kimyasallar, reçine ile reaktif monomerler arasında çapraz bağlanma reaksiyonlarını başlatarak reçinenin katılaşmasını sağlamaktadır. Hızlandırıcılar ise doymamış polyester reçinelerin, oda sıcaklığında organik peroksitlerle kürlenmesini kolaylaştırır ve sertleştiriciyi aktive ederek reaksiyonun başlamasını sağlar (Martin, 1999).

Çizelge 3.1. Polyester reçinenin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Görünüm	Özgül ağırlık	Viskozite, Cps	Çalışma süresi, dk	Parlama noktası, °C	Sertlik, Barcol	Eğilme dayanımı, MPa	Çekme dayanımı, MPa
Sıvı, renksiz	1.17	350-500	10-15	175	40-42	85-95	50-60

3.1.2 Epoksi reçine

Bu tezde, geçirimli polimer beton numunelerinin üretiminde bağlayıcı olarak kullanılan bir diğer polimer ise Baran Boya firmasından temin edilen Marker AS-62 markalı çift bileşenli döküm tipi epoksi reçinedir. Kullanılan epoksi reçinenin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Epoksi reçinenin fiziksel ve kimyasal özellikleri

Görünüm	Özgül ağırlık	Viskozite, Cps	Çalışma süresi,dk	Parlama noktası, °C	Sertlik, Shore	Eğilme dayanımı, MPa	Basınç dayanımı, MPa
Sıvı, renksiz	1.09	500-800	90	180	76	84	65

3.1.3. Kalsit

Bu tezde, Eskişehir bölgesine ait, kalker kökenli ve TS 706 EN 12620 standardına uygun 2-3 mm, 5-6 mm ve 7-8 mm tane çaplı doğal kırmataş agregalar kullanılmıştır. Kullanılan kalsit agregalarının görselleri Şekil 3.2’de, kimyasal özellikleri ise Çizelge 3.3’te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Kalsit agregası kimyasal analizi

Agrega türü	CaO, %	SiO ₂ , %	Al ₂ O ₃ , %	Fe ₂ O ₃ , %	MgO, %	Yoğunluk, kg/dm ³
Kalsit	43.73	0.2	0.05	0.08	14.48	2.72
Bazalt	6.52	53.5	17.83	7.32	4.25	2.63

3.1.4. Bazalt

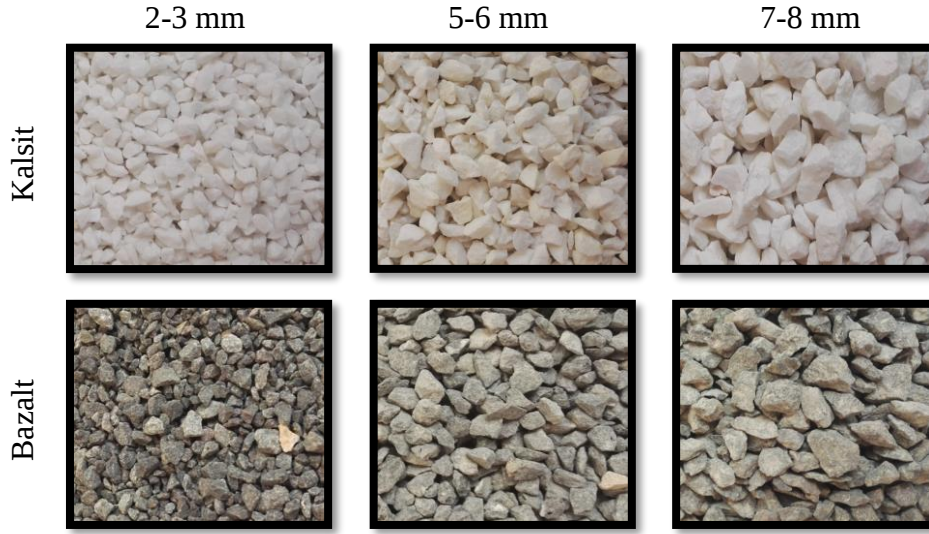
Bu tezde, Eskişehir bölgesine ait, silis kökenli ve TS 706 EN 12620 standardına uygun 2-3, 5-6 ve 7-8 mm tane çaplı bazalt kullanılmıştır. Şekil 3.2’de bazalt agregaların görselleri sunulmuş, kimyasal özellikleri ise Çizelge 3.4’te detaylandırılmıştır.

Çizelge 3.4. Bazalt agregası kimyasal analizi

Agrega türü	CaO, %	SiO ₂ , %	Al ₂ O ₃ , %	Fe ₂ O ₃ , %	MgO, %	Yoğunluk, kg/dm ³
Kalsit	43.73	0.2	0.05	0.08	14.48	2.72
Bazalt	6.52	53.5	17.83	7.32	4.25	2.63

3.2 Geçirimli Beton Numunelerinin Hazırlanması

Numunelerin üretim sürecinde, farklı reçine/agrega oranları kullanılarak deneme dökümleri gerçekleştirilmiştir. Her iki polimer reçine türü ve agregası için en uygun reçine/agrega oranı, kütlece % 6 olarak belirlenmiştir. Bu oran, hem malzeme performansını optimize etmek hem de üretim sürecinin verimliliğini artırmak amacıyla seçilmiştir. Polyester reçine kullanılarak yapılan üretimlerde, reçine miktarının kütlece %1’i oranında hızlandırıcı ve %2’si oranında sertleştirici eklenmiştir. Çift bileşenli epoksi reçine kullanılarak gerçekleştirilen üretimlerde ise üreticinin önerdiği karışım oranı uygulanmış, reçine (A bileşeni) ve sertleştirici (B bileşeni) kütlece 2/1 (A/B) oranında kullanılmıştır.



Şekil 3.2. Deneyisel çalışmada kullanılan agregalar

Polyester reçine ile gerçekleştirilen üretim sürecinde, öncelikle üretim reçetesinde belirtilen oranlara uygun şekilde agrega ve reçine dikkatlice bir araya getirilmiş ve homojen bir karışım elde edilene kadar karıştırılmıştır. Bu işlem sonrasında, sertleşme sürecini başlatmak için gerekli olan sertleştirici ve hızlandırıcı malzemeler eklenmiş ve karıştırma işlemi kontrollü bir şekilde sürdürülmüştür. Hızlandırıcı ve sertleştiricinin polyester reçine ile tepkimeye girmesi sonucunda sertleşme süreci başlamıştır. Epoksi reçine ile gerçekleştirilen üretimlerde öncelikle sertleştirici (B bileşeni), üretim reçetesinde belirtilen miktara uygun olarak temiz bir karışım kabına alınmış, ardından bu bileşene kütleye iki katı oranında epoksi reçine (A bileşeni) eklenmiş ve homojen bir kıvam elde edilene kadar karıştırılmıştır. Epoksi reçinenin polyestere göre daha uzun çalışma süresine sahip olması, agrega ile karıştırılmadan önceki hazırlık işlemleri için daha fazla zaman tanımaktadır.



Şekil 3.3. Üretilen numuneler

Her iki reçine ile hazırlanan karışımlar, sertleşme sürecine başlamadan önce kalıp ayırıcı ile yağlanmış 40x40x160 mm ölçülerindeki üç gözlü çelik kalıplara ve 150x95 mm ölçülerindeki silindirik kalıplara dökülmüştür. Tokmak yardımıyla numuneler kalıplara iyice yerleştirilmiş, ardından mala kullanılarak yüzey düzeltme işlemi yapılmıştır. Numuneler, priz sürelerini tamamlamaları için laboratuvar ortamında bekletilmiş, ardından sertleşen numuneler kalıplardan çıkarılarak farklı kür koşullarında bekletilmiştir. Üretim sürecinin her aşamasında, reçinelerin kimyasal özellikleri ve çalışma süreleri titizlikle dikkate alınmalıdır. Özellikle karışımların kalıplara dökülme zamanlaması kritik öneme sahiptir. Erken dökümler, reçinenin henüz agregalarla bağ kurmadan kalıpların alt kısmında tabaka halinde birikmesine yol açmakta; geç dökümler ise karışım esnasında priz oluşumuna neden olarak kalıplara yerleştirme işlemini zorlaştırmaktadır.

3.3. Geçirimli Polimer Beton Numunelere Yapılan Deneyler

Geçirimli polimer beton numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerini belirlemek ve değerlendirmek amacıyla çeşitli deneyler uygulanmıştır. Üretilen kontrol numuneleri üzerinde sırasıyla birim ağırlık, ultrases geçiş süresi, boşluk oranı, geçirimsizlik, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, geçirimli polimer betonun dayanıklılık özelliklerini belirlemek için numuneler asit etkisi, sülfat etkisi, D-Ç etkisi ve sıcaklık etkisi gibi farklı çevresel koşullara bırakılmıştır. Bu koşullar altında tutulan numuneler üzerinde de boşluk oranı, geçirimsizlik, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri yapılmıştır.

3.3.1 Fiziksel ve mekanik özellik deneyleri

3.3.1.1 Birim ağırlık deneyi

Sertleşmiş geçirimli polimer beton numunelerin birim ağırlığı TS EN 1015-10: 2001 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Birim ağırlık değerleri (3.1) denkleminde belirtilen formülle, hassas terazi ile tartılan numunelerin ağırlıklarının numunelerin hacmine bölümü ile elde edilmiştir. Birim ağırlık değerleri, her geçirimli polimer beton serisi için üç numune üzerinden ölçülüp ortalaması alınarak hesaplanmıştır.

$$P = m / v \quad (3.1)$$

P = Birim ağırlık (kg/dm³)

m = Numunenin ağırlığı (kg)

v = Numunenin boşluklu hacmi (dm³)

3.3.1.2 Ultrases geçiş süresi deneyi

Ultrases geçiş süresi beton kalitesinin kolay ve zararsız tespiti için kullanılan hasarsız deney yöntemlerinden birisidir. Bu yöntemle malzeme kalitesinin belirlenmesi için, ölçümlerin yüksek bir duyarlılık ve doğrultuda yapılması gerekir. Ultrasonik deney cihazının alıcı ve verici sensörleri arasında oluşturulan ultrasonik ses dalgaların beton içindeki yayılma hızı belirlenmesi esasına dayanır. Ultrases deney cihazı, ses üstü dalganın verildiği yüzey ile geri alındığı yüzey arasındaki uzaklığı ne kadar sürede geçtiğini ölçmektedir (Topçu, 2006). Ultrases geçiş süresi deneyi TS EN 12504-4: 2012 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Ultrases geçiş hızı değerleri, (3.2) denklemi ile numunenin uzunluğunun, dalganın geçiş süresine bölümü ile elde edilmiştir.

$$V = L/T \quad (3.2)$$

V: Ultrases geçiş hızı (km/s)

L: Yol uzunluğu (km)

T: Dalganın geçiş süresi (s)

3.3.1.3 Boşluk oranı deneyi

Boşluk oranı, bir malzemenin içindeki boşlukların hacminin, toplam hacme oranı olarak tanımlanır. Beton ve diğer yapı malzemelerinin boşluk oranları, dayanıklılık, su emme ve diğer fiziksel özellikler açısından büyük öneme sahiptir. Geçirimli betonda boşluk oranının elde etmek için Arşimet kaldırma kuvveti ilkesine dayalı su yer değiştirme yönteminin (Water Displacement Method) kullanılması önerilir (Rao vd., 2020). Bu yöntemin temelinde, bir malzemenin suya daldırılması ve yer değiştiren su miktarının ölçülmesi yer almaktadır. İlk olarak, belirli bir hacme sahip numune örneği alınır. Bu numune genellikle oda sıcaklığında veya düşük sıcaklıklarda kurutulmuş ve düzgün bir

şekilde belirli bir boyutta olmalıdır. Ardından, numunenin kütlesi ve hacmi ölçülür. Beton örneği, belirli bir hacimdeki suya tamamen daldırılır. Bu işlem sırasında, suyun bir kısmı yer değiştirir ve bu yer değiştiren suyun hacmi ölçülür. Su yer değiştirme miktarı, beton örneğindeki boşluk oranını belirlemek için kullanılır. Betonun toplam hacmi ile yer değiştiren su miktarı arasındaki fark, malzemedeki boşluk hacmini verir. Yüzdesel boşluk oranı (3.3) denklemi ile bulunmaktadır.

$$P = V_d/V_b \times 100 \quad (3.3)$$

P: Boşluk oranı (%)

V_b : Numunenin toplam hacmi (mm^3)

V_d : Yer değiştiren su hacmi (mm^3)

3.3.1.4 Geçirimsizlik deneyi

Geçirimsiz betonlarda su iletimini sağlayan en önemli özellik, betonun yüzeyinden tabanına kadar kesintisiz bir şekilde uzanan ve birbirine bağlı boşluklardan oluşan yapı olarak tanımlanabilir. Bu tür betonların toplam boşluk oranı, açık boşluklar ile kapalı uçlu boşlukların bir araya gelmesiyle ifade edilmektedir. Ancak, suyun hareketine olanak tanıyan ve birbirine bağlı şekilde süreklilik arz eden boşluklar, efektif boşluk olarak adlandırılmaktadır (Akkaya ve Çağatay, 2016). Dolayısıyla, toplam boşluk oranı ile efektif boşluk oranı arasında önemli bir ayrım bulunmaktadır; toplam boşluk oranı malzemenin genel boşluk oranını ifade ederken, efektif boşluk oranı malzemenin hidrolik geçirgenliğini doğrudan belirleyen parametredir.

Boşluk oranı çeşitli faktörlerden etkilenir. Bu faktörler arasında agrega boyutu, agrega türü, bağlayıcı türü ve miktarı ile karıştırma ve sıkıştırma da yer almaktadır. Geçirimsizlik boşluk oranı ile doğrudan ilişkili olmakla birlikte, gözenek boyutu, bağlantılar ve kıvrımlılık gibi ek faktörlerden de etkilenir. Genel olarak, artan gözeneklilik, geçirimsizlik katsayısını artırır. Buna karşın, daha ince agrega kullanımı ve uygun derecelendirme, mekanik dayanımı artırma potansiyeline sahiptir. Ancak, daha ince agrega ve sıkı derecelendirme aynı zamanda gözenek boyutlarını küçültür ve gözeneklerin birbirine bağlanabilirliğini azaltır; bu da su geçirgenliğinde bir düşüşe yol açar (Yogafanny vd., 2023).

Geçirimli betonda geçirimlilik katsayısını belirlemek için yaygın olarak iki laboratuvar yöntemi öne çıkmaktadır:

- 1) Sabit seviyeli su geçirimlilik deneyi (Constant head permeability test)
- 2) Düşen seviyeli su geçirimlilik deneyi (Falling head permeability test)

Düşen seviyeli su geçirimlilik deneyi, geçirimli betonun gerçek geçirgenliğini daha doğru bir şekilde yansıtabildiği, donanım kolaylığı ve maliyet açısından daha uygun olması gibi nedenlerle, sabit seviyeli su geçirimlilik deneyine göre daha sık tercih edilmektedir. Sabit seviyeli su geçirimlilik deneyinde, yüksek geçirgenli betonlarda sürekli su deşarjını sağlamak oldukça zordur, bu da düşen seviyeli su geçirimlilik deney yöntemini daha uygulanabilir kılmaktadır (Zhang vd., 2020; Stanic vd., 2023). Geçirimli betonların geçirimlilik katsayısının belirlenmesinde kullanılan farklı deney yöntemleri nedeniyle, bulunan sonuçların, tercih edilen deney yöntemi, uygulanan basınç ve düşen su seviyesi bilgilerini içerecek şekilde raporlanması gerektiği önemle vurgulanmaktadır (Qin vd., 2015).

Bu tezde, geçirimli betonun geçirimlilik katsayısının hesaplanmasında, ACI tarafından önerilen düşen seviyeli su geçirimlilik deneyi yöntemi tercih edilmiştir (Sandoval vd., 2017). Bu yöntemde, silindir deney numunesi, sızdırmaz bir malzeme ile kaplanarak Şekil 3.5'te gösterilen deney düzeneğine yerleştirilmiştir. 300 mm uzunluğunda dereceli bir akrilik silindir, numune tertibatının üst kısmına yerleştirilmiş ve bir lastik kılıf yardımıyla sıkıca sabitlenmiştir. Boşaltma borusunun üst kısmı, doymamış akışın önlenmesi amacıyla numunenin üst seviyesinden 10 mm yukarıda konumlandırılmıştır. Deney öncesinde, numune gözeneklerinin tamamı ve boşaltma borusu, dereceli silindirden eklenen su ile doldurulmuş ve numunedeki hava ceplerinin tamamen giderilmesi için silindirdeki su seviyesi, boşaltma borusunun üst seviyesiyle hizalanana kadar dışarı akmasına izin verilmiştir. Böylelikle, ön koşullandırma tamamlanmış ve numunen tamamen doymuş hale getirilmiştir. Deney sırasında vana kapalıyken, dereceli silindir su ile doldurulmuş; ardından vana açılarak suyun 290 mm başlangıç seviyesi (h_1) ile 70 mm son seviyesi (h_2) arasındaki düşüş süresi (t) saniye cinsinden ölçülmüştür. Bu işlem üç kez tekrarlanmıştır. Geçirimlilik katsayısı k , (3.4) denklemi ile bulunmuştur (Neithalath, 2006).

$$k = \left[\frac{a \cdot l}{A \cdot t} \right] \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (3.4)$$

k: Geçirimsizlik katsayısı (mm/s)

a = Silindirin alanı (mm²)

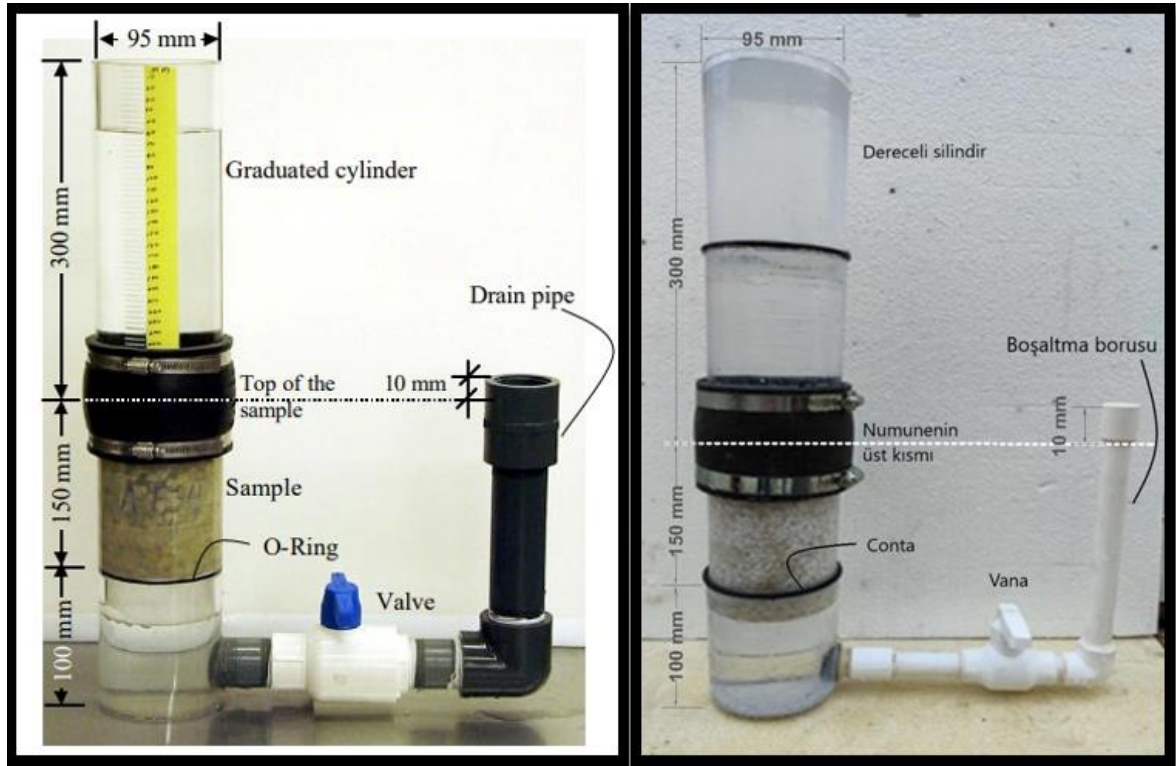
l = Numunenin boyu (mm)

A = Numunenin alanı (mm²)

t = Geçen süre (s)

h₁ = Başlangıç su seviyesi su seviyesi (mm)

h₂ = Deney bitimindeki su seviyesi (mm)



Şekil 3.4. Geçirimsizlik deney düzeneği a) ACI 522 R-10 b) Deneysel çalışma

3.3.1.5 Eğilme dayanımı deneyi

Eğilme dayanımı sertleşmiş geçirimsiz polimer beton numunelerinin üç noktadan kırılıncaya kadar yüklemeye tabi tutulmasıyla belirlenir. Deney makinesi altta 100.0 mm ± 0.5 mm aralıklı yerleştirilmiş, 45 mm - 50 mm arasında uzunluğa sahip iki mesnet silindiri ve üstte, mesnet silindirleri arasında merkezi olarak yerleştirilmiş aynı uzunlukta olmak üzere üçüncü bir yükleme silindiri olmalıdır. Eğilme dayanımı deneyi TS EN 1015-11:

2000-10 standardına uygun olarak 7 günlük 40x40x160 mm ebatlarında prizma şekilli numunelerin, 30 saniye ile 90 saniye süre içerisinde kırılma gerçekleşecek şekilde 50 N/s yükleme hızı sağlanarak, kırılıncaya kadar sabit hızda düzgün olarak artan yük uygulanarak kırılmıştır. Eğilme dayanımı değerleri (3.3) denklemi ile elde edilmiştir.

$$\sigma_e = 1.5 \times (PL/bh^2) \quad (3.5)$$

σ_e : Eğilme dayanımı (MPa)

P: Numuneye uygulanan en büyük yük (N)

L: Mesnet silindirlerinin arasındaki mesafe (mm)

b: Numune genişliği (mm)

h: Numune yüksekliği (mm)

3.3.1.6 Basınç dayanımı deneyi

Basınç dayanımı deneyi, TS EN 1015-11: 2000-10 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. 40x40x160 mm ebatlarında prizma şekilli numunelerin, eğilme dayanımı deneyi sonrası ikiye bölünmesiyle oluşan yarım prizma numuneler ile yapılmıştır.

7 günlük numuneler, 40 mm x 40 mm x 10 mm ebatlarında yükleme başlığının temas ettiği numune genişliğince yük uygulaması sağlanacak şekilde yerleştirilmiştir. Yükte ani sıçrama olmaksızın 30 saniye ile 90 saniye süre içerisinde kırılma gerçekleşecek şekilde 500 N/s yükleme hızı sağlanarak, kırılıncaya kadar sabit hızda, düzgün olarak artan yük uygulanarak kırılmıştır. Basınç dayanımı, numunenin taşıyabileceği en fazla yükün, numunenin yük uygulanan kesit alanına bölünmesiyle hesaplanmıştır.

3.3.1.7 Yarmada çekme dayanımı deneyi

Geçirimli polimer numunelerin yarmada çekme dayanımı deneyleri, TS EN 12390-6 standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde, 2000 kN yükleme kapasitesine sahip, hidrolik yük kontrollü ve dijital göstergeli otomatik pres kullanılmıştır. Deney sırasında numuneler, pres tablasının merkezine yerleştirilen demir çubuklar arasına yerleştirilerek yük uygulanmıştır. Kırılma sonrası preste okunan değer, aşağıda verilen denklemde kullanılarak numunelerin yarmada çekme dayanımı hesaplanmıştır.

$$\sigma_y = 2 \times (P/\pi.b.h) \quad (3.6)$$

σ_y : Yarmada çekme dayanımı (MPa)

P: Numuneye uygulanan en büyük yük (N)

b: Numune genişliği (mm)

h: Numune yüksekliği (mm)

3.3.2. Dayanıklılık deneyleri

Standart kür koşullarında ve agresif ortam koşullarında bekletilen geçirimli polimer beton numunelerine ait eğilme dayanımı, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, boşluk oranı ve geçirimlilik katsayısı sonuçları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu incelemeler doğrultusunda, reçine türü, agrega türü ve agrega tane çapının PPC'nin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri ortaya konmuştur.

3.3.2.1 Asit dayanıklılığı deneyi

Asit etkisini incelemek amacıyla, geçirimli polimer beton numuneleri %10 derişimli hidroklorik asit (HCl) çözeltisinde 90 ve 180 gün süreyle bekletilmiştir. Bu süre boyunca, çözeltide buharlaşan su yerine belirli aralıklarla su eklenmiş ve böylece derişimin sabit kalması sağlanmıştır. Deney sonunda, numuneler çözeltiden çıkarılmış, laboratuvar ortamında kurutulmaya bırakılmıştır. Kuruyan numuneler üzerinde geçirimlilik, boşluk oranı, eğilme, basınç ve yarmada çekme deneyleri uygulanarak geçirimlilik katsayısı, boşluk oranı yüzdesi, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı hesaplanmıştır. Asitin etkisiyle oluşan değişimler, elde edilen verilerden oluşturulan şekillerle analiz edilmiştir.

3.3.2.2 Sülfat dayanıklılığı deneyi

Sülfat etkisini incelemek amacıyla, 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik geçirimli polimer beton numuneleri %10 derişimli magnezyum sülfat $MgSO_4$ çözeltisinde 90 ve 180 gün süreyle bekletilmiştir. Bu süreçte, buharlaşan su belirli aralıklarla eklenerek çözeltinin derişimi sabit tutulmuştur. Deney sonunda, numuneler çözeltiyle temasın ardından yıkanmış

ve laboratuvar ortamında kurumaya bırakılmıştır. Kuruyan numuneler üzerinde geçirimlilik, boşluk oranı, eğilme, basınç ve yarmada çekme deneyleri uygulanmış; bu deneylerden geçirimlilik katsayısı, boşluk oranı yüzdesi, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı hesaplanmıştır. Sülfat etkisiyle oluşan değişimler, deney verilerinden elde edilen şekiller aracılığıyla analiz edilmiştir.

3.3.2.3 Donma-çözülme deneyi

D-Ç etkisinin belirlenmesi için geçirimli betonun kullanım alanları dikkate alınmış ve numuneler “TS 2824 EN 1338 Zemin döşemesi için beton kaplama blokları” ve “TS 436 EN 1340 Zemin döşemesi için beton bordür taşları” standartlarına uygun olarak deney gerçekleştirilmiştir. Numuneler D-Ç deney aletinde mevcut su dolu kaplara konulmuş, 24 saat bekletildikten sonra 3 saat boyunca 20°C 'de ve 3 saat boyunca -20°C 'de kalacak ve üç saatte iki sıcaklık arasındaki değişimin sağlanacağı şekilde çevrime alınmıştır. Her bir çevrim toplamda 12 saat sürmüştür. Numunelerden bir gruba 28 D-Ç çevrimi, diğer gruba ise 56 D-Ç çevrimi uygulanmıştır. Deney sonunda numuneler üzerinde geçirimlilik, boşluk oranı, eğilme, basınç ve yarmada çekme deneyleri gerçekleştirilmiştir. D-Ç çevrimleri sonucu oluşan değişiklikler, oluşturulan şekillerle değerlendirilmiştir.



Şekil 3.5. D-Ç deney aleti ve deney numuneleri

3.3.2.4 Sıcaklık etkisi deneyi

Sıcaklık etkisini incelemek amacıyla, geçirimli polimer beton numunelerinin bir kısmı 50°C 'ye, diğer kısmı ise 100°C 'ye ayarlanmış etüvlerde üçer saat süreyle bekletilmiştir. Etüvden çıkarılan numuneler üzerinde, herhangi bir soğuma olmaksızın,

eğilme, basınç, yarmada çekme dayanımı deneyleri yapılarak numunelerin dayanımları hesaplanmıştır. Ayrıca numuneler üzerinde geçirimsizlik ve boşluk oranı deneyleri de gerçekleştirilmiştir. Sıcaklık etkisiyle oluşan değişimler, elde edilen verilerden oluşturulan şekiller yardımıyla değerlendirilmiştir.

3.4. Mikroyapı Analizleri

Kontrol numunelerinin ve farklı agresif ortam koşullarında bekletilen numunelerin iç yapılarındaki değişimleri incelemek amacıyla, SEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde, numunelerin içyapılarındaki mikro yapılar görsel olarak incelenmiş, atomların ağırlık yüzdeleri ise Enerji Dağılım Spektroskopisi (EDS) sonuçları ile belirlenmiştir. Geçirimli polimer betondan alınan mikroyapı analizi örnekleri, 2-3 mm tane çaplı kontrol numunelerinden, 180 gün boyunca asit ve sülfat çözeltilerinde bekletilen numunelerden, 56 D-Ç çevrimi etkisinde kalan numunelerden ve 100°C sıcaklık etkisi altında tutulan numunelerden alınmıştır. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Araştırma Laboratuvarı ile Uygulama ve Araştırma Merkezi (ARUM) laboratuvarlarında yürütülen çalışma sürecinde, örnekler önce Şekil 3.10 (a)'da gösterilen cihaz ile altın kaplama işlemine tabi tutulmuş, ardından Şekil 3.10(b)'de gösterilen taramalı elektron mikroskobuna yerleştirilmiştir. Çekimler, 500x, 1500x ve 5000x büyütmelemlerle gerçekleştirilmiş ve numuneler üzerindeki mikro yapılar noktasal ve bölgesel olarak enerji saçınım spektrometresi (EDS) kullanılarak elemental analizlerle incelenmiştir. Bu yöntemle numunelerin içyapılarına dair kapsamlı veriler elde edilmiştir.

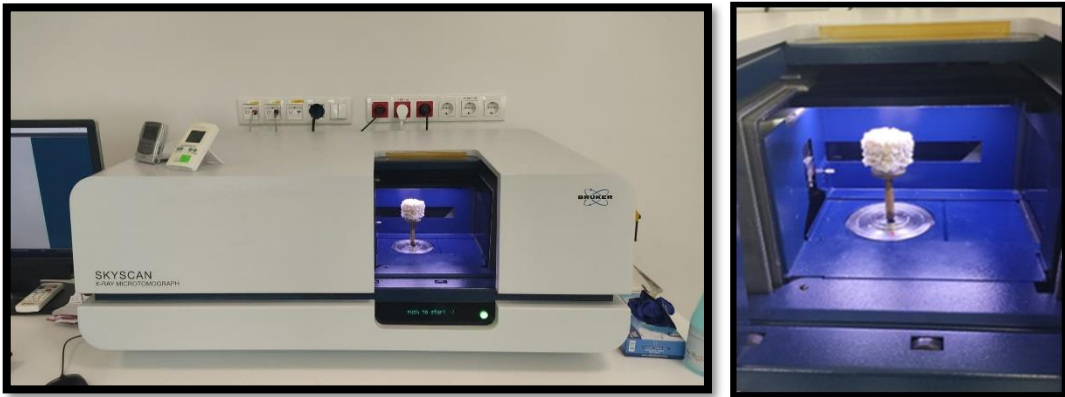


Şekil 3.6. Numunelerin kaplanması (a) ve Mikroyapı analizinde kullanılan SEM cihazı (b)

3.5 Geçirimli Betonun Mikro BT (Mikro Bilgisayarlı Tomografi) ile Analizi

Mikro-BT farklı yoğunluktaki bileşenlerin yüksek çözünürlükte ve hasarsız bir şekilde üç boyutlu olarak incelenmesine olanak sağlayan bir görüntüleme tekniğidir. Bu yöntemde, X-ışını kaynağı önünde 360° döndürülen numuneden geçen ışınlar, bir kamera aracılığıyla algılanır. Elde edilen veri setlerinden, numuneyi oluşturan bileşenlerin üç boyutlu analizleri yapılabilir.

Bu tezde, Ankara Üniversitesi Diş Hekimliği Fakültesi Merkez Araştırma Laboratuvarı Mikro-BT Laboratuvarında bulunan Skyscan 1275 Mikro-BT cihazı kullanılmıştır. Şekil 3.7’de gösterildiği gibi cihazın tarayıcı bölümüne yerleştirilen $40 \times 40 \times 40$ mm boyutlarındaki numuneler 80 kV voltaj ve $125 \mu\text{A}$ akım ile 38 mikron/piksel boyutunda 1 mm kalınlığında alüminyum filtre kullanılarak her numune 360° boyunca 0.2° hassasiyette adımlarla yaklaşık 50 dakika süreyle taranmıştır ve 1800 görüntü elde edilmiştir. Tarama sırasında elde edilen görüntüler, özel algoritmalar yardımıyla NRecon yazılımıyla yeniden yapılandırılmış ve kesitsel görüntüler elde edilmiştir. Bu sayede numunelerin belirli kesitlerinde reçine, agrega ve boşluklar net bir şekilde tanımlanabilmektedir. Bu kesitsel görüntüler birleştirilerek CTvox yazılımıyla üç boyutlu görseller oluşturulmuştur. CTAn yazılımına aktarılan kesitsel görüntüler üzerinde ilgilenilen alan (ROI-Region of Interest) ve ilgilenilen hacim (VOI-Volume of Interest) belirlenmiş ve numunelerdeki boşlukların miktarı ve oranları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda açık boşluk, kapalı boşluk ve toplam boşluk değerleri hesaplanarak numunelerin içyapısı hakkında kapsamlı veriler elde edilmiştir.



Şekil 3.7. Mikro-BT cihazı

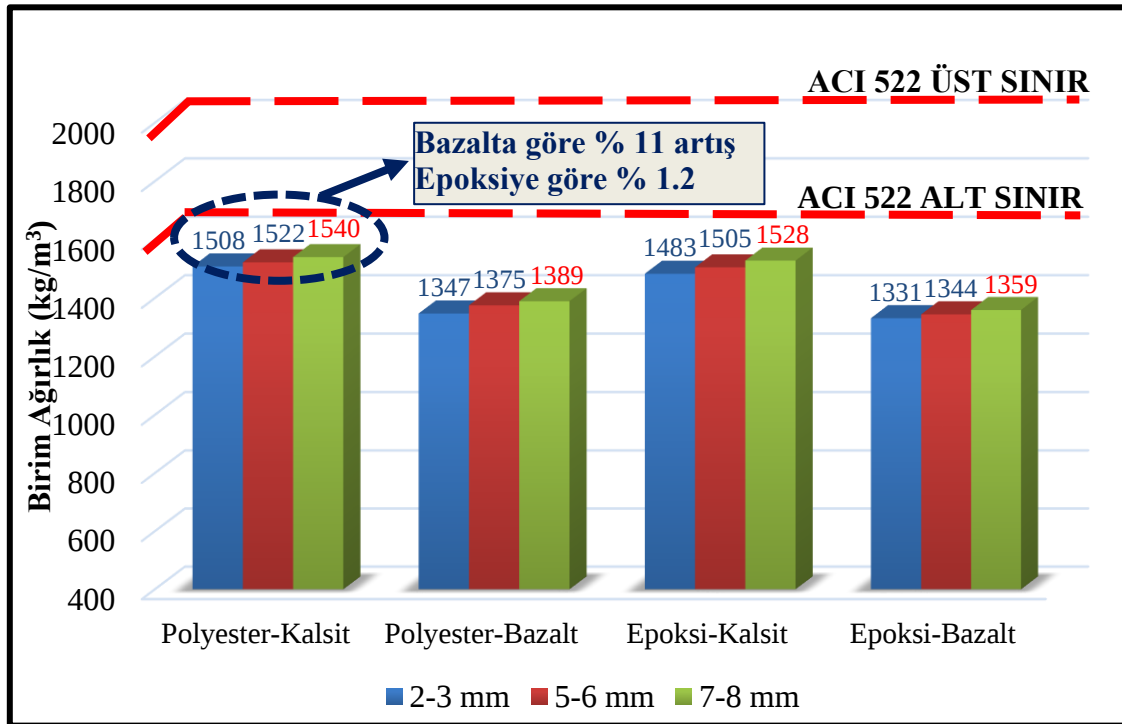
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1 Fiziksel ve Mekanik Özellik Deneylerinin Değerlendirilmesi

Standart kür koşullarında v bekletilen geçirimli polimer beton numunelerine ait birim ağırlık, ultrases geçiş hızı, boşluk oranı, geçirimlilik katsayısı, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı sonuçları oluşturulan şekiller üzerinde detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu incelemeler doğrultusunda, reçine türü, agrega türü ve agrega tane çapının PPC'nin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri ortaya konmuştur.

4.1.1. Birim ağırlık deney sonuçları

Şekil 4.1'de, geçirimli polimer betonda elde edilen birim ağırlık değerleri gösterilmektedir. Kalsit agregaları ile üretilen PPC numunelerinin birim ağırlığı, bazalt agregalarıyla üretilen numunelere göre %11 artmıştır. Bu artış, kalsit agregalarının yoğunluğunun bazalt agregalarına göre daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.

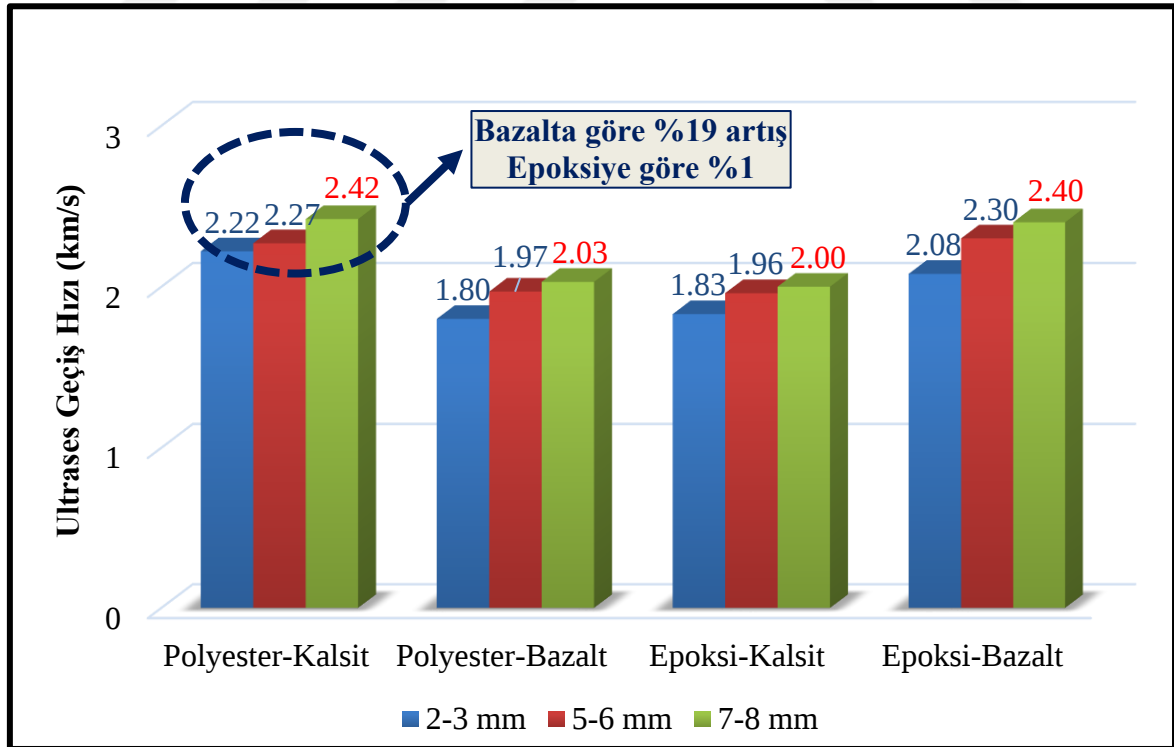


Şekil 4.1. Geçirimli polimer betonun birim ağırlıkları

Polyester reçine ile üretilen PPC numunelerinin birim ağırlığının, epoksi reçine kullanılan numunelere göre ortalama %1.2 daha yüksek olduğu belirlenmiştir. Polyester reçinenin yoğunluğunun epoksi reçinesine göre daha yüksek olması, birim ağırlıktaki artışı açıklamaktadır. Farklı tane çaplı agregalar kullanılarak yapılan deneylerde, agrega tane boyutunun artmasıyla birim ağırlıkta %3 artış gözlemlenmiştir. Tane boyutundaki artış, toplam boşluk hacmini azaltarak birim ağırlığı artırmıştır. Bu tezde, PPC kullanılarak daha düşük birim ağırlığa sahip ve yüksek geçirimlilikte beton elde edilebileceği belirlenmiştir.

4.1.2. Ultrases geçiş süresi deney sonuçları

Şekil 4.2’de bileşen türüne göre PPC numunelerinin ultrases geçiş hızlarındaki değişimi gösterilmiştir. PPC numunelerinin tasarımında agrega oransal olarak en büyük bileşen olduğu için UGH değerleri üzerinde agreganın türü, boşluk yapısı ve yoğunluğu oldukça etkilidir. Elde edilen veriler, kalsit içeren PPC numunelerinin UGH değerlerinin bazalt agregası içeren numunelere göre %19’a kadar daha yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Bu durum, kalsit agregasının daha yoğun bir yapı sunmasıyla açıklanabilir.

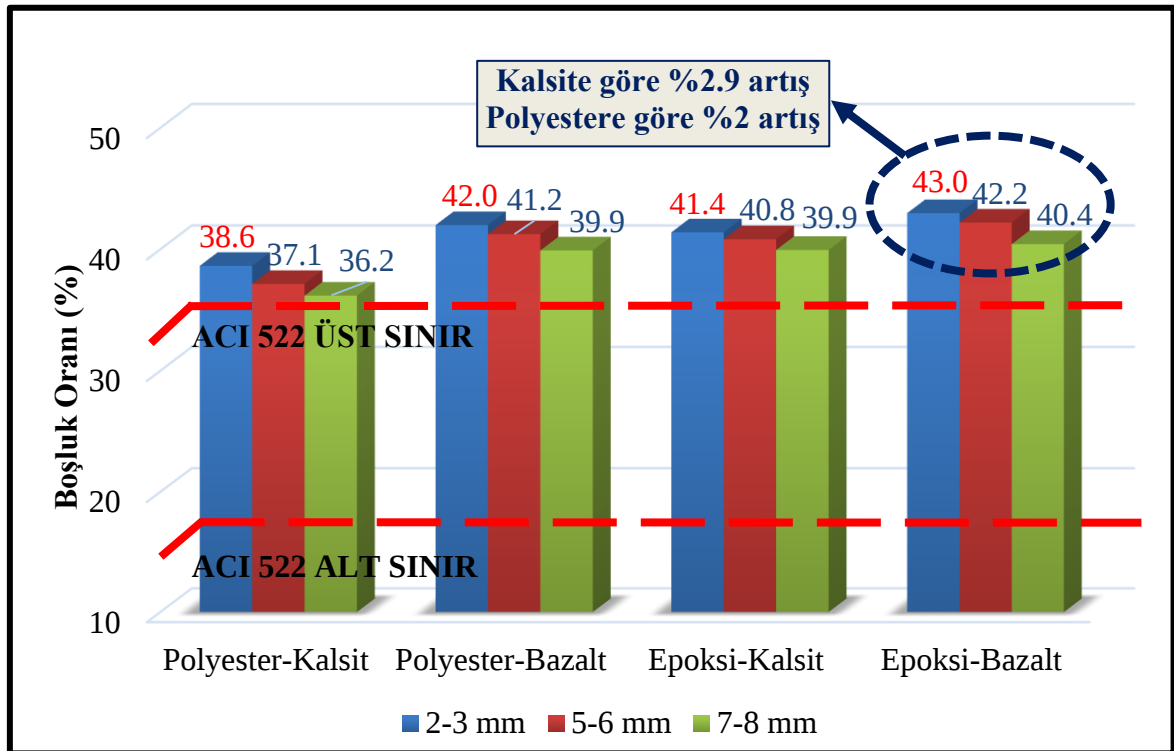


Şekil 4.2. Geçirimli polimer betonun ultrases geçiş hızları

Ayrıca, polyester reçinenin yoğunluğunun daha fazla olması, polyester bağlayıcı PPC numunelerinin UGH değerlerinin daha yüksek olmasını sağlamıştır. Agregatane boyutunun PPC numunelerindeki boşluk oranı üzerinde önemli bir etkisi bulunmaktadır. Ultrasonik dalgaların boşluklar içerisinde yayılım gösterememesi ve çevresinden dolanması, dalga geçiş süresinin uzamasına neden olarak geçiş hızını düşürmektedir. Buna bağlı olarak, daha küçük tane boyutlarına sahip PPC numunelerinde boşluk içeriğinin artmasıyla UGH değerlerinin düştüğü, daha iri taneli agregalarda ise UGH değerlerinde artış gözlemlendiği belirlenmiştir. Özellikle, agrega tane çapının artmasıyla birlikte UGH değerlerinde %15.4 oranında bir artış görülmüştür.

4.1.3. Boşluk oranı deney sonuçları

Şekil 4.3'te, PPC numunelerinin boşluk oranlarının değişimi gösterilmektedir. Epoksi ile üretilen numunelerin boşluk oranı, polyester ile üretilenlere göre %2 artış göstermiştir. Bazalt ile üretilen PPC'lerin boşluk oranı, kalsite göre %2.9 daha fazla olduğu görülürken, tane çapı arttıkça boşluk oranında %6.2'ye kadar azalma olduğu belirlenmiştir.

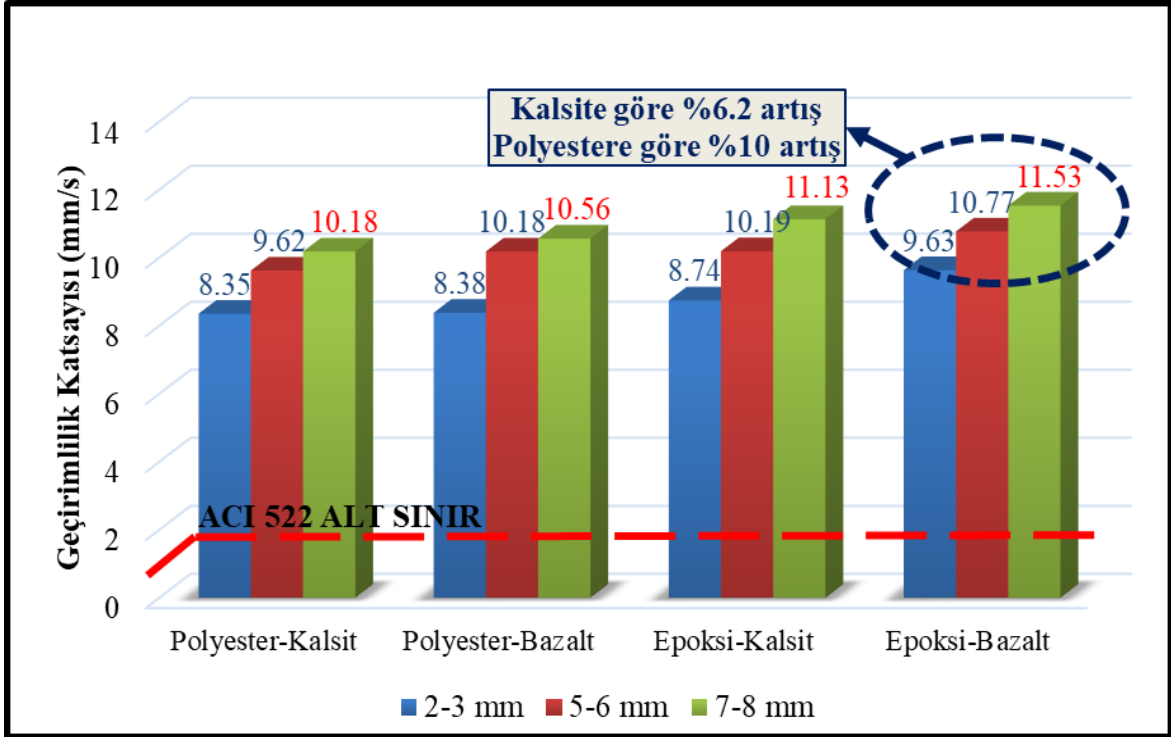


Şekil 4.3. Geçirimli polimer betonun boşluk oranları

Tane ϕ ının azalması gözenek hacmi daha küçük fakat daha çok boşluk oluşturmaya nedeni ile toplam boşluk oranının artmasına neden olmaktadır. ACI 522 standardına göre, betonun en az 1 mm/s geçirimsizliğe sahip olabilmesi için gerekli olan minimum boşluk oranı %15 olarak belirtilmekte, bununla birlikte geçirimsiz betonlarda boşluk oranlarının %35'e kadar ulaşabileceği ifade edilmektedir. Bu tezde, agregaları bir arada tutan geleneksel çimento hamuru yerine, daha ince bir ara yüzey sağlayarak bağlayıcılık oluşturan reçinelerin tercih edilmesi, numunelerin boşluk oranlarının sınır değerlerinin üzerine çıkmasına olanak tanımıştır. Özellikle epoksi bazlı bağlayıcılar, daha ince bir kaplama oluşturarak boşluk oranlarını artırmış ve daha geçirgen yapılar elde edilmesini sağlamıştır. Bu durum, polimer bağlayıcıların, geçirimsiz beton tasarımında çimento bazlı bağlayıcılara göre önemli bir avantaj sunduğunu göstermektedir.

4.1.4. Geçirimsizlik deney sonuçları

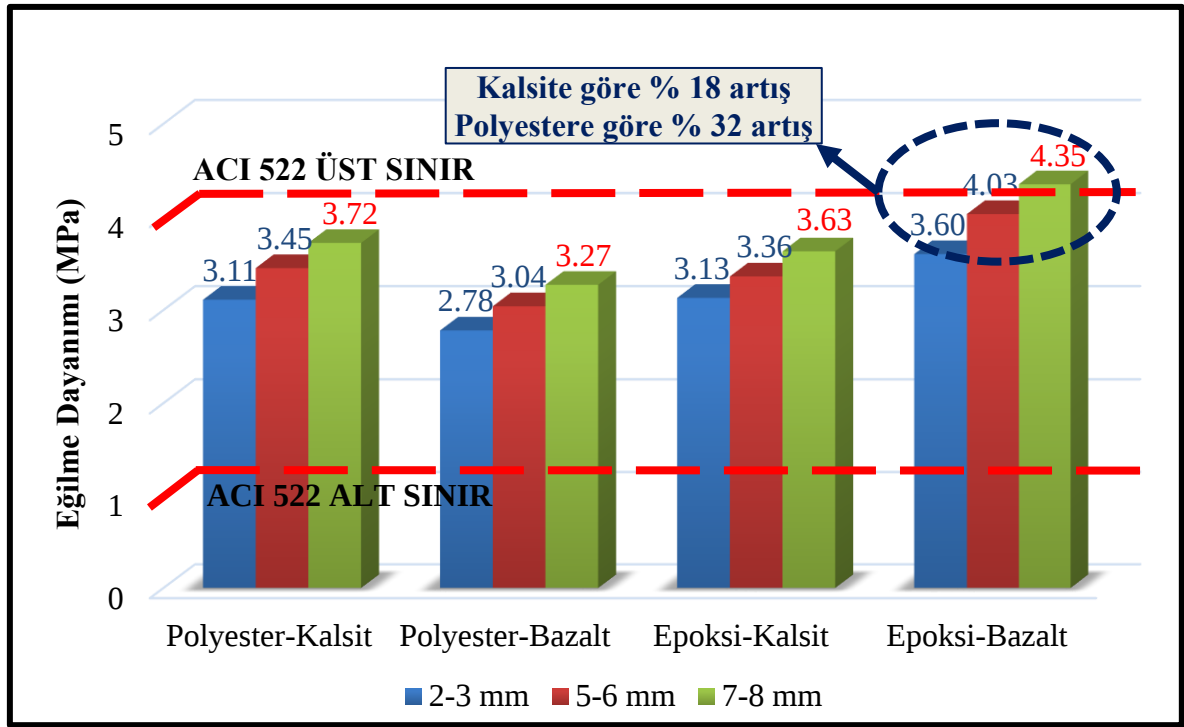
Şekil 4.4'te geçirimsizlik deneyi sonucunda elde edilen geçirimsizlik katsayıları verilmiştir. Şekil 4.4 incelendiğinde geçirimsizlik katsayılarının 8.35-11.53 mm/s aralığında değiştiği görülmüştür. Bu değerler çimentolu geçirimsiz betonlar için belirlenen 1 mm/s alt sınırın 10 katını geçebilmektedir. Epoksi ile üretilen PPC numunelerinin boşluk oranlarının, polyester ile üretilen numunelere göre daha yüksek olması, geçirimsizlik katsayılarında %10'a varan bir artışa neden olmuştur. Benzer şekilde, bazalt kökenli agregaların kullanıldığı PPC numunelerinde, kalsit kökenli agregalara göre %6.2'ye ulaşan oranlarda daha yüksek geçirimsizlik katsayıları elde edilmiştir. Bu artış, bazaltın daha geçirgen bir yapı oluşturmaya kaynaklanmaktadır. Agregada tane ϕ ının artmasıyla geçirimsizlik katsayısında %27.3 oranında bir artış tespit edilmiştir. Her ne kadar tane ϕ ının artması boşluk oranını azaltmış olsa da, daha büyük agregaların kullanımı, etkili boşluk miktarını ve bağlantılı boşlukların geçirimsizliğe katkısını artırmıştır. Buna karşın, tane ϕ ının küçülmesi durumunda, küçük ve çok sayıda boşluğun birbiriyle bağlantılı olmaması ve bağlantı yollarının uzaması, geçirimsizliği olumsuz yönde etkilemiştir. Bu bulgular, agregaların boyut ve türünün geçirimsiz beton tasarımındaki kritik rollerini açıkça ortaya koymaktadır.



Şekil 4.4. Geçirimli polimer betonun geçirimsizlik katsayıları

4.1.5. Eğilme dayanımı deney sonuçları

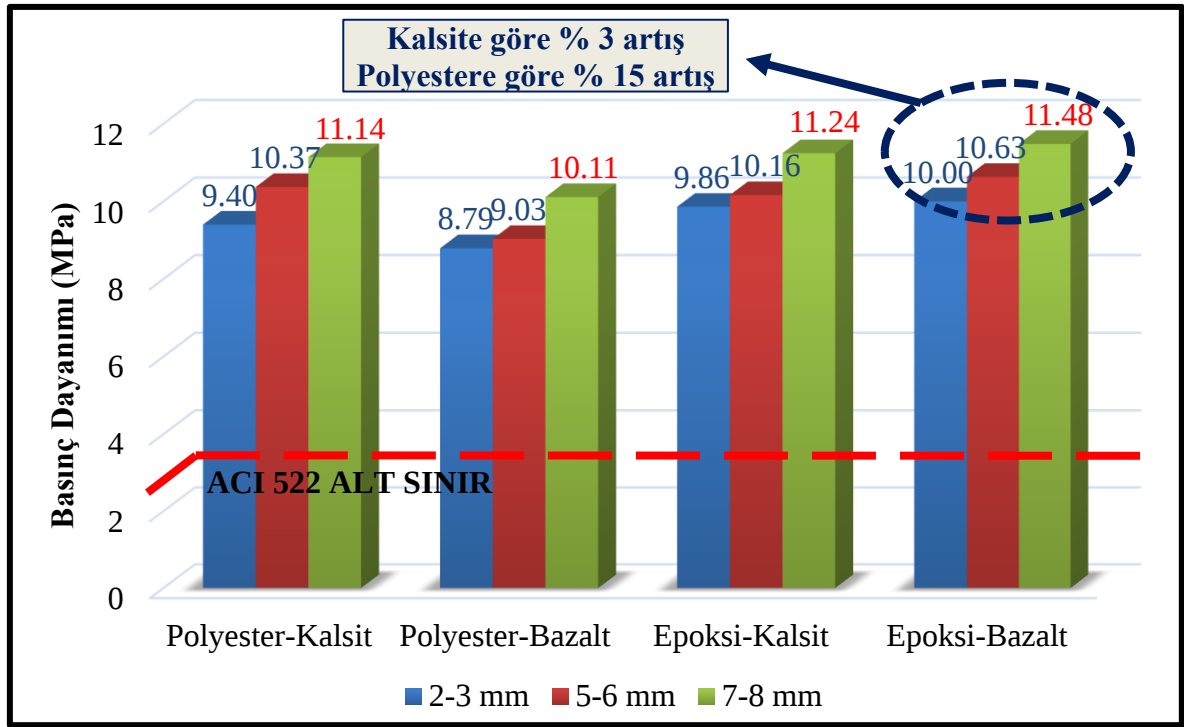
Şekil 4.5'te, reçine türü, agrega türü ve agrega boyutunun PPC numunelerinin eğilme dayanımı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Eğilme dayanımı değerleri, 2.78 MPa ile 4.35 MPa arasında değişmekte olup, bu değerler genellikle ACI 522'de belirtilen 1-4 MPa sınırları içinde yer almaktadır. Bununla birlikte, epoksi ve bazalt kombinasyonu ile elde edilen numunelerin, ACI 522 tarafından belirlenen üst sınırı aştığı görülmüştür. Bu durum, çimentolu geçirimsiz betonlara göre, daha yüksek eğilme dayanımına sahip, boşluk oranı daha yüksek ve daha hafif geçirimsiz beton tasarımlarının elde edilebileceğini göstermektedir. Epoksi reçinesinin agregalar arasında daha güçlü bağlar kurması, bu numunelerin polyester ile üretilen PPC numunelerine göre eğilme dayanımında %32'ye varan bir artış göstermesini sağlamıştır. Agrega tane çapındaki artış, boşluk oranını azaltarak agregaların eğilme dayanımına katkısını artırmıştır. Bu durum, özellikle 7-8 mm tane çapına sahip numunelerde, 2-3 mm tane çapına sahip numunelere göre % 20.1 oranında daha yüksek eğilme dayanımı elde edilmesiyle doğrulanmıştır. Sonuçlar, agrega türü ve agrega boyutunun yanı sıra kullanılan bağlayıcı türünün, geçirimsiz polimer beton numunelerinin mekanik performansı üzerindeki kritik etkilerini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.5. Geçirimli polimer betonun eğilme dayanımı

4.1.6. Basınç dayanımı deney sonuçları

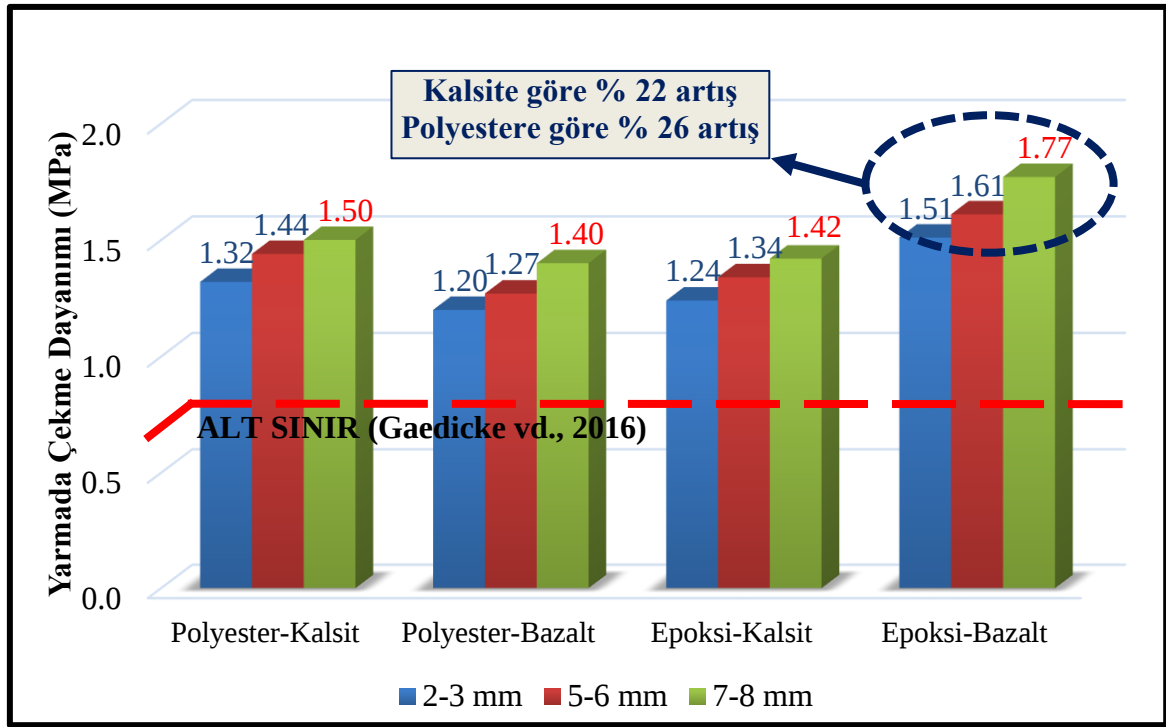
Şekil 4.6’da, PPC numunelerinin basınç dayanımı değerlerinin 6.98 MPa ile 11.14 MPa arasında değiştiği görülmektedir. Bu değerler, ACI 522 standardında belirtilen alt sınır olan 2.5 MPa’nın yaklaşık 4 katına ulaşan yüksek basınç dayanımına sahip PPC numunelerinin elde edildiğini göstermektedir. Epoksi ile üretilen PPC numunelerinin basınç dayanımlarının, polyester ile üretilen numunelere göre %15’e varan bir artış gösterdiği belirlenmiştir. Bu durum, epoksi reçinesinin agregalar arasında daha etkili bağlayıcılık sağlayarak betonun mekanik dayanımını artırması ile açıklanabilir. Bazalt içeren PPC numunelerinin basınç dayanımlarının, kalsit içeren numunelere göre %3’e ulaşan bir artış gösterdiği belirlenmiştir. PPC’lerin içerdiği yüksek oranda boşluk nedeniyle basınç dayanımlarının düşük olduğu bilinmektedir. Boşluk oranının artışı, geçirimsizlik açısından avantaj sağlarken, mekanik özellikler açısından istenmeyen bir durum oluşturmaktadır. Bu tezde, agrega tane çapının artmasıyla boşluk oranında azalma gözlemlenmiş ve bunun sonucunda basınç dayanımlarında %19’a varan bir artış elde edilmiştir. Daha büyük tane çapları, boşluk oranını azaltarak, basınç dayanımında olumlu bir etki yaratmıştır.



Şekil 4.6. Geçirimli polimer betonun basınç dayanımı

4.1.7. Yarmada çekme dayanımı deney sonuçları

Şekil 4.7’de, PPC numunelerinin yarmada çekme dayanımı değerlerinin bağlayıcı ve agrega türü ile tane çapına bağlı değişimi verilmiştir. Yarmada çekme dayanımı değerleri 1.20 MPa ile 1.77 MPa arasında değişmekte olup, bu değerler (Gaedicke vd.,2016) tarafından belirtilen alt sınırın üzerinde yer almaktadır. Bu sonuçlar, PPC’nin mekanik özelliklerinde bağlayıcı türünün en etkili faktör olduğunu göstermektedir. Epoksi ile üretilen PPC numunelerinin yarmada çekme dayanımları, polyester ile üretilenlere göre %26’ya varan bir artış göstermiştir. Epoksinin agregalar arasında güçlü bağlar oluşturması, mekanik performansı önemli ölçüde artırmıştır. Bazaltın sağlam yapısının, epoksi ile etkili bir bağlanma yüzeyi oluşturduğu ve bu kombinasyonun PPC’lerde kırılma dayanımını artırdığı görülmüştür. Ayrıca, daha büyük tane çaplarına sahip numunelerde boşluk oranının azalması, yarmada çekme dayanımında %17’ye varan bir artış sağlamıştır. Sonuçlar, epoksi-bazalt kombinasyonunun PPC’nin yarmada çekme dayanımı açısından optimum performans sunduğunu ve bu uyumun geçirimli beton tasarımlarında dikkate değer bir avantaj sağladığını ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, bağlayıcı türü ve agrega özelliklerinin PPC numunelerinin mekanik dayanımı üzerindeki belirgin etkilerini vurgulamaktadır.



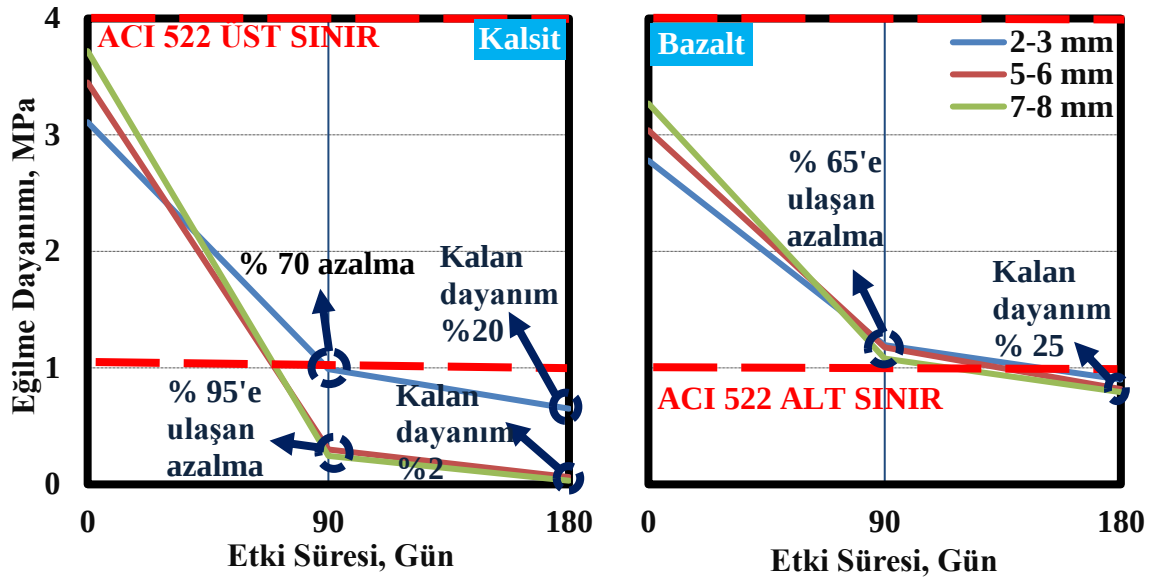
Şekil 4.7. Geçirimli polimer betonun yarmada çekme dayanımı

4.2 Dayanıklılık Deney Sonuçları

Standart kür koşullarında ve agresif ortam koşullarında bekletilen geçirimli polimer beton (PPC) numunelerine ait eğilme dayanımı, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, boşluk oranı ve geçirimlilik katsayısı sonuçları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Bu incelemeler doğrultusunda, reçine türü, agrega türü ve agrega tane çapının PPC numunelerinin mekanik ve fiziksel özellikleri üzerindeki etkileri ortaya konmuştur.

4.2.1. Asit dayanıklılığı deney sonuçları

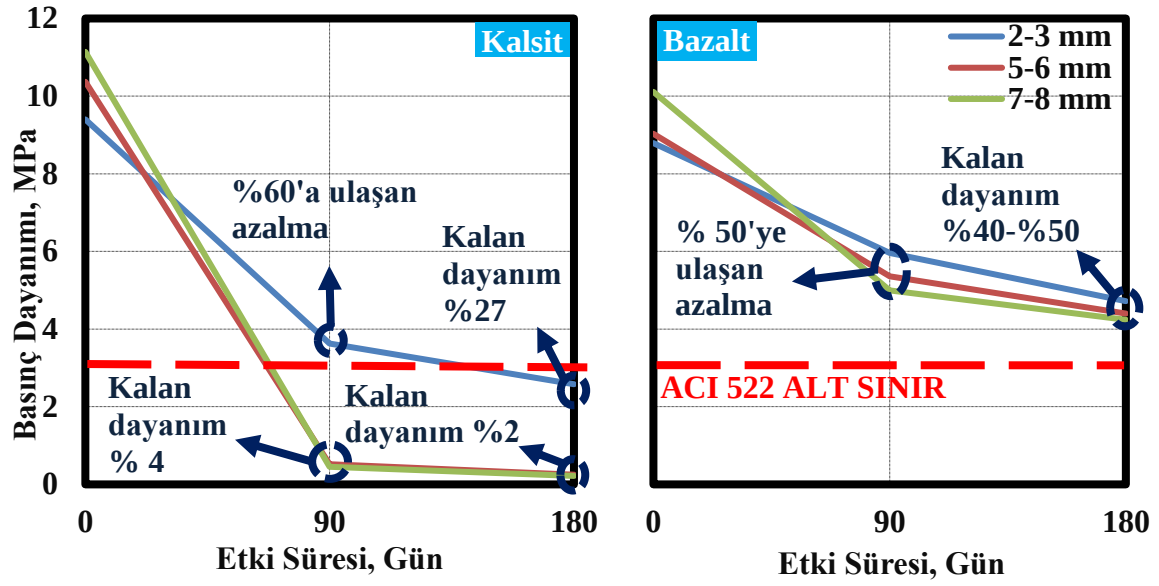
Şekil 4.8'de, asit etkisi altında polyester bağlayıcılı PPC'lerin eğilme dayanımı deney sonuçları detaylı şekilde incelenmiştir. Bu sonuçlara göre, asit ortamında agrega türü ve bağlayıcı ara yüzey etkileşimleri, eğilme dayanımında oluşan kayıplar üzerinde belirleyici bir role sahiptir. Bazalt agrega kullanılan PPC'lerde, asit etkisi altında %75'lere varan eğilme dayanım kayıpları gözlemlenmiştir. Bu kayıplar, özellikle ilk günlerde hızlı bir şekilde gerçekleşmiş, ancak 90. gün sonrasında dayanımdaki azalma hızı yavaşlamıştır.



Şekil 4.8. Asit etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin eğilme dayanımı değerleri

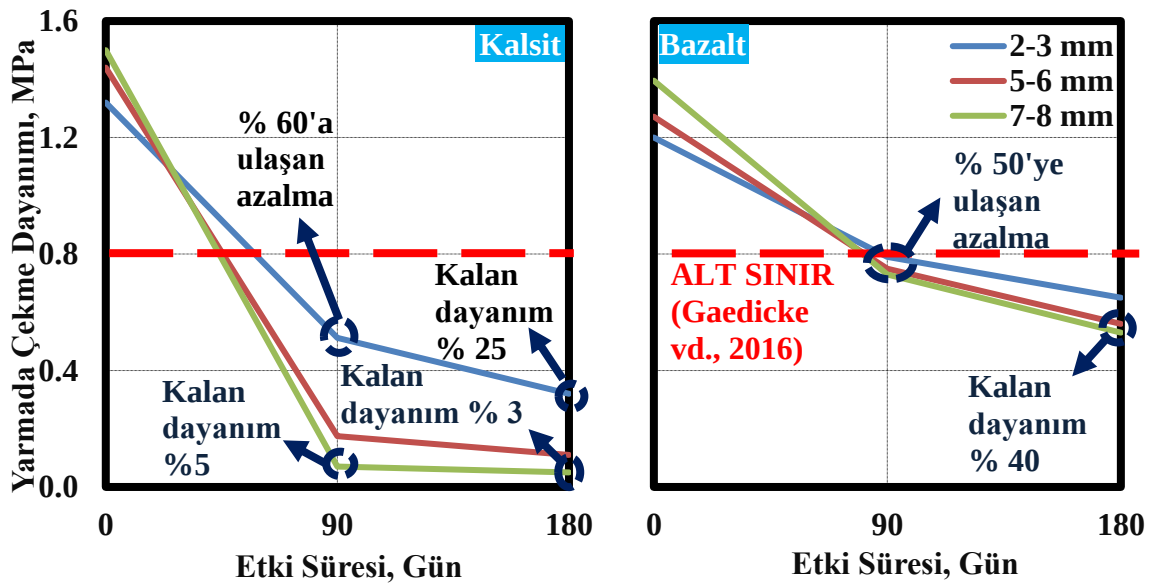
Asit etkisi altında eğilme dayanım kaybının temel nedenleri arasında polimer bağlayıcının kimyasal yapısının asit ile kısmen zarar görmesi ve özellikle reçine ile agrega arasındaki aderansın olumsuz etkilenmesi yer almaktadır. Polyester ile sertleştirici olarak kullanılan kobalt oktoatın, HCl asidi ile iyonik reaksiyona girerek polimer zincir yapısında bozunmaya neden olmaktadır. Bu kimyasal etkileşim, reçinenin agregaları bir arada tutma kabiliyetini önemli ölçüde azaltmaktadır. Kalsit agrega kullanılan PPC'lerde ise eğilme dayanım kayıplarının %90'ları aşan oranlarda olduğu belirlenmiştir. Asit etkisine bağlı olarak gözlemlenen bu farklılık, reçinenin bazalt ve kalsit gibi farklı yüzey özelliklerine sahip agregalara bağlanma mekanizmalarından kaynaklanmaktadır. Bu bulgular, PPC tasarımında reçine-agrega etkileşimleri ve asit direnci açısından dikkatli bir değerlendirme yapılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Şekil 4.9'da, asit etkisi altındaki polyester bağlayıcılı PPC'lerin basınç dayanımları verilmiştir. Şekil 4.9 incelendiğinde bazalt agregalı PPC'lerde asit etkisinde kalma süresi arttıkça basınç dayanımlarında %60'a ulaşan kayıplar görülmüştür. Buna rağmen 180 günün sonunda elde edilen artık dayanımın ACI 522'de belirtilen sınır değerinin üzerinde olduğu görülmüştür. 5-6 mm ve 7-8 mm tane çaplı kalsit agregası kullanıldığında, 90. gün itibarıyla basınç dayanımının neredeyse tamamen kaybolduğu belirlenmiştir.



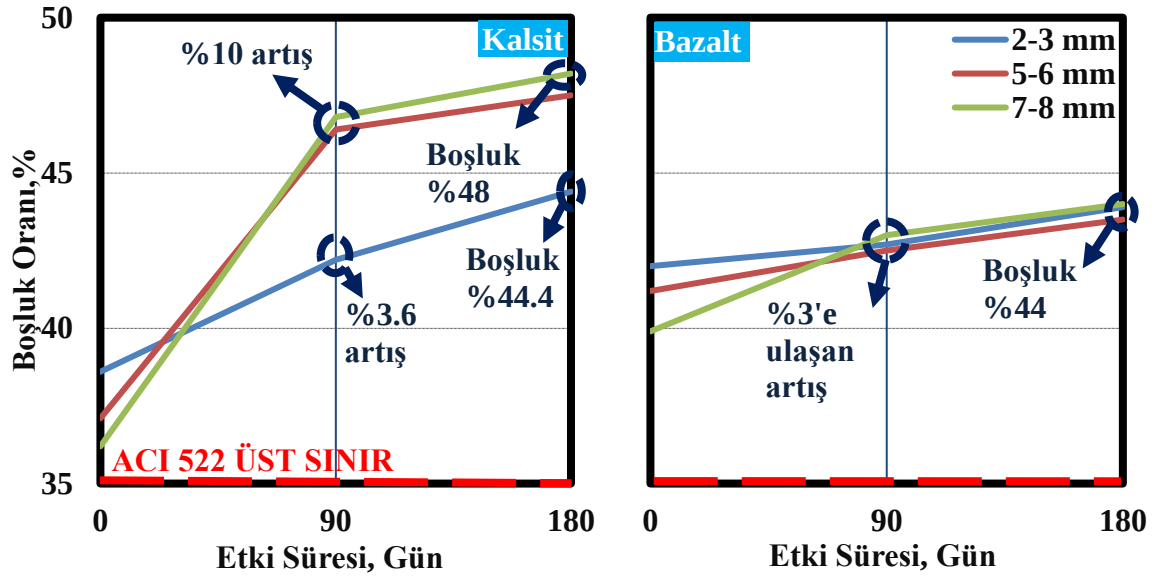
Şekil 4.9. Asit etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin basınç dayanımı değerleri

Basınç dayanımının, numunelerin boşluk içeriği ile doğrudan ilişkili olduğu göz önüne alındığında, daha küçük tane boyutuna sahip numunelerde boşluk oranının artması nedeniyle iri tanelere göre daha düşük dayanım değerleri beklenmektedir. Asit etkisinde kalmamış kontrol numunelerinin sonuçları da bu durumu doğrulamaktadır ancak, PPC numunelerinde asitin yıpratıcı etkisinin, malzemenin hidrolik iletkenliğinin artmasıyla birlikte arttığı görülmüştür. Tane çapının artışı, hidrolik iletkenliği artırdığı için, büyük çaplı agrega içeren numunelerde daha düşük basınç dayanımı elde edilmiştir.



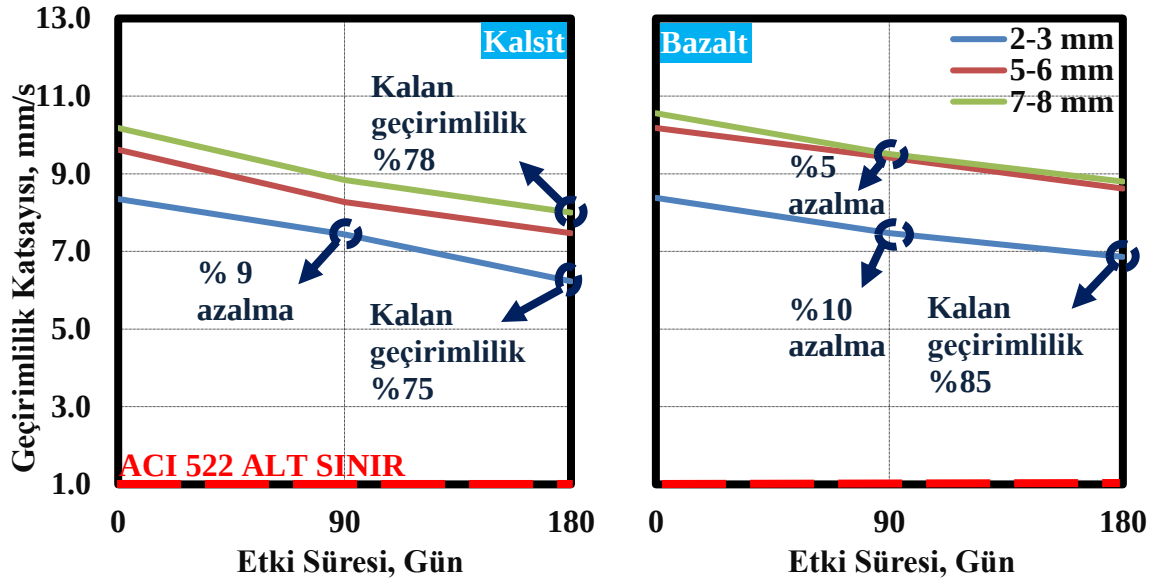
Şekil 4.10. Asit etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin y. çekme dayanımı değerleri

Şekil 4.10’da asit atağında kalan polyester bağlayıcı PPC’lerin yarmada çekme dayanımları sunulmaktadır. Şekil 4.10’un incelenmesi sonucunda, bazalt agregalı PPC örneklerinde yarmada çekme dayanımlarının asit etkisiyle %60’a varan oranlarda azaldığı gözlemlenmiştir. Bu azalma oranının, agrega tane çapı arttıkça yükseldiği belirlenmiştir. Basınç dayanımı sonuçlarına benzer şekilde, kalsit agregalı PPC numunelerde yarmada çekme dayanımları, asit etkisi altında 90 gün sonunda, özellikle 7-8 mm tane çapına sahip numunelerde neredeyse tamamen kaybolmuştur. Yarmada çekme dayanımını belirlemek için uygulanan çizgisel yük etkisi altında, iri agrega tanelerini birbirine bağlayan ince reçine tabakasının kolayca sıyrılması, dayanımda önemli bir düşüşe yol açmıştır.



Şekil 4.11. Asit etkisinde polyester bağlayıcı numunelerin boşluk oranı değerleri

Asit etkisinde kalan PPC’lerin boşluk oranı değişimleri Şekil 4.11’de verilmiştir. Şekil 4.11 incelendiğinde asit etkisi ile boşluk oranları bazalt agregası içeren PPC numunelerinde % 3, kalsit agregası içeren numunelerde ise % 10’a ulaşan oranda artmıştır. Asit etkisi altında agregalarda belirgin bir bozunma gözlemlenmezken, polimer esaslı betonların asit etkisinde kalması, bağlayıcı malzemede kimyasal bağların zayıflamasına ve yüzeyde soyulmalara yol açmaktadır. Bu soyulmalar, numunelerdeki bağlantılı boşluk yapılarını etkileyerek boşluk oranında değişimlere neden olmuştur. Soyulan reçinenin, boşlukların bir kısmını kısmen doldurduğu ve bu durumun, boşluk oranındaki artış eğilimini sınırlandırdığı belirlenmiştir. Bu durum, özellikle bazalt agregalı PPC numunelerinde gözlemlenmiş olup, daha küçük oranlardaki boşluk artışını açıklamaktadır.

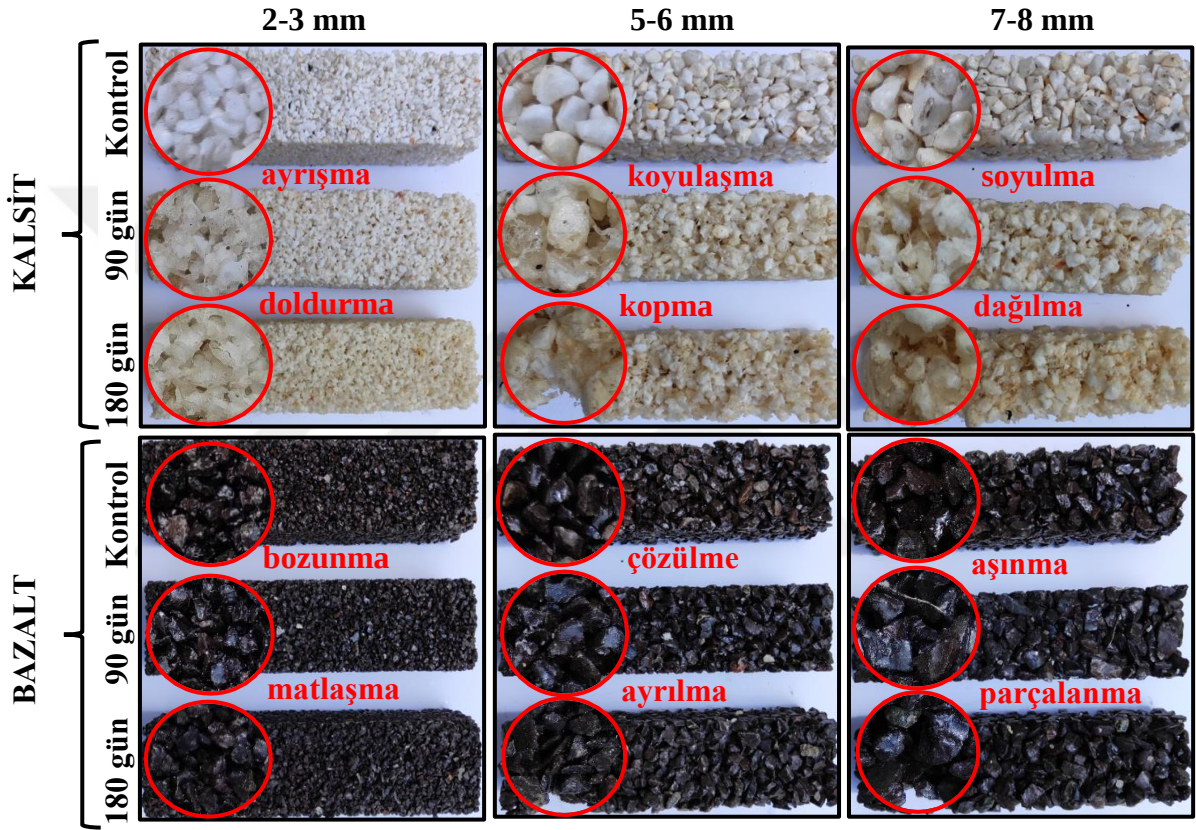


Şekil 4.12. Asit etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin geçirimsizlik değerleri

Kalsit agregası içeren PPC numunelerinde daha yüksek oranlı boşluk artışı, asit etkisinin bu tür agrega-reçine ara yüzeylerinde daha yoğun bir kimyasal etkileşime yol açtığını göstermektedir. Boşluk oranındaki değişimlerin hem agreganın mineralojik özellikleri hem de reçine bağlayıcısının kimyasal dayanıklılığıyla doğrudan ilişkili olduğu söylenebilir. Bu durum, asidik ortamların PPC malzemesi üzerindeki mikro yapısal etkilerini anlamak için önemli bir bulgu sunmaktadır.

Asit atağında polyester bağlayıcılı PPC'lerin geçirimsizlik katsayısı değişimleri Şekil 4.12'de verilmiştir. Şekil 4.12 incelendiğinde asit etkisi ile geçirimsizlik katsayısının % 25'e ulaşan oranda azaldığı görülmüştür. En büyük geçirimsizlik katsayısı 10.56 mm/s ile 7-8 mm boyutlarında bazalt agregası içeren kontrol numunelerinde görülürken, en küçük geçirimsizlik değeri 6.23 mm/s ile 2-3 mm boyutlarında kalsit agregası içeren 180 gün asit etkisinde kalmış PPC numunelerinde elde edilmiştir. Geçirimsizlik katsayısının değişiminde kullanılan agrega türünün belirleyici bir etkisi olduğu görülmüştür. Özellikle, asit atağından en fazla etkilenen numunelerin kalsit agregası içeren PPC numuneleri olduğu belirlenmiştir. Bazalt agregalı numunelerde, asit etkisinde kalma süresi arttıkça geçirimsizlik katsayısında orantılı bir azalma oluşmuştur. Ancak, kalsit agregalı numunelerde, geçirimsizlik katsayısındaki azalmanın %15'lik kısmının ilk 90 gün içerisinde gerçekleştiği belirlenmiştir.

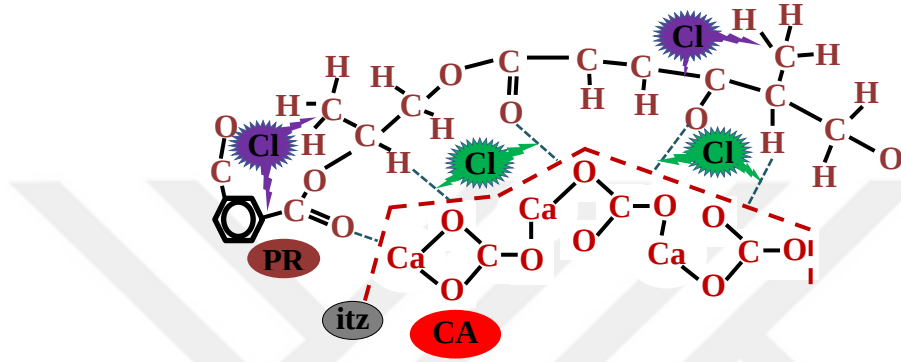
Asit etkisiyle oluşan mikro yapısal değişiklikler, geçirimsizlik katsayısındaki azalmaları açıklamaktadır. Polimer bağlayıcı içeren geçirgen betonlarda asidik ortamlar, reçine tabakasının yüzeysel soyulmalarına ve bozunmalarına yol açmıştır. Bu durum özellikle küçük boşluklar içeren ince taneli PPC numunelerinde daha belirgindir, çünkü asit etkisiyle ortaya çıkan soyulma ve bozunmalar, hidrolik iletkenliği artıran bağlantılı boşlukların tıkanmasına yol açarak geçirimsizliği düşürmektedir.



Şekil 4.13. Asit etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin değişimleri

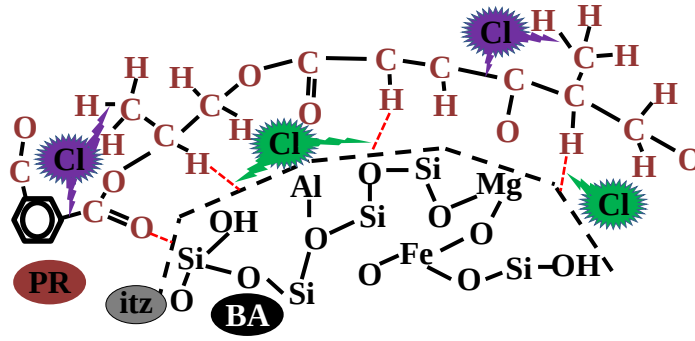
Şekil 4.13'te asit etkisinde kalan polyester bağlayıcılı PPC'lerin yüzeylerinde oluşan değişimler gösterilmiştir. Şekil 4.13 incelendiğinde kalsit agregası içeren numunelerde asit etkisiyle renk değişimi ve yüzey koyulaşması gözlemlenmiştir. Bu koyulaşmanın, özellikle 180 günlük asit etki süresinin sonunda daha belirgin hale geldiği tespit edilmiştir. Ayrıca, kalsit agregası içeren numunelerde ayırışma, soyulma ve dağılma gibi yüzey hasarları nedeniyle boşluk yapısında önemli değişiklikler oluşmuştur. Bazalt agregası içeren numunelerde ise asit etkisinde numune bütünlüğünün kalsit içeren numunelere göre daha iyi sağlandığı belirlenmiştir.

Bazalt agregalarında renk değişimi, koyulaşma yerine yüzeyde matlaşma şeklinde ortaya çıkmıştır. Ancak, bazalt içeren PPC numunelerinde de kalsit numunelerine benzer şekilde ayrışma ve çözülme belirtileri gözlemlenmiştir. Kalsit ve bazalt agregalarının asit etkisi altındaki davranışlarının farklılık göstermesi, PPC'nin uzun süreli dayanıklılığını belirleyen temel faktörlerden biridir. Bu durum, özellikle malzemenin yüzey bütünlüğü ve görsel özellikleri açısından dikkate alınması gereken önemli bir bulgudur.



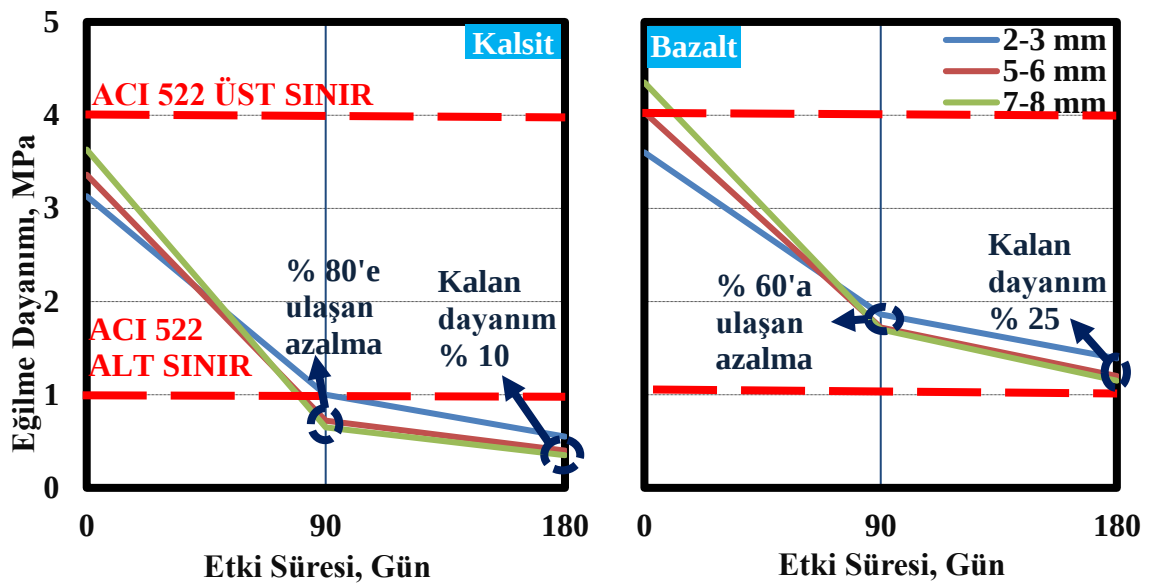
Şekil 4.14. Asit atağının polyester-kalsit bağları ile etkileşimi

Şekil 4.14 ve Şekil 4.15, asit atağının kalsit ve bazalt kökenli agregalar içeren PPC numuneleri üzerindeki etkilerini şematik olarak sunmaktadır. Kalsit agregası içeren PPC numunelerinde, asit etkisi ile reçine bağ yapısında bozunmalar oluşmuş ve agrega-reçine ara yüzey bağlarının dayanımı önemli ölçüde azalmıştır. Özellikle asidik ortamda bulunan klor iyonlarının, reçinenin kimyasal yapısına zarar vermesi sonucu, bağ yapılarının zayıfladığı ve bunun sonucunda soyulma ile ayrışma süreçlerinin hızlandığı görülmüştür. Bazalt agregası içeren PPC numunelerinde ise benzer etkiler gözlenmekle birlikte, malzeme dayanımı ve yüzey bütünlüğünün kalsit agregalı numunelere göre daha iyi korunduğu belirlenmiştir. Bazalt agregasının mineral yapısının kimyasal olarak daha stabil olması, klor iyonlarının ara yüzey bağlarına olan olumsuz etkisinin sınırlandırılmasına yardımcı olmuştur. Ancak, asidik ortamın uzun süreli etkisi, bazalt agregası içeren numunelerde dahi zamanla soyulma ve ayrışma süreçlerinin başlamasına neden olmuştur. Her iki durumda da ara yüzey bağlarının zayıflaması, reçinenin kimyasal dayanımının asidik ortamların etkisiyle yetersiz kaldığını göstermektedir. Ara yüzeylerdeki bu değişimler, numunelerin genel mikro yapısında kayıplara yol açarak dayanımın azalmasına ve malzeme performansının düşmesine neden olmaktadır.



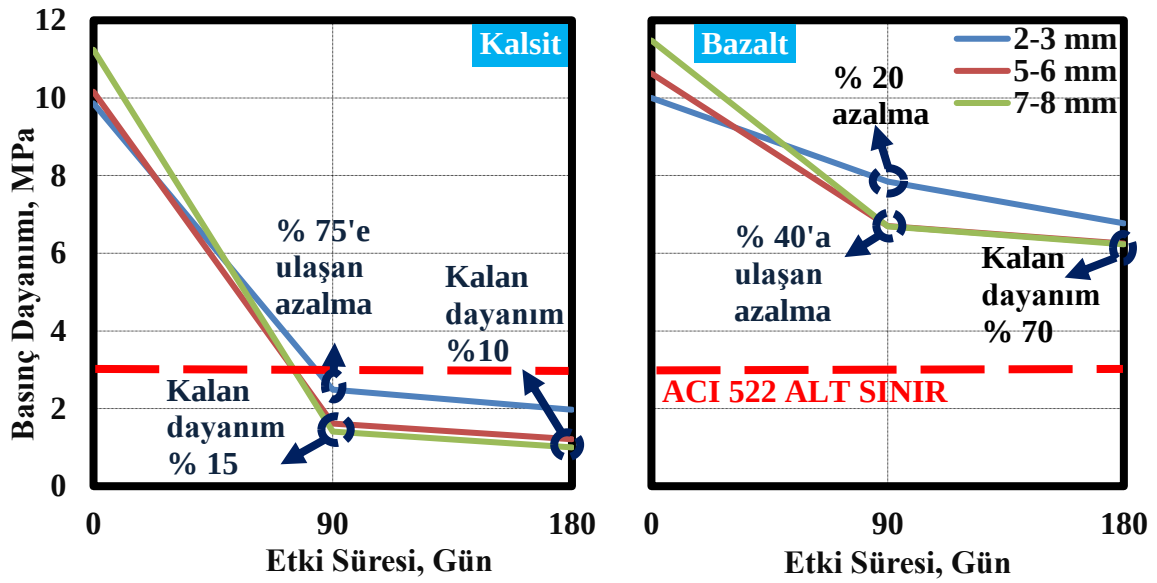
Şekil 4.15. Asit atağının polyester-bazalt bağları ile etkileşimi

Şekil 4.16’da epoksi bağlayıcılı PPC numunelerin asit etkisi sonucunda kalan eğilme dayanımları verilmiştir. Şekil 4.16 incelendiğinde bazalt agregası içeren numunelerde, asit etkisinde kalma süresi arttıkça eğilme dayanımında belirgin bir azalma görülmekle birlikte, dayanım değerlerinin ACI 522 tarafından belirtilen sınır değerler içinde kaldığı belirlenmiştir. Bu durum, bazalt agregasının kimyasal dayanıklılığının ve epoksi bağlayıcının bağ yapısının, asidik ortamın olumsuz etkilerini bir dereceye kadar tolere edebildiğini göstermektedir. Kalsit kökenli agregası kullanılan numunelerde ise asit etkisinin daha belirgin olduğu gözlemlenmiştir. 180 gün boyunca asidik ortamda kalan ve 7-8 mm boyutlarındaki kalsit agregası kullanılan numunelerde en düşük eğilme dayanımı 0.35 MPa olarak ölçülmüştür. Buna karşılık, kontrol numunelerinde, aynı agregası boyutlarında en yüksek eğilme dayanımı değeri 3.63 MPa olarak kaydedilmiştir.



Şekil 4.16. Asit etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin eğilme dayanımı değerleri

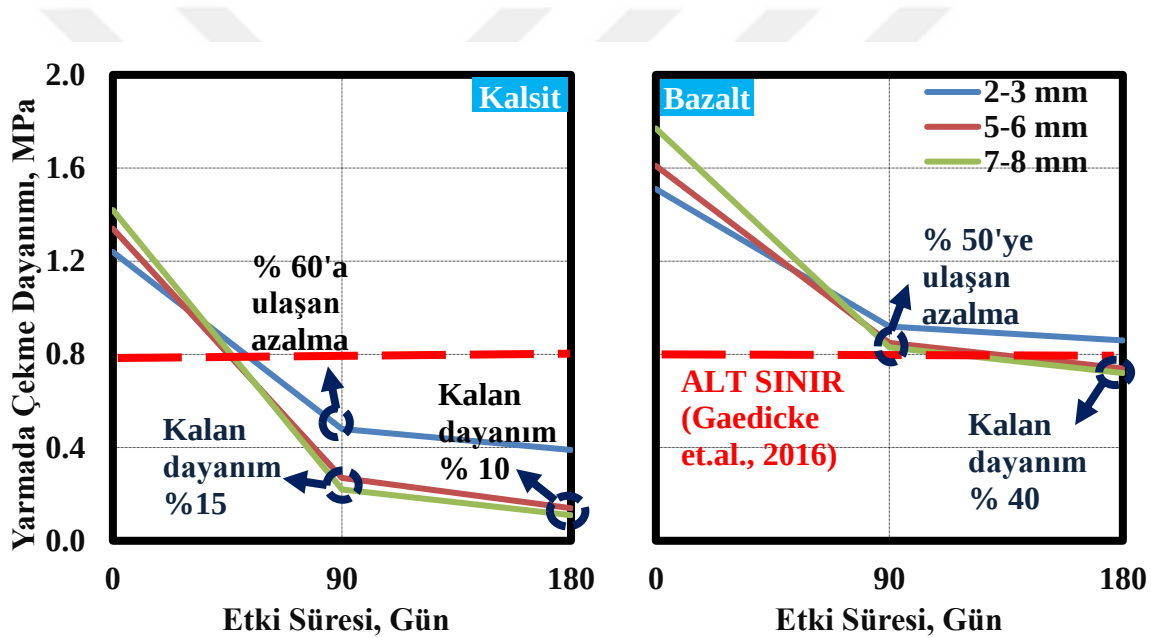
Asidik ortamda HCl gibi kuvvetli asitlerin, polimer zincir bağlarını zayıflattığı ve agregalarla bağlayıcı arasındaki ara yüzeyde (ITZ) farklı etkilere neden olduğu anlaşılmaktadır. Epoksi bağlayıcının asidik ortamlara karşı kısmen dirençli olmasına karşın, bu direnç, kullanılan agrega türüne ve boyutlarına bağlı olarak değişim göstermektedir. Bazalt agregası içeren numunelerde, ITZ bölgesindeki bağların daha güçlü olduğu ve asidik ortamın etkilerine daha az duyarlı olduğu düşünülmektedir. Buna karşılık, kalsit agregası içeren numunelerde, ITZ bölgesinde bağların daha zayıf olduğu ve asidin çözünme mekanizmaları yoluyla bu bölgede hızlı bir bozunma oluşturduğu sonucuna varılabilir.



Şekil 4.17. Asit etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin basınç dayanımı değerleri

Şekil 4.17’de kontrol numunelerinin ve asit etkisinde kalmış numunelerin basınç dayanımları verilmiştir. Şekil 4.17 incelendiğinde bazalt kökenli agregalarla üretilmiş PPC numunelerinin asit etkisi sonrası kalan basınç dayanımları, kalsit kökenli agregalarla üretilen numunelerden 5 kata kadar daha yüksek olmuştur. Bazalt kökenli agregalar kullanılan PPC numunelerinde, 180 gün süren asit etkisi sonunda dahi, kalan basınç dayanım değerlerinin ACI 522 standardında belirtilen basınç dayanımı alt sınırının üzerinde olduğu belirlenmiştir. Ancak, bu numunelerde asit etkisine bağlı dayanım kayıplarının zamanla % 30’a ulaştığı gözlemlenmiştir. Buna karşın, kalsit kökenli agregalarla üretilen PPC numunelerinde dayanım kayıpları % 90’a kadar çıkmış ve asit etkisi altında bu numunelerin büyük ölçüde mekanik performanslarını yitirdiği görülmüştür.

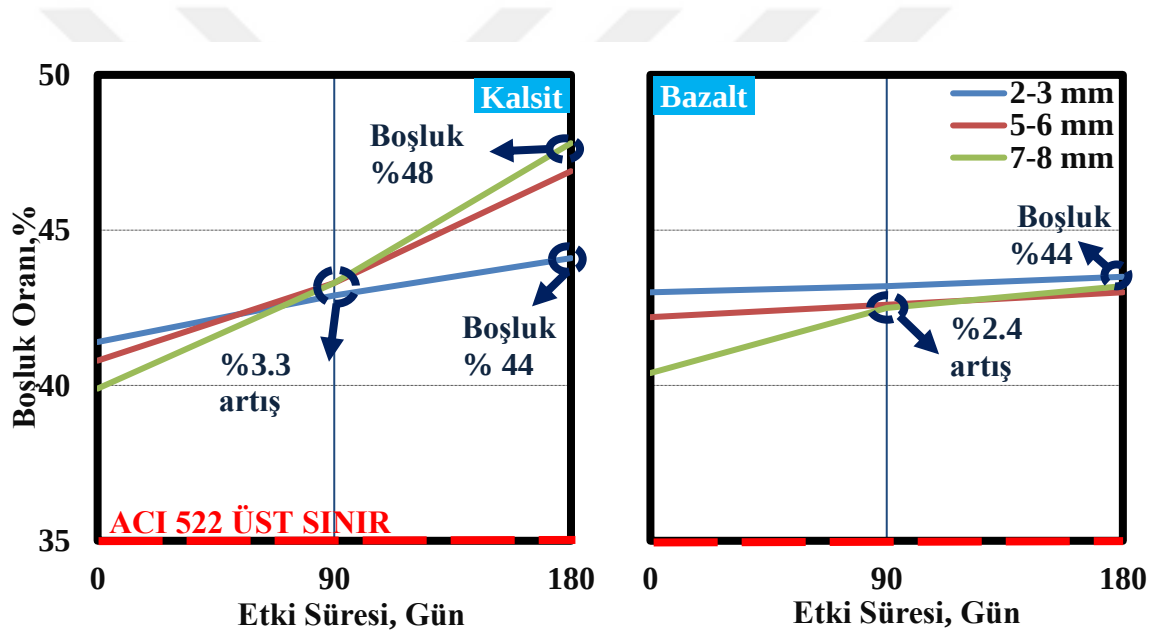
Tane çapının artması, her iki tür agrega için de dayanım kayıplarını artıran bir etken olmuştur. Büyük çaplı agregaların kullanıldığı PPC'lerde, asit etkisiyle oluşan dayanım kaybı oranının % 10'a kadar arttığı tespit edilmiştir. PPC numunelerinde basınç dayanımını belirleyen en önemli faktörlerden biri, agregalarla bağlayıcı arasındaki arayüzey bağlarının kalitesidir. Kalsit ile epoksi bağlayıcı arasındaki arayüzey bölgesi, kalsiyum esaslı bağların asit etkisine karşı hassas olduğu için hızla bozunmuştur. Bu durum, agregaların rijit bir şekilde tutunamamasına ve mikro yapının zayıflamasına yol açmıştır. Kalsit-epoksi arayüzey bağlarının asit etkisiyle çözünmesi, boşluk oranının artmasına ve dayanım kaybına neden olmuştur. Buna karşın, bazalt ile epoksi bağlayıcı arasındaki bağlar, kimyasal ve fiziksel dayanıklılıkları sayesinde numunelerin dayanımını büyük ölçüde korumuştur.



Şekil 4.18. Asit etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin y. çekme dayanımı değerleri

Şekil. 4.18'de asit atağında PPC numunelerinin yarmada çekme dayanım sonuçları verilmiştir. Elde edilen sonuçlar, yarmada çekme dayanımının basınç dayanımı ile benzer bir davranış sergilediğini ortaya koymaktadır. 180 günlük asit atağı sonrasında, bazalt agregası içeren PPC numunelerinde yarmada çekme dayanımının % 60 oranında, kalsit agregası içeren PPC numunelerinde yarmada çekme dayanımında % 90'a varan bir azalma görülmüştür. Bu bulgular, bazalt agregasının kimyasal ve fiziksel dayanıklılığının kalsit agregasına göre asidik ortamlarda daha üstün olduğunu göstermektedir. Bazalt kökenli agrega içeren PPC numunelerinde, farklı agrega tane çaplarının asit etkisi altındaki yarmada çekme dayanım sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu gözlenmiştir.

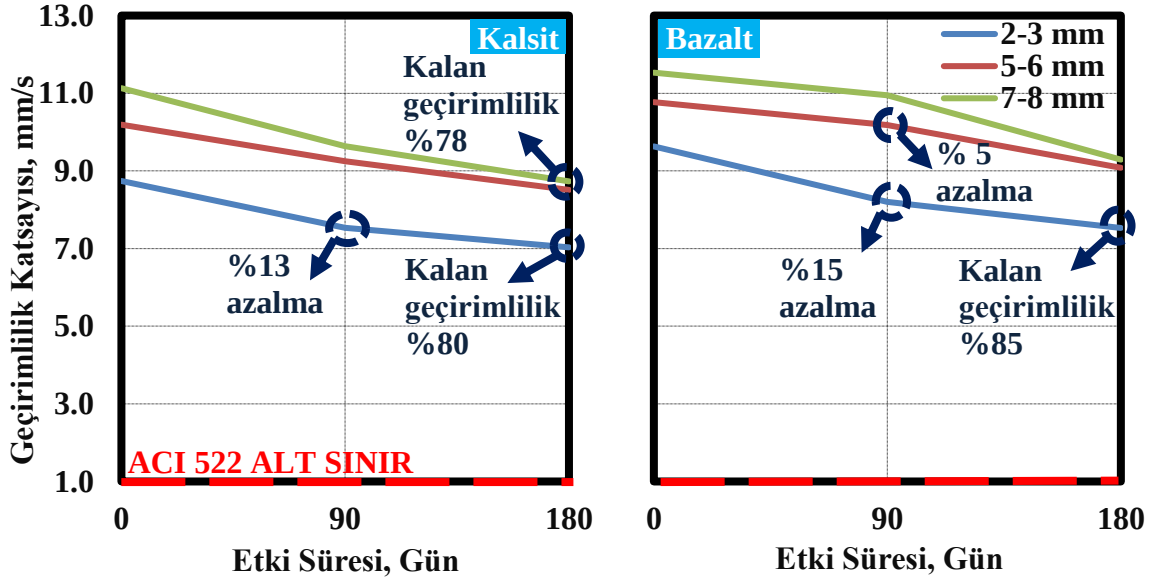
Kalsit kökenli agregalarla üretilen PPC numunelerinde tane çapı arttıkça yarmada çekme dayanım değerlerinin belirgin bir azalma görülmektedir. Bu durum, iri taneli agregaların bağlayıcı ile daha az temas yüzeyi oluşturması ve bağlayıcı-agrega arayüzey bölgesinin asit etkisine karşı daha savunmasız kalmasıyla ilişkilendirilebilir. Ayrıca, daha küçük tane boyutlarına sahip kalsit içeren PPC numunelerinde, aynı hacimde daha fazla agregata tanesinin birbirine tutunması ve bu agregaların daha homojen bir yük dağılımı sağlaması, yarmada çekme dayanımında kısmen daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır. Küçük tane boyutlarının bağlayıcı ile daha fazla temas alanı oluşturduğu ve uygulanan çizgisel yük etkisi altında şekil değiştirme davranışını kısıtladığı düşünülmektedir.



Şekil 4.19. Asit etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin boşluk oranı değerleri

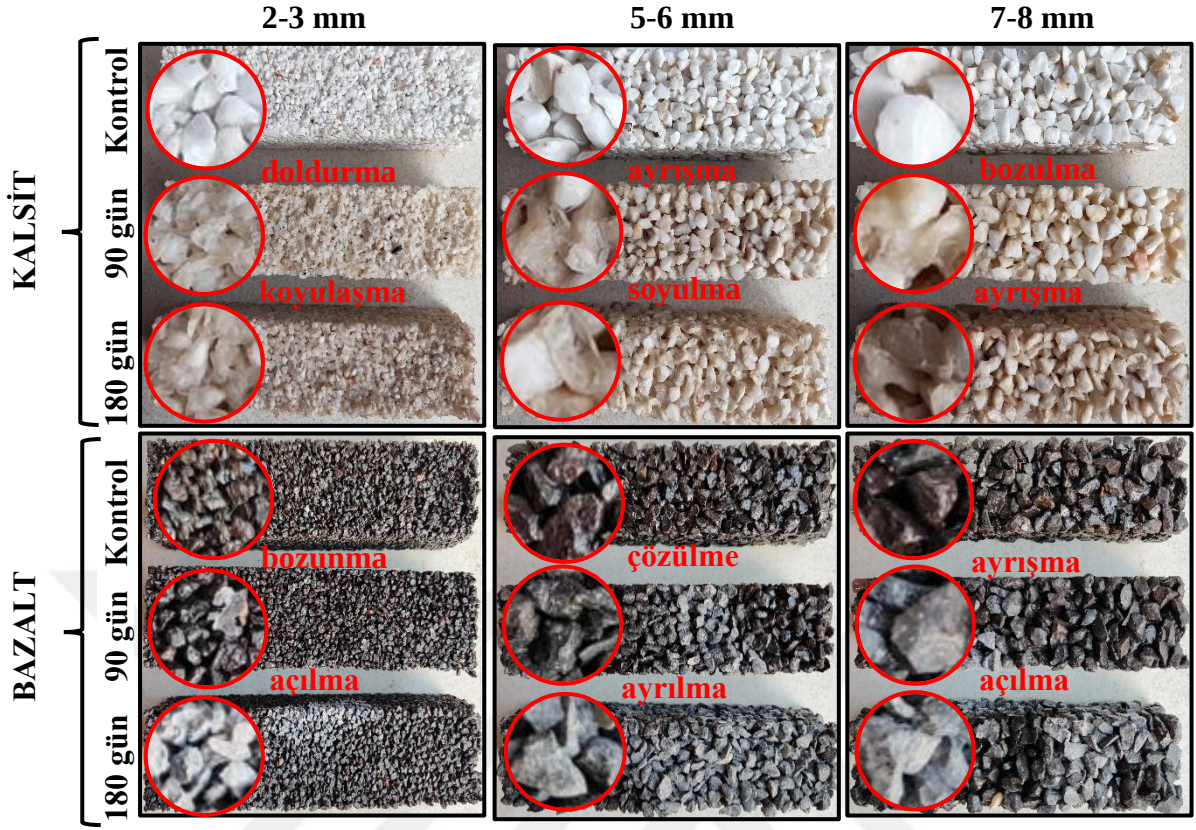
Şekil 4.19, asit etkisinde kalan epoksi bağlayıcılı PPC numunelerinin boşluk oranı değişimlerini göstermektedir. Sonuçlara göre, asit etkisi altında bazalt agregası içeren PPC numunelerinin boşluk oranlarında %2.4, kalsit agregası içeren numunelerde ise %3.3'e varan bir artış gözlemlenmiştir. Asit ortamında kalan PPC numunelerinin kimyasal bağlarında zayıflama ve yüzeyde soyulmalar oluşmuştur. Bu soyulmalar, bağlantılı boşluk yapılarında değişikliklere yol açmış ve boşluk oranlarında artış eğilimi ortaya çıkmıştır. Boşluk oranındaki değişimlerin hem reçinenin kimyasal direnci hem de agregata türüne bağlı olarak farklılık gösterdiği belirlenmiştir.

Kalsit ile üretilen numunelerde, asidik ortamda daha yüksek oranda boşluk artışı gözlenmesi, bu tür malzemelerin agresif kimyasal koşullar altındaki dayanıklılığına dair önemli bir bulgu sağlamaktadır. PPC'lerin kullanım performansını artırmak için bağlayıcı malzeme seçimi ve agrega türünün değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.



Şekil 4.20. Asit etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin geçirimsizlik değerleri

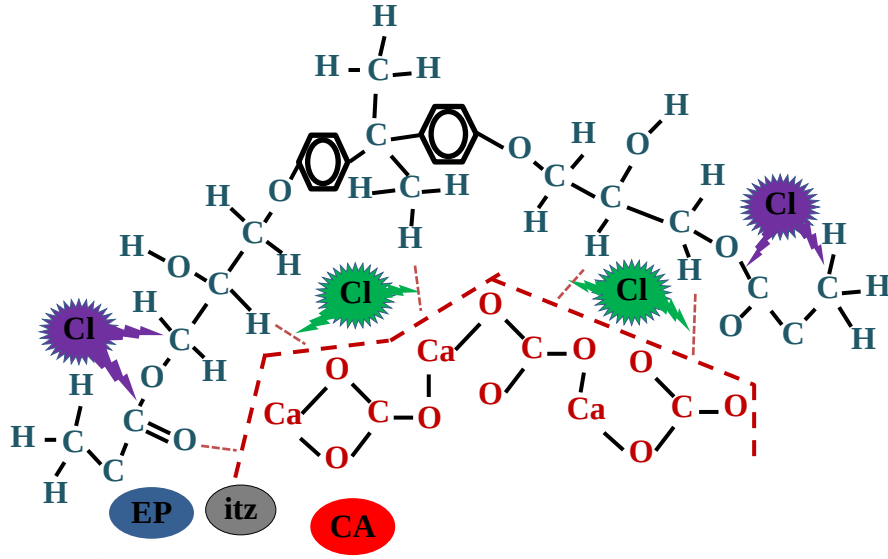
Şekil 4.20’de asit atağında PPC’lerin geçirimsizlik katsayısı değerleri verilmiştir. Şekil 4.20 incelendiğinde uzun süreli asit etkisine rağmen ACI 522’de belirtilen en az 1 mm/s geçirimsizlik değerinin yedi katı ve daha fazla oranda geçirimsizliğin elde edildiği belirlenmiştir. Asit etki süresi ile geçirimsizlik değerlerinde bazalt içeren numunelerde % 15’e, kalsit içeren numunelerde % 22’ye ulaşan oranda azalma görülmüştür. Bu düşüş, asidik ortamların epoksi bağlayıcılı PPC’lerde neden olduğu kısmi soyulmaların ve agregaların bağlayıcı malzeme ile olan etkileşiminde oluşan değişimlerin bir sonucu olarak açıklanabilir. Özellikle, asidin bağlayıcı ve agrega-reçine arayüzeyindeki bağlantılı boşluk düzenini etkileyerek boşluklarda tıkanmalara yol açtığı görülmüştür. Bu durum, boşluk yapısındaki değişimlerin geçirimsizliği azaltıcı bir etkide bulunmasına neden olmuştur. Bazalt içeren PPC’lerin geçirimsizlik katsayısındaki azalma kalsit içeren numunelere göre daha düşük seviyelerde olması, bazaltın kimyasal dayanıklılık açısından daha kararlı bir davranış sergilediğini göstermektedir. Buna karşılık, kalsit içeren numunelerde, asidik ortamın bağlayıcı malzeme ve agrega arasındaki geçiş bölgesinde daha yoğun bir bozunmaya yol açması, geçirimsizlik değerlerindeki daha belirgin azalmayı açıklamaktadır.



Şekil 4.21. Asit etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin değişimleri

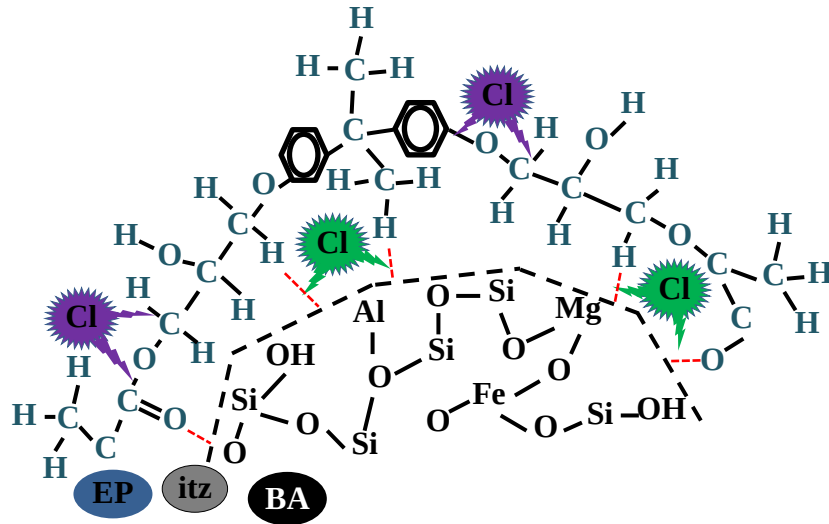
Şekil 4.21, asit etkisinde kalan epoksi bağlayıcılı PPC numunelerinin yüzeylerinde oluşan değişimleri göstermektedir. Kalsit agregası içeren numunelerde asit etkisinin, yüzeyde belirgin renk değişimlerine yol açtığı ve bu değişimlerin 180 gün boyunca devam eden etki süresince koyulaşma şeklinde daha da arttığı gözlenmiştir. Bunun yanı sıra, kalsit agregalı numunelerde ayrışma, soyulma ve dağılma gibi fiziksel bozunmaların olduğu ve bu durumun boşluk yapısında önemli değişikliklere neden olduğu gözlenmiştir. Bazalt agregası içeren numunelerde ise bozunma ve renkte açılmalar gözlenmiştir. Bu bulgular, kalsit ve bazalt agregalarının kimyasal direnç farklılıklarını açıkça ortaya koymaktadır.

Şekil 4.22'de kalsit agregası ve epoksi reçinesi arasındaki bağ yapısı yer alırken, Şekil 4.23'te bazalt agregası ile epoksi reçinesi arasındaki arayüzey bağ yapısı incelenmiştir. Asit atağında, klor iyonlarının epoksi reçinesinin kimyasal bağ yapısını zayıflattığı ve epoksi-agrega arayüzey bağlarında tahribata yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu süreç, agregayla bağlayıcı arasındaki geçiş bölgesinde bağların zayıflamasına ve kopmasına neden olmuş, bu durum da numunelerde fiziksel değişimlerle kendini göstermiştir.



Şekil 4.22. Asit atağının epoksi-kalsit bağları ile etkileşimi

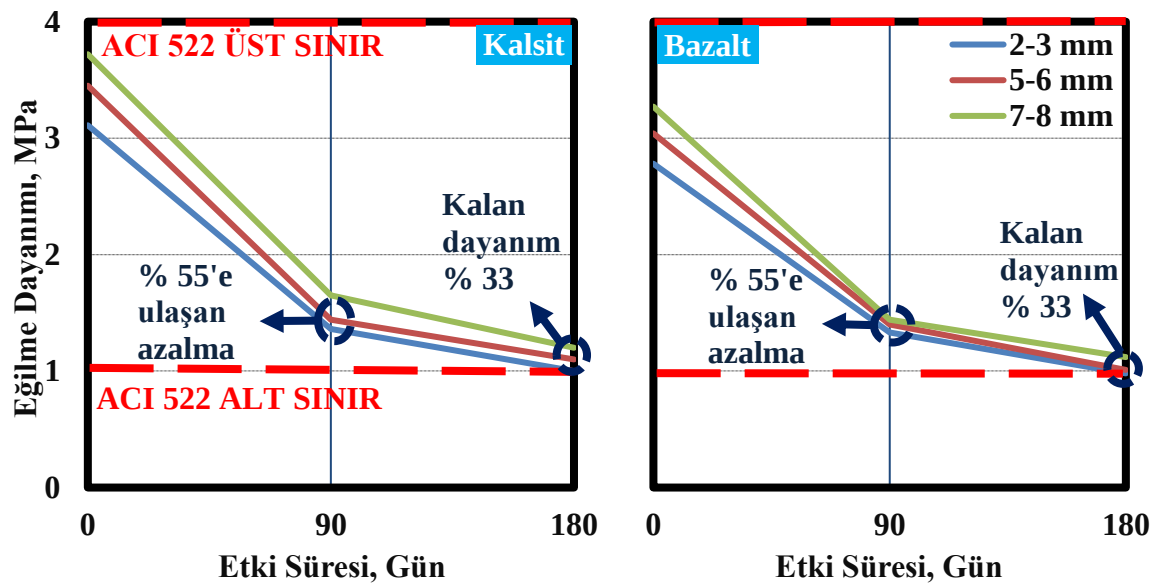
Renk değişimi ve ayrışma gibi belirtiler, bağ yapısının kimyasal dayanıklılığındaki azalmaya işaret etmektedir. Kalsit içeren numunelerde, arayüzey bağ yapısının asidik koşullara karşı daha fazla etkilendiği, bu nedenle ayrışma ve renk değişiminin daha belirgin olduğu belirlenmiştir. Buna karşın, bazalt agregalı numunelerde, arayüzey bağlarının kimyasal olarak daha dayanıklı olması, hasarın daha sınırlı düzeyde kaldığı ifade edilebilir.



Şekil 4.23. Asit atağının epoksi-bazalt bağları ile etkileşimi

4.2.2. Sülfat dayanıklılığı deney sonuçları

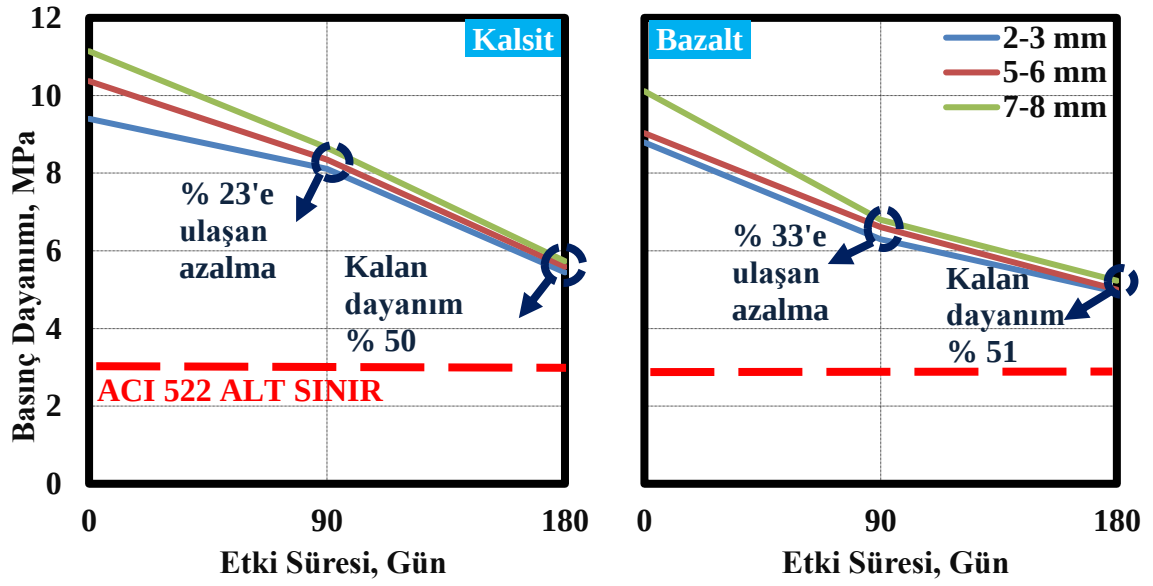
Şekil 4.24’de polyester bağlayıcılı geçirimli betonların sülfat etkisinde eğilme dayanımları verilmiştir. Şekil 4.24 incelendiğinde tüm agrega tür ve boyutları için eğilme dayanımında belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma, sülfat etkisinde kalma süresi uzadıkça artış göstermiştir. Etki süresi 90 güne ulaştığında eğilme dayanımındaki azalma oranı yaklaşık %55 olarak belirlenirken, bu oran etki süresi 180 güne çıkarıldığında % 67’ye kadar yükselmiştir.



Şekil 4.24. Sülfat etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin eğilme dayanımı değerleri

Kontrol numunelerinin sonuçları incelendiğinde, bazalt ve kalsit agregaları ile elde edilen numuneler arasında eğilme dayanımları açısından anlamlı bir fark olduğu görülmüştür. Bu farkın, yalnızca agrega türünden değil, aynı zamanda tane boyutundan da etkilendiği anlaşılmaktadır. Ancak sülfat etkisi altında geçen süre uzadıkça, farklı agrega türleri ve tane boyutları arasındaki bu dayanım farkı giderek azalmış ve numuneler arasında birbirine oldukça yakın sonuçlar elde edilmiştir.

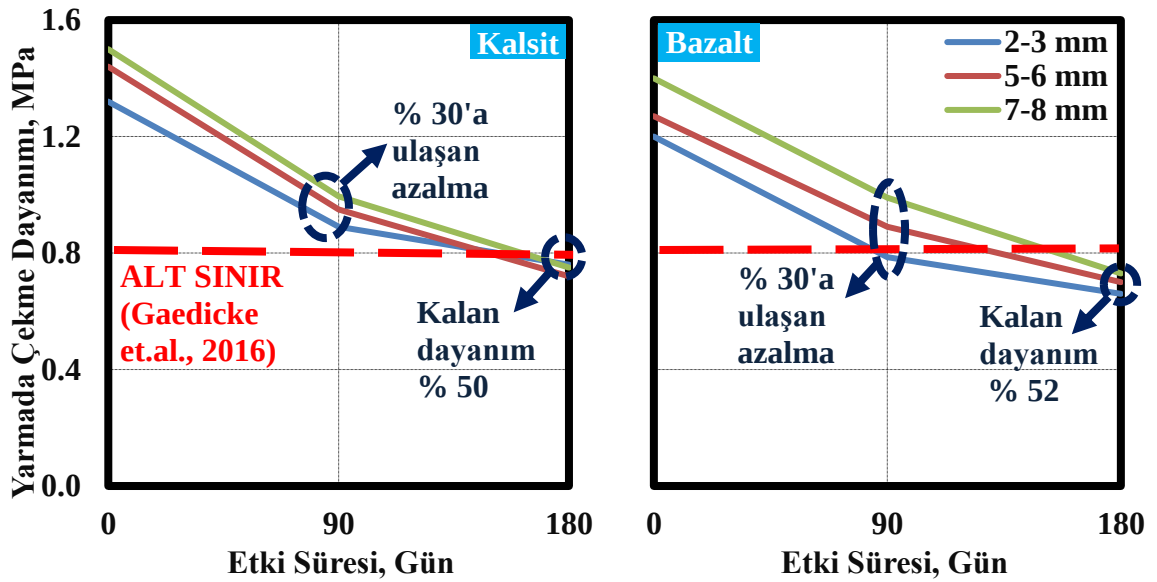
Sülfat etkisinin polyester bağlayıcılı geçirimli betonlarda dayanım kaybına neden olmasının ardındaki temel mekanizma incelendiğinde, özellikle bağlayıcı malzeme ile agrega arasında oluşan arayüz bölgesinin bu bozunmadan önemli ölçüde etkilendiği söylenebilir. Sülfat iyonlarının, polyester bağlayıcıyı ve bağlayıcı-agrega arayüzünü kimyasal ve fiziksel olarak zayıflattığı, bu durumun malzeme içerisindeki mikro çatlak oluşumunu hızlandırdığı ve dayanım kaybını artırdığı değerlendirilmektedir.



Şekil 4.25. Sülfat etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin basınç dayanımı değerleri

Polyester bağlayıcılı geçirimli betonların sülfat etkisi sonucunda basınç dayanımlarında oluşan değişimler Şekil 4.25’de verilmiştir. Şekil 4.25 incelendiğinde tüm agrega tür ve boyutlarında basınç dayanımlarının sülfat etkisi sonucunda azaldığı görülmüştür. Ancak bu azalmaya rağmen numunelerin dayanım değerleri, ACI 522 standardında belirtilen minimum dayanım sınırının üzerinde kalmıştır. Sülfat etkisinde kalma süresi 90 gün olduğunda, kalsit agregalı PPC’lerde basınç dayanım kaybı %23 olarak belirlenmiştir. Aynı sürede bazalt agregalı numunelerde bu kayıp %33’e kadar yükselmiştir. Sülfat etkisinde kalma süresi 180 güne çıktığında ise tüm numunelerde basınç dayanımındaki kayıpların, agrega türünden bağımsız olarak, %50’ye ulaştığı gözlemlenmiştir.

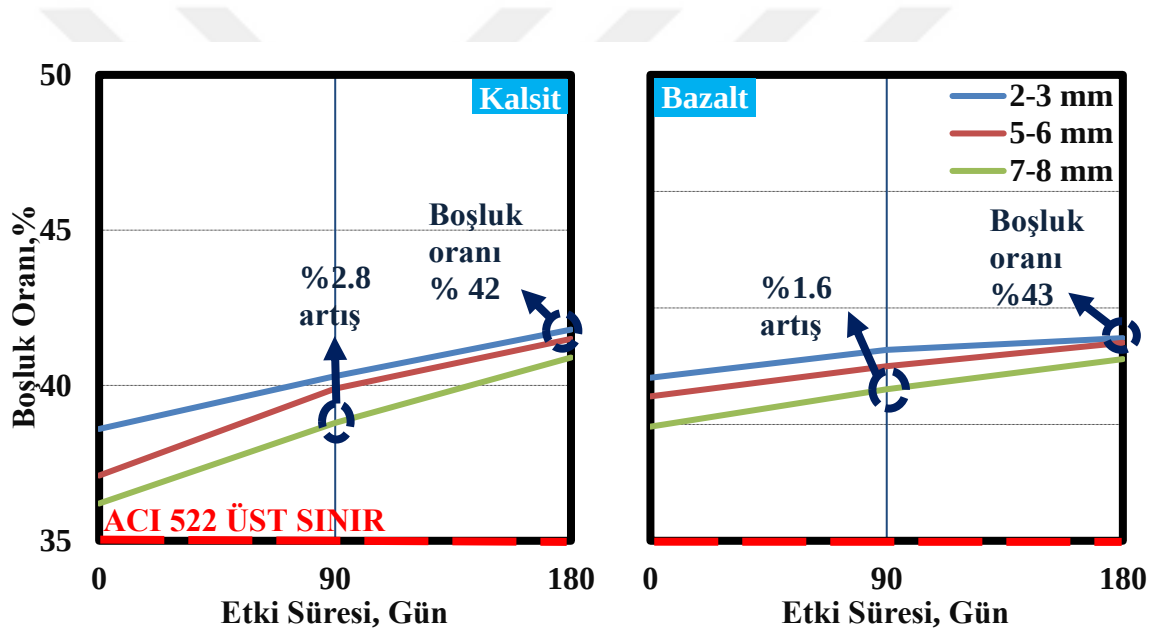
Kontrol numunelerinin basınç dayanımında agrega boyutunun ve agrega türünün etkili olduğu görülürken, numunelerin sülfat etkisinde kalma süresi arttıkça agrega tür ve boyutunun etkisi azalmış ve dayanım değerleri başlangıç değerinin yarısına kadar inmiştir. Bu durum, sülfat etkisinin bağlayıcı malzeme üzerinde belirgin bir bozunmaya yol açtığını, agregalarda ise herhangi bir fiziksel veya kimyasal bozunma oluşmadığını göstermektedir. Polyester reçinelerin sülfat etkisi altında gösterdiği bu dayanım kaybı, bağlayıcı malzeme ile sülfat iyonları arasındaki kimyasal etkileşimlerle açıklanabilir. Sülfat iyonları, polyester reçinelerle reaksiyona girerek moleküler yapıda zincir kırılmalarına, çift bağ oluşumlarına ve zincirler arası çapraz bağlanmaların oluşmasına neden olmaktadır. Bu kimyasal değişimler, bağlayıcı malzemenin mekanik özelliklerini zayıflatmakta ve betonun basınç dayanımında kayıplara yol açmaktadır.



Şekil 4.26. Sülfat etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin y. çekme dayanımı değerleri

Şekil 4.26'da, polyester bağlayıcılı geçirimli beton numunelerinin yarmada çekme dayanımlarında, sülfat etkisi altında oluşan değişimler sunulmaktadır. Şekil incelendiğinde, tüm agrega türleri ve tane boyutları için yarmada çekme dayanımlarında belirgin bir azalma olduğu görülmüştür. Sülfat etkisinde kalma süresi 90 gün olduğunda, yarmada çekme dayanımındaki azalma oranı %30'a ulaşmış, etki süresinin 180 güne çıkarılması durumunda bu oran %50 seviyelerine kadar yükselmiştir.

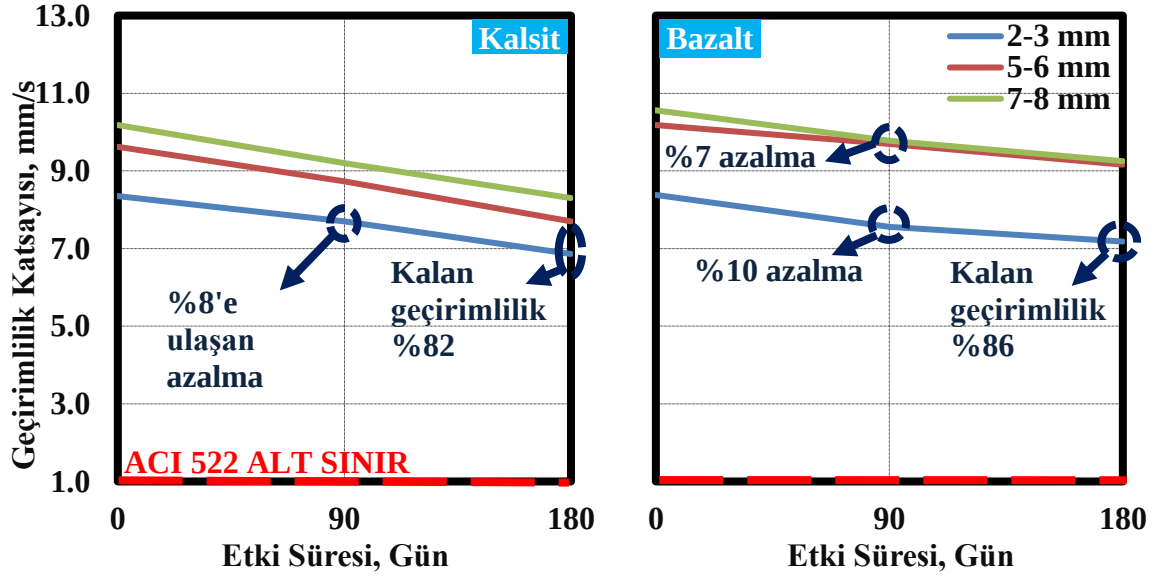
Yarmada çekme dayanım sonuçları, bazalt agregalı numunelerde tane boyutunun sülfat etkisi altında belirgin bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Daha büyük agregatane boyutlarına sahip numunelerde, yarmada çekme dayanımının daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Buna karşın, kalsit kökenli agregalar kullanılarak üretilen numunelerde tane boyutunun etkisinin sülfat etkisi süresiyle birlikte azaldığı ve dayanım farklarının giderek küçüldüğü tespit edilmiştir. Hem kontrol numunelerinde hem de sülfat etkisi altındaki numunelerde, en yüksek yarmada çekme dayanımı, 7-8 mm tane çapına sahip agregalarla üretilen numunelerde elde edilmiştir. Bu durum, daha büyük agregatane boyutlarının bağlayıcı malzeme ile daha etkin bir şekilde etkileşim sağladığını ve böylece çekme dayanımı üzerinde olumlu bir katkı yaptığını düşündürmektedir.



Şekil 4.27. Sülfat etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin boşluk oranı değerleri

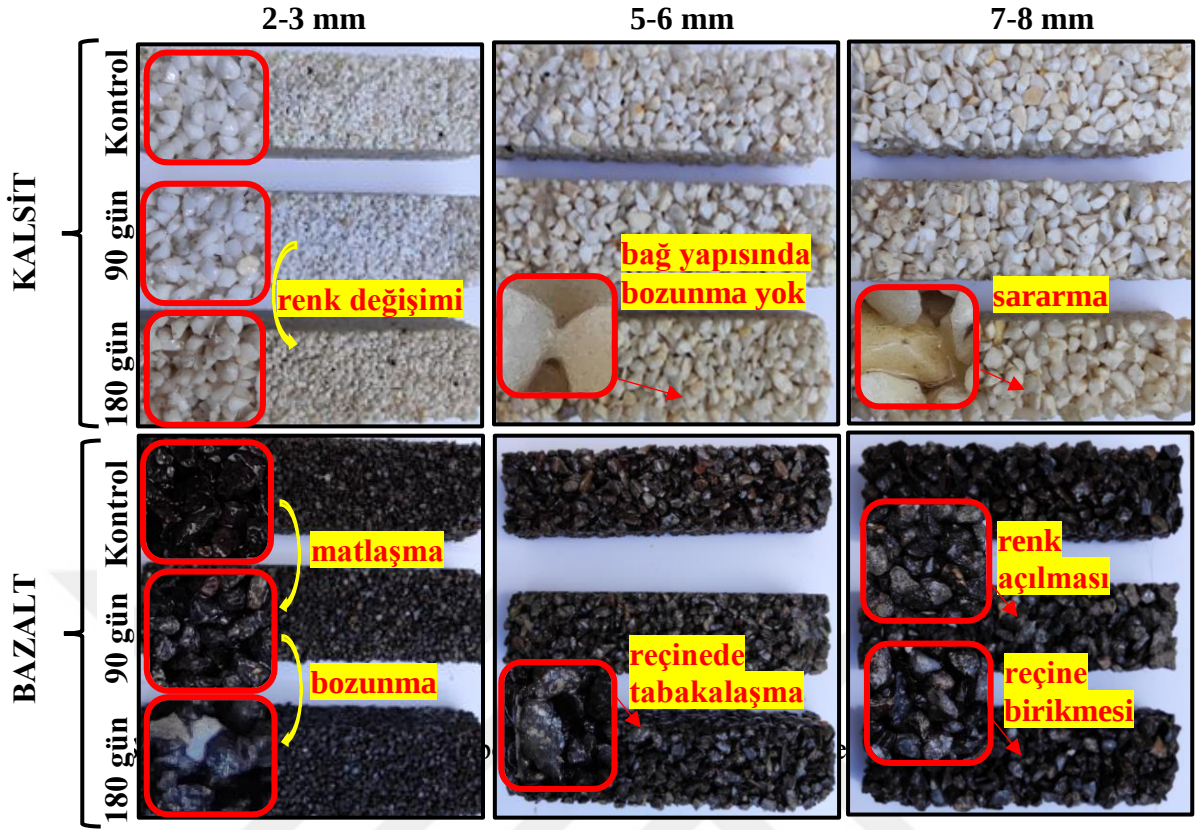
Sülfat etkisinde kalan PPC'lerin boşluk oranı değişimleri Şekil 4.27'de verilmiştir. Şekil 4.27 incelendiğinde sülfat etkisi ile boşluk oranları bazalt agregası içeren PPC numunelerinde % 1.6, kalsit agregası içeren numunelerde ise % 2.8'e ulaşan oranda artmıştır. Her iki agregatürü için de 180 gün süresince sülfat etkisi altında kalan numunelerin boşluk oranları, ACI 522 standardında belirtilen üst limitin üzerinde gerçekleşmiştir. Sülfat etkisinde agregalarda kimyasal bozunma gözlemlenmemiştir ancak reçine kısmında sülfat atağının etkisiyle belirgin değişiklikler oluşmuştur. Sülfat iyonları, polyester bağlayıcı malzemenin kimyasal yapısındaki polimer zincirlerinin kırılmasına, yapısal düzenin bozulmasına ve agregatane boyutları arasındaki bağların zayıflamasına yol açmıştır.

Bağlar arasında oluşan hasar, özellikle agrega ve bağlayıcı malzeme arasındaki aderansın kaybına neden olarak, yüzeyde soyulmalara ve rijit polyester reçinede zayıf, ufalanabilir yapıların oluşmasına neden olmuştur. Sonuç olarak, bu yapısal bozulmalar, betonun mikro yapısında artan boşluk oranına yol açmıştır.



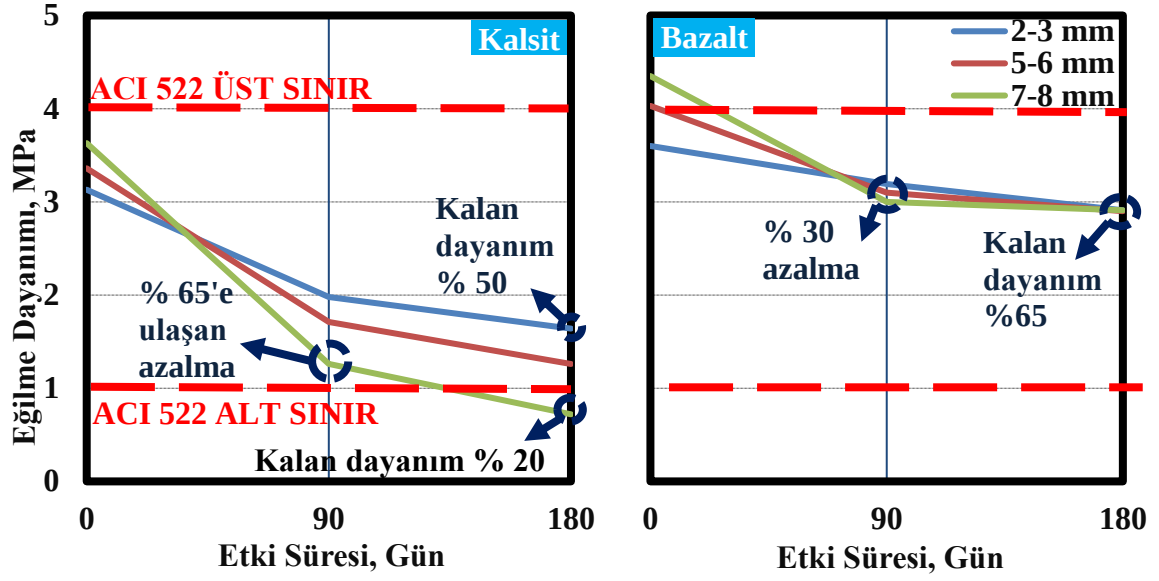
Şekil 4.28. Sülfat etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin geçirimsizlik değerleri

Sülfat atağında polyester bağlayıcılı PPC'lerin geçirimsizlik katsayısı değişimleri Şekil 4.28'de verilmiştir. Şekil 4.28 incelendiğinde sülfat etkisi ile geçirimsizlik katsayısının %18 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. En yüksek geçirimsizlik katsayısı, 7-8 mm boyutlarında bazalt agregası içeren ve sülfat etkisinde kalmamış kontrol numunelerinde 10.56 mm/s olarak ölçülürken, en düşük geçirimsizlik katsayısı ise 2-3 mm boyutlarında kalsit agregası içeren ve 180 gün süresince sülfat etkisinde kalmış PPC numunelerinde 6.86 mm/s olarak belirlenmiştir. Agregat türü açısından değerlendirildiğinde, sülfat etkisi altında geçirimsizlik katsayısında kalsit agregası içeren numunelerde daha fazla görülmüştür. Sülfat atağı sonucu polimer bağ yapısının ve agregat-reçine aderans bağ yapısının kısmen bozunması sonucu oluşan ufalanma ve soyulmalar geçirimsiz beton iç boşluklarında kısmen tıkanmalara yol açmakta bu durumda geçirimsizliğin azalmasına neden olmaktadır.



Şekil 4.29. Sülfat etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin değişimleri

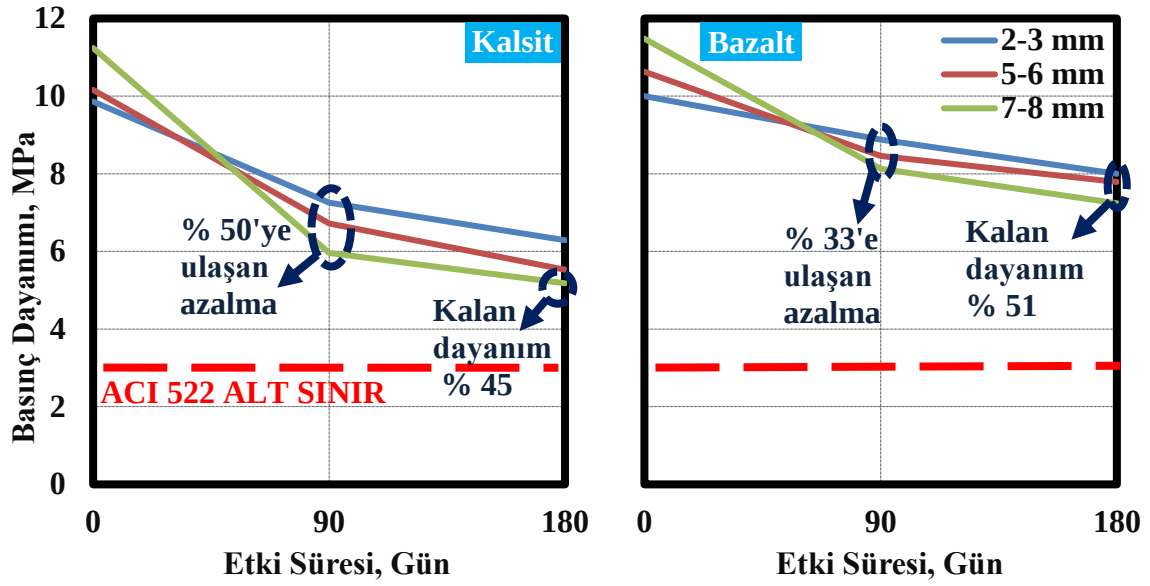
Şekil 4.29’da, sülfat etkisi altında polyester bağlayıcılı geçirimli beton (PPC) numunelerinin yüzeylerinde oluşan değişimler gösterilmiştir. Bu tezde, farklı tane çaplarına sahip (2-3 mm, 5-6 mm ve 7-8 mm) kalsit ve bazalt agregası türleri kullanılarak, sülfat etkisinde kalan numuneler ile kontrol numuneleri karşılaştırılmıştır. Kalsit agregası içeren numunelerde, sülfat etkisi ile belirgin bir renk değişimi ve sararma gözlemlenmiştir. 69*0*-6 olan renk koordinatının sülfat etkisi sonucunda 50*-1*12 olduğu görülmüştür. L*a*b renk sisteminde L parlaklığı temsil etmekte olup L=0 siyahı ve L=100 beyazı, +a kırmızılığı, -a yeşilliği, +b sarılığı ve -b de maviliği ifade etmektedir (Ünal ve Canbaz, 2022). Bu değişimlere rağmen reçinenin bağ yapısında korunduğu görülmektedir. Bazalt agregası içeren numunelerde, sülfat etkisiyle yüzeyde renk açılması, matlaşma, reçinenin agregası yüzeyinden ayrılarak boşluklarda birikmesi ve kısmi bozunma gibi etkiler gözlemlenmiştir. Bu bulgular, özellikle bazalt agregalı numunelerde sülfatın etkisinin daha belirgin olduğunu ve bu etkiyle birlikte reçine-arayüz bağ yapısının zayıfladığını ortaya koymaktadır. Sülfat etkisi, bazalt agregalı numunelerde daha fazla bozunma ve yapısal zayıflamaya yol açarken, kalsit agregalı numunelerde bu tür bozulmaların daha sınırlı kaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.30. Sülfat etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin eğilme dayanımı değerleri

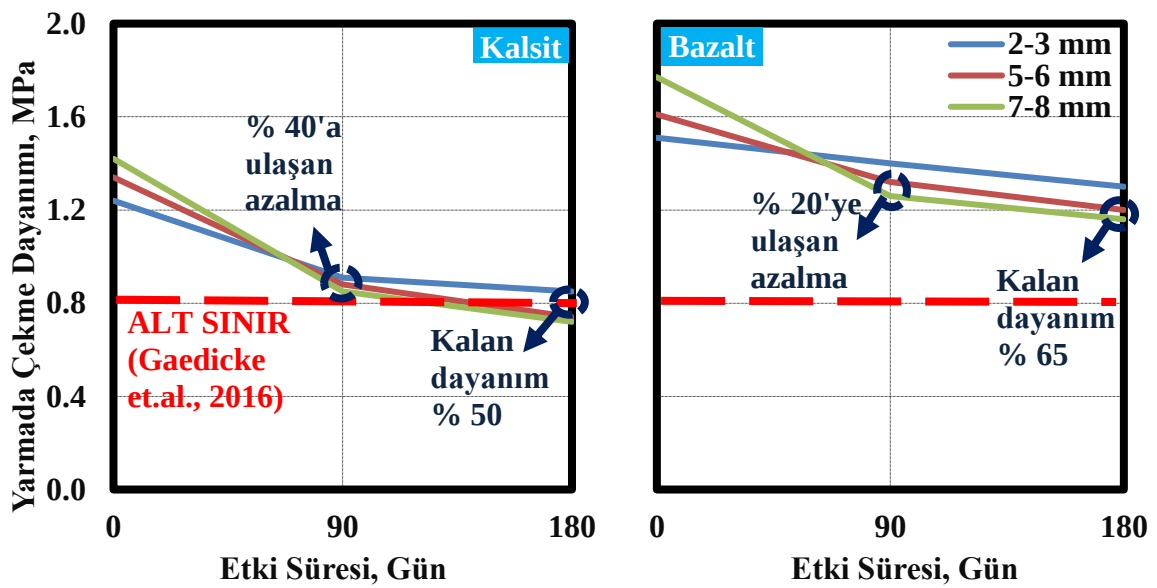
Şekil 4.30'da epoksi bağlayıcılı geçirimli betonların sülfat etkisinde eğilme dayanımlarında gerçekleşen değişim verilmiştir. Şekil 4.30 incelendiğinde tüm tüm agregalar tür ve boyutları için sülfat etkisiyle eğilme dayanımlarının azaldığı görülmüştür. Bu azalma, özellikle kalsit agregalı numunelerde daha belirgin olmuş ve 7-8 mm tane çaplı agregalar içeren numunelerde bu kayıplar 90 günde %65'e, 180 günde ise %80'e ulaşmıştır. Bazalt içeren numunelerde eğilme dayanım kaybının kalsit içeren numunelere göre daha az olduğu görülmüş olup en fazla dayanım kaybı 7-8 mm tane çaplı numunelerde 90 günde %30, 180 günde ise %35 olmuştur. Bu sonuçlar, sülfatın epoksi bağ yapısındaki zincirleri tahrip etmesinin yanı sıra, epoksi-agrega arayüzündeki bağların yapısını bozması nedeniyle eğilme dayanım kayıplarının, agregalar türü ve boyutundan etkilenecek değiştiğini ortaya koymaktadır. Özellikle kalsit agregalı numunelerde bağlayıcı malzemenin yapısal bütünlüğünün daha fazla bozulduğu ve dayanım kaybının daha yüksek olduğu, bazalt agregalı numunelerde ise bu bozulmanın daha sınırlı kaldığı anlaşılmaktadır.

Sülfat etkisinde numunelerin basınç dayanımlarında gerçekleşen değişimler Şekil 4.31'de verilmiştir. Şekil 4.31 incelendiğinde sülfat etkisinin polimer bağ zincirlerini ve agregalar yüzeyindeki hidrojen bağlarını kısmen kırarak, basınç dayanımlarında belirgin bir azalmaya yol açtığı görülmüştür.



Şekil 4.31. Sülfat etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin basınç dayanımı değerleri

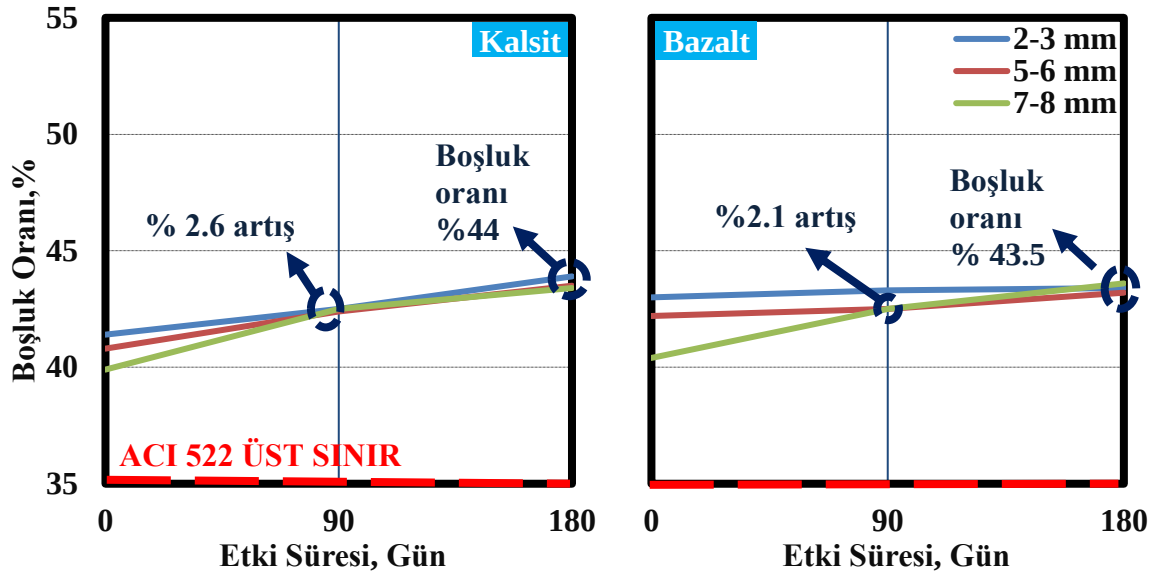
Epoksi bağlayıcılı geçirimli beton numunelerinde, bu azalma özellikle bazalt agregalı numunelerde %49, kalsit agregalı numunelerde ise %55 oranında olmuştur. Bu azalma, özellikle 2-3 mm tane boyutuna sahip numunelerde daha belirgin bir şekilde gözlemlenmiş, ancak kalsit agregalı numunelerin bazalt agregalı numunelere göre daha fazla etkilenmiş olduğu gözlenmiştir. Kalsit agregasının, sülfat etkisi altında epoksi bağlayıcı ile olan etkileşimini zayıflatarak daha fazla dayanım kaybına neden olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 4.32. Sülfat etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin y. çekme dayanımı değerleri

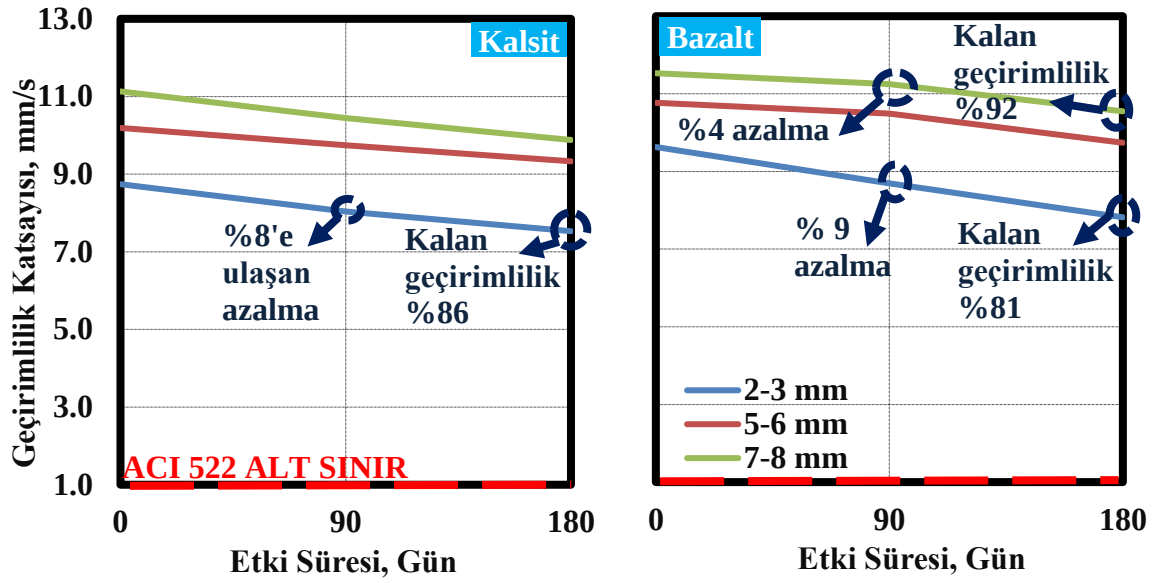
Şekil 4.32’de sülfat etkisinde kalma süresine bağlı olarak epoksi reçine bağlayıcılı geçirimli betonların yarmada çekme dayanımı değişimleri verilmiştir. Şekil 4.32 incelendiğinde sülfat etkisinin yarmada çekme dayanımlarını, agrega türü ve tane boyutuna göre değiştirdiği açıkça görülmüştür. Bazalt agregalı numunelerde, 2-3 mm tane boyutunda olan numunelerde sülfat etkisi ile oluşan yarmada çekme dayanım kaybı, 180 gün sonunda %15 civarına ulaşırken, 7-8 mm tane boyutlu numunelerde bu kayıp, ilk 90 günde belirgin bir şekilde daha yüksek olmuştur. Öte yandan, kalsit agregası içeren numunelerde yarmada çekme dayanım kayıpları, 180 gün sonunda %50’ye kadar yükselmiştir.

Sülfat etkisinde 180 gün süreyle bekletilen bu geçirimli beton numuneleri, agresif ortam koşullarında kalmamış olan portland çimentolu geçirimli beton numunelerine yakın dayanım sonuçları sergilemiştir. Bu bulgular, sülfatın, epoksi reçine bağlayıcılı geçirimli betonlar üzerindeki etkisinin, farklı agrega türleri ve tane boyutlarına bağlı olarak değişkenlik gösterdiğini ve daha büyük agregaların dayanım kayıplarını daha hızlı bir şekilde artırdığını ortaya koymaktadır.



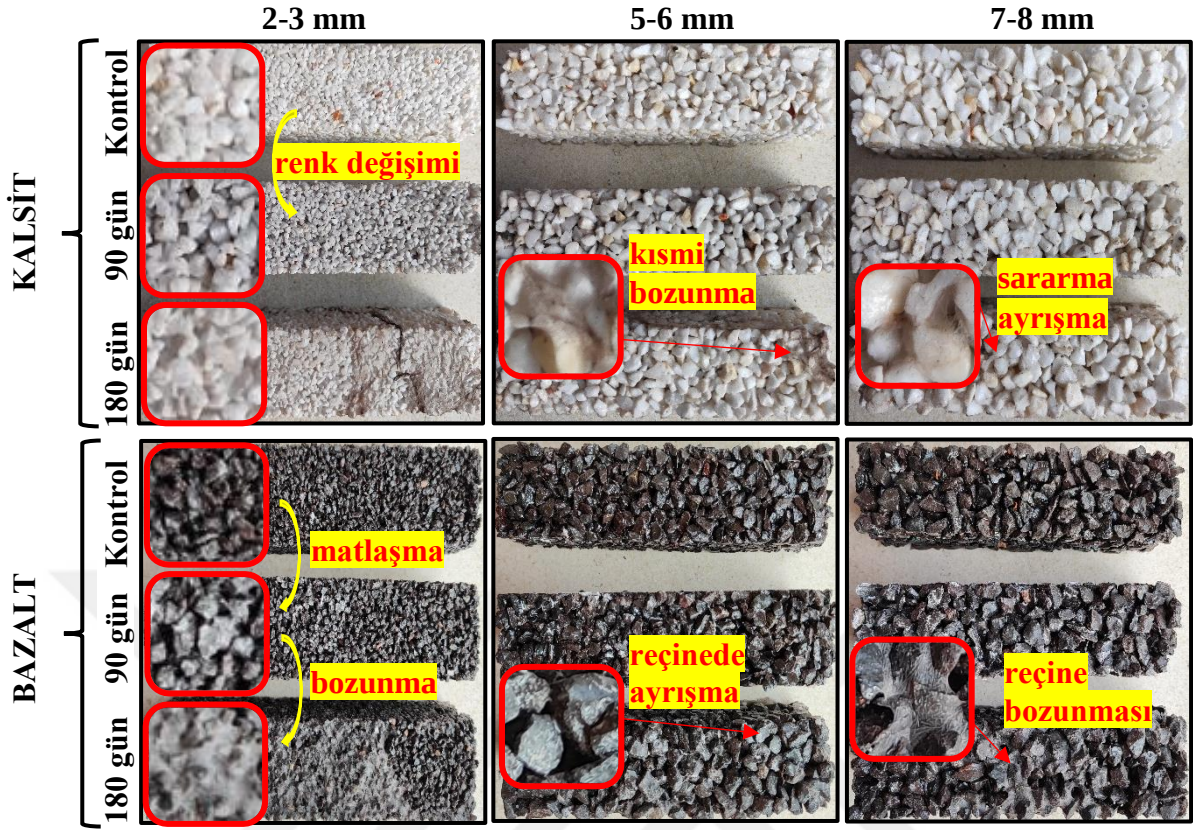
Şekil 4.33. Sülfat etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin boşluk oranı değerleri

Sülfat etkisinde kalan PPC'lerin boşluk oranı değişimleri Şekil 4.33'de verilmiştir. Şekil 4.33 incelendiğinde sülfat etkisi ile boşluk oranları bazalt agregası içeren PPC numunelerinde % 2.1, kalsit agregası içeren numunelerde ise % 2.6'ya ulaşan oranda artmıştır. Epoksi reçineler sülfatlar ile tepkimelere girerek polimer zincirlerinde çapraz bağ oluşumu, çift bağ oluşumu, kırılma gibi nedenlerle bozunma sonucu geçirimli beton iç kısımlarında kısmen soyulma veya ufalanmaya neden olabilmektedir. Bu durum boşluk yapısının artışı sağlamıştır.



Şekil 4.34. Sülfat etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin geçirimlilik değerleri

Şekil 4.34'te sülfat atağına uğrayan PPC numunelerinin hesaplanan geçirimlilik katsayısı değerleri verilmiştir. Şekil 4.34 incelendiğinde uzun süreli sülfat etkisine rağmen, ACI 522'de belirtilen en az 1 mm/s geçirimlilik değerinin en az yedi katı kadar daha yüksek geçirimlilik değerleri elde edilmiştir. Ancak sülfat etki süresi ile geçirimlilik değerlerinde azalmalar gözlemlenmiştir; bazalt agregası içeren numunelerde %19, kalsit agregası içeren numunelerde ise %14 oranında bir azalma gerçekleştirilmiştir. Epoksi bağlayıcılı PPC numunelerinde de, polyester reçinesinde olduğu gibi, polimer zincir düzeninin bozulması ve kırılması sonucunda oluşan mukoza kıvamındaki yapılar ve aderans kaybı nedeniyle soyulmalar oluşmuştur. Bu soyulmalar, geçirimli betonun dış yüzeyinde ve içindeki bağlantılı boşluklarda tıkanmalara yol açarak geçirimliliği azaltmaktadır.

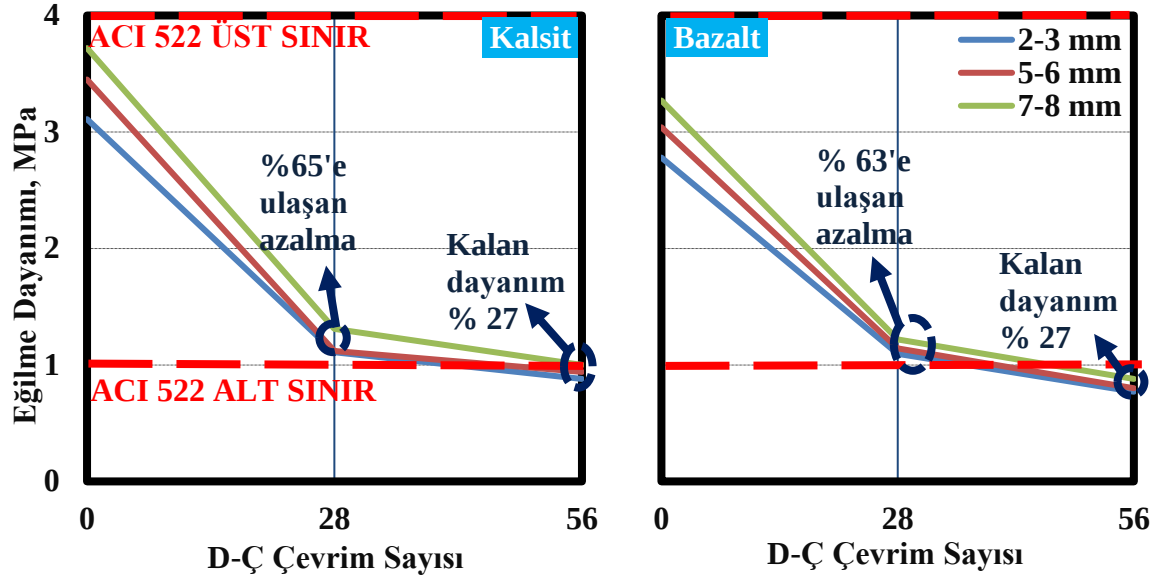


Şekil 4.35. Sülfat etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin değişimleri

Şekil 4.35'te, sülfat etkisinde kalan epoksi bağlayıcılı geçirimli beton numunelerinin yüzeylerinde gözlemlenen değişimler detaylandırılmıştır. Farklı tane çapları için yapılan değerlendirmelerde, kalsit agregası içeren numunelerde 90 gün sonunda renk değişimi ve sararma gözlemlenmiştir. Bu etkiler, 180 günlük sürede daha belirgin hale gelmiştir. Ayrıca, kalsit numunelerinde reçinenin yüzeyden ayrılma, soyulma ve reçine yapısının bozunması gibi değişimler de gözlenmiştir. Bazalt agregası içeren numunelerde ise, kalsit numunelerine göre yüzey bütünlüğü daha iyi korunmuş, matlaşma ve daha sınırlı bir ayrışma gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, sülfat etkisinin kalsit agregası içeren numunelerde daha fazla kimyasal bozunmaya yol açtığını ve bazalt agregası içeren numunelerin daha az etkilenecek yüzey özelliklerini daha iyi koruduğunu göstermektedir.

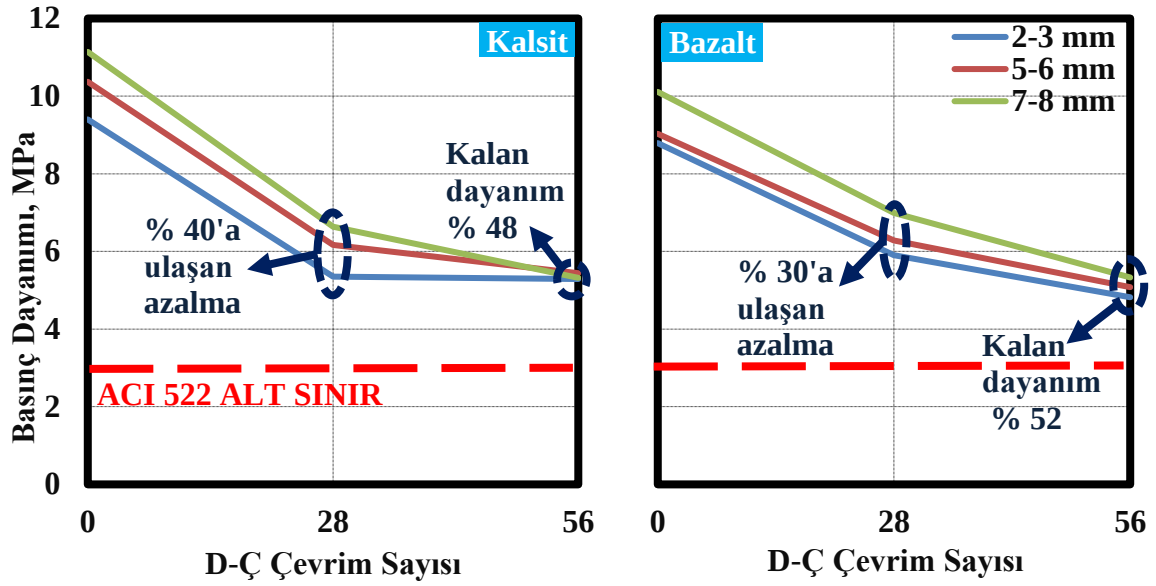
4.2.3. Donma-çözülme deney sonuçları

Şekil 4.36'da polyester bağlayıcılı geçirimli betonların D-Ç çevrimleri etkisinde kalan eğilme dayanımları verilmiştir. Şekil 4.36 incelendiğinde tüm agrega tür ve boyutları için D-Ç çevrimleri etkisinde eğilme dayanımları azalmıştır. Bu azalma çevrim sayısı 28 olduğunda % 65'e ulaşırken, 56 olduğunda % 73'e ulaşmıştır.



Şekil 4.36. D-Ç etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin eğilme dayanımı değerleri

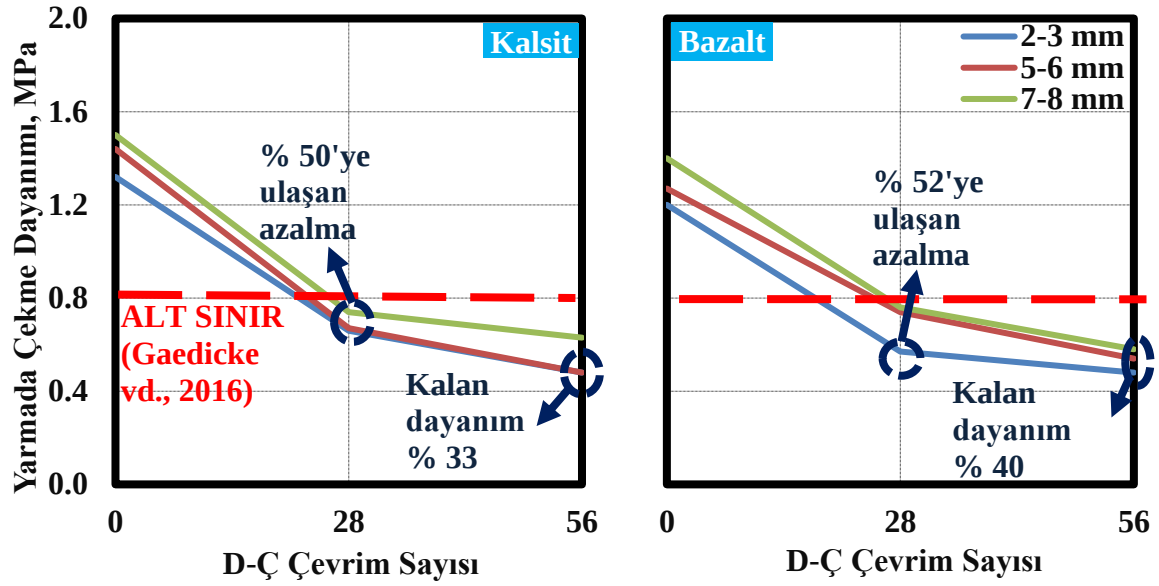
Kontrol numunelerinde, bazalt ve kalsit agregalı numuneler arasında başlangıçta eğilme dayanımı açısından fark bulunmuş, ancak D-Ç çevrimleriyle birlikte bu fark giderek azalmış ve sonuçlar birbirine yakın değerler göstermiştir. Dayanım değerlerinin, çimentolu sistemlerde agresif olmayan ortamlar için belirtilen alt sınır değerine yaklaştığı belirlenmiştir. D-Ç çevrimleri esnasında, PPC'lerin açık boşluk yapısına sahip olması, zemin veya alt tabaka geçirimliliğinin sınırlı olduğu durumlarda boşlukların kolaylıkla suyla dolmasına neden olmuştur. Bu suyun donmasıyla birlikte suya doygunluk nedeniyle oluşan genleşme etkisi, numunelerin şekil değiştirmeye zorlanmasına ve dayanım kaybına yol açmıştır. Ancak bağlayıcının reçine esaslı olması nedeniyle, çimento bağlayıcılı PPC'lerde görülebilecek ufalanma ve parça kopmaları gözlemlenmemiştir. Suyun buza dönüşmesi sırasında tekrarlanan hidrolik basınç kuvveti, bağlayıcıda mikro çatlakların oluşmasına ve agrega-reçine arayüzeyi bağlarının fiziksel olarak zorlanmasına neden olmuştur.



Şekil 4.37. D-Ç etkisinde polyster bağlayıcılı numunelerin basınç dayanımı değerleri

Şekil 4.37, D-Ç çevrimlerinin etkisiyle değişen basınç dayanımlarını göstermektedir. Şekil incelendiğinde, tüm agrega türleri ve boyutları için D-Ç çevrimleri sonucunda basınç dayanımlarında belirgin bir azalma gerçekleşmiştir. Bu azalma, kalsit kökenli agrega içeren PPC numunelerde bazalta göre daha belirgin olup, 28 çevrimde %10, 56 çevrimde ise %4 daha fazla olmuştur. Agrega tane boyutu açısından yapılan değerlendirmede, en az dayanım kaybı %45 ile 2-3 mm boyutlarındaki agrega içeren numunelerde, en fazla düşüş ise %52 ile 7-8 mm boyutlarında agrega içeren numunelerde görülmüştür. D-Ç çevrimlerinin neden olduğu dayanım kaybına rağmen, numunelerin sonuçları ACI 522’de belirtilen basınç dayanımı alt sınırının oldukça üzerinde kalmıştır. D-Ç çevrimleri sırasında, bağlayıcı reçinelerde ve reçine-agrega arayüzeylerinde oluşan mikro çatlakların dayanım kaybına neden olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, agrega tane boyutu küçüldükçe toplam boşluk miktarı artsa da, daha küçük boşlukların oluşturduğu nispeten düşük hidrostatik basınç, dayanım kaybının daha az olmasında etkili olmuştur. Bu bulgu, tane boyutunun D-Ç etkisine karşı PPC numunelerinin performansı üzerindeki rolünü vurgulamaktadır.

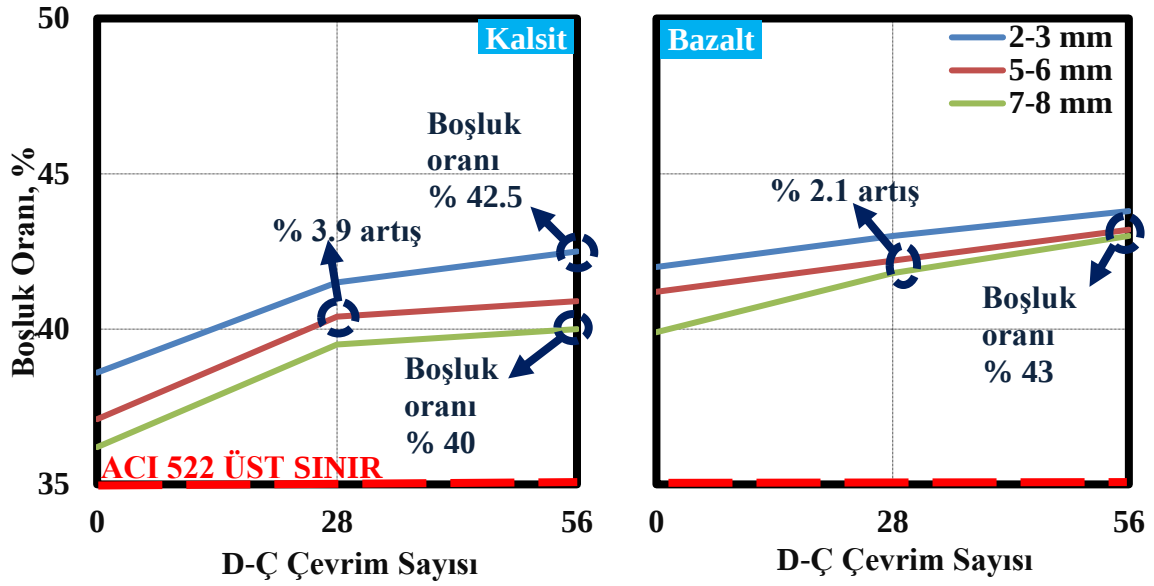
Şekil 4.38, D-Ç çevrimlerinin etkisiyle yarmada çekme dayanımlarındaki değişimleri göstermektedir. Şekil incelendiğinde, tüm agrega türleri ve boyutları için yarmada çekme dayanımlarının 1.5 MPa’dan 0.5 MPa’ya kadar düşebildiği gözlenmiştir.



Şekil 4.38. D-Ç etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin y. çekme dayanımı değerleri

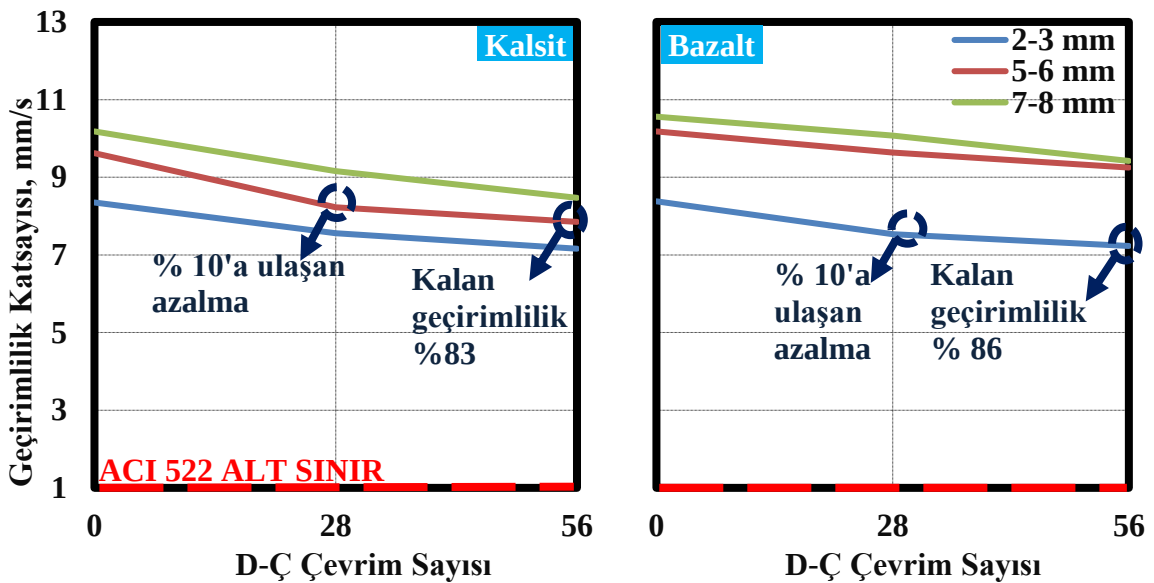
Yarmada çekme dayanımı değerlerindeki düşüş 28 çevrim sonunda yaklaşık %50 seviyesinde olurken, 56 çevrim sonunda bazalt agregası içeren numunelerde %60, kalsit agregası içeren numunelerde ise %67 olarak kaydedilmiştir. Agregatane çapındaki değişimler, PPC numunelerinin yarmada çekme dayanım kayıplarında önemli bir etkiye sahiptir. En belirgin dayanım kaybı, 5-6 mm boyutlarındaki agregası içeren numunelerde gözlemlenmiştir. Yarmada çekme dayanımı, numuneye uygulanan çizgisel yükün yalnızca bir kesiti üzerinde etkili olduğu için, geçirimli betonlarda agregatanelerinin birbirine ne kadar iyi bağlandığını değerlendiren bir parametre olarak değerlendirilebilir. D-Ç çevrimlerinde bu bağlarda oluşan mikro çatlaklar yarmada çekme dayanımının oldukça azalmasına neden olmuştur.

Şekil 4.39, D-Ç çevrimlerinin etkisiyle PPC numunelerinin boşluk oranlarındaki değişimleri göstermektedir. Şekil incelendiğinde, tüm agregatürleri ve boyutları için boşluk oranlarında bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış, kalsit agregası içeren numunelerde %3.9'a, bazalt agregası içeren numunelerde ise %2.1'e ulaşmıştır. Agregatane boyutları açısından değerlendirildiğinde, en düşük artış %1.8 ile 2-3 mm tane boyutuna sahip numunelerde, en yüksek artış ise %3.9 ile 7-8 mm tane boyutuna sahip numunelerde gözlemlenmiştir.



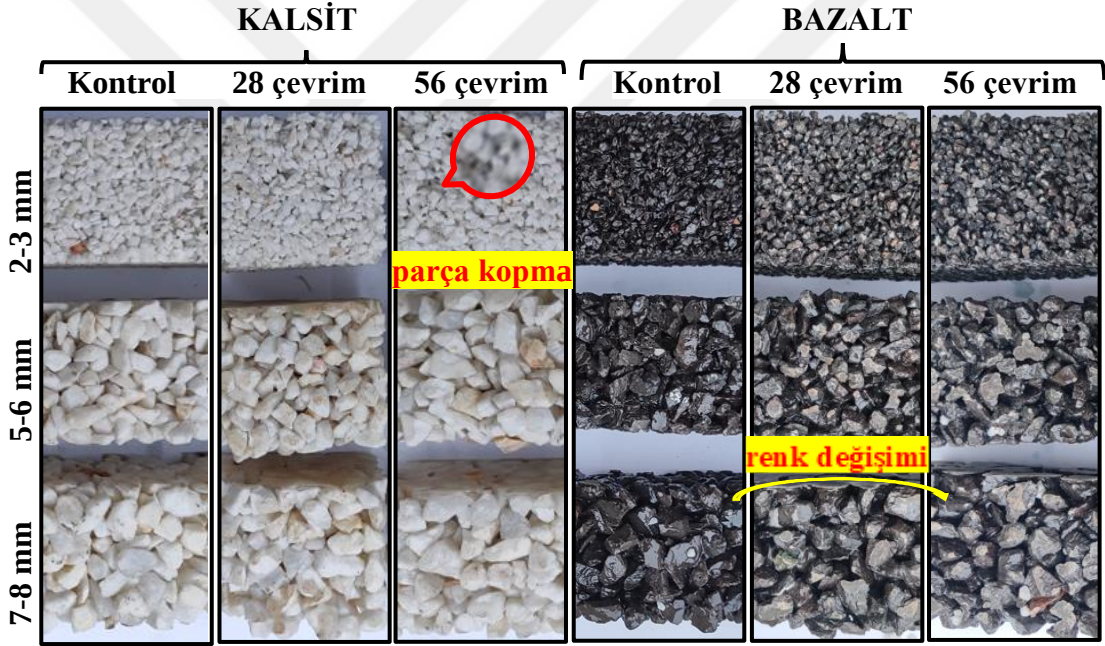
Şekil 4.39. D-Ç etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin boşluk oranı değerleri

Çimentolu sistemlerde, D-Ç çevrimleri sırasında çatlak artışına bağlı olarak daha fazla ufalanma ve tane kopmaları gerçekleştiği için boşluk artışı belirgin bir şekilde gözlenmektedir. Polimer bağlayıcılı sistemlerde D-Ç çevrimleri mekanik özellikler üzerinde etkili olmasına rağmen, oluşan çatlakların numune bütünlüğünü bozmadığı ve belirgin ufalanmaların gerçekleşmediği için boşluk oranındaki artış oldukça sınırlı kalmıştır. Bu durum, polimer esaslı bağlayıcıların çevresel etkilere karşı üstün performans sergilediğini ve numunelerin mikro yapısal dayanımını koruduğunu göstermektedir.



Şekil 4.40. D-Ç etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin geçirimsizlik değerleri

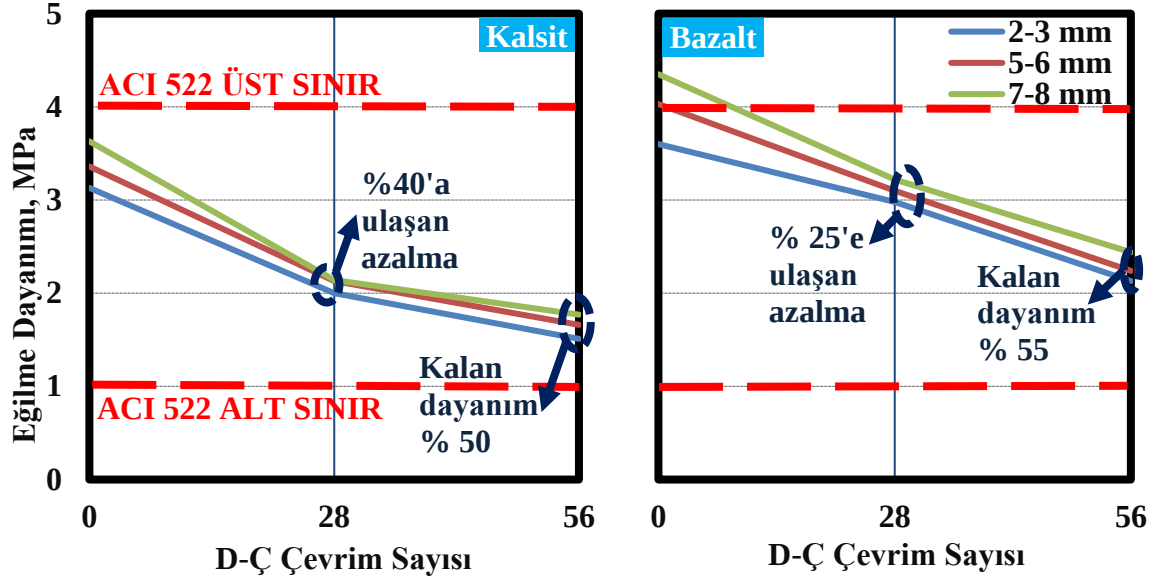
Şekil 4.40, polyester bağlayıcılı PPC numunelerin geçirimsizlik katsayısı ile D-Ç çevrim sayısı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Şekil incelendiğinde, D-Ç çevrimleri etkisiyle tüm agrega türleri ve boyutları için geçirimsizlik katsayılarında bir azalma gözlenmiştir. Bu azalma, 28 çevrim sonunda %10'a, 56 çevrim sonunda ise kalsit agregası içeren numunelerde %17'ye, bazalt agregası içeren numunelerde %14'e ulaşmıştır. Agregatane çapı açısından değerlendirildiğinde, 7-8 mm tane çapına sahip numunelerde geçirimsizlik katsayısındaki azalma, 2-3 mm tane çapına sahip numunelere göre %4 daha fazla olmuştur. D-Ç çevrimleri sırasında bağlayıcı malzemede oluşan mikro çatlaklar, numune içindeki agrega yüzeylerinde aşınma ve küçük parçalanmalara yol açmıştır. Bu parçalanmaların numune alt yüzeyinde kısmen tıkanıklığa neden olması, geçirimsizlik değerlerinde azalmaya neden olmuştur.



Şekil 4.41. D-Ç etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin değişimleri

Şekil 4.41, D-Ç çevrimleri etkisinde polyester bağlayıcılı PPC numunelerde gözlemlenen yüzey değişimlerini ve fiziksel bozulmaları göstermektedir. Çeşitli tane çaplarında (2-3 mm, 5-6 mm, 7-8 mm) kalsit ve bazalt agregaları içeren numuneler üzerinde yapılan bu incelemelerde, çevrim sayısının artışıyla birlikte özellikle kalsit agregası içeren numunelerde belirgin parça kopmaları olmuştur. Bazalt agregası içeren numunelerde ise D-Ç etkisiyle yüzeyde matlaşma ve bağ yapısında zayıflama görülmüştür. 7-8 mm bazalt numunelerde 23*-1*-1 olan L*a*b değeri 56 çevrim sonunda 24*-1*-4 olarak ölçülmüştür.

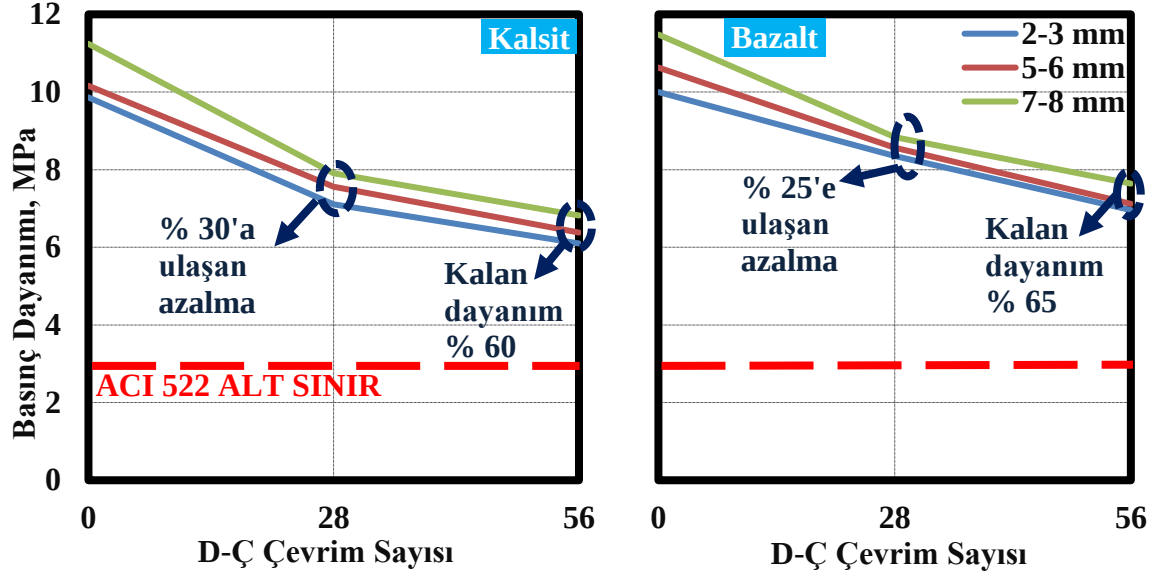
Kontrol numuneleri ile karşılaştırıldığında, çevrim sayısındaki artışın kalsit agregası içeren numunelerde daha fazla fiziksel bozulmaya neden olduğu, bazalt agregalarının ise çevrimlere karşı daha dirençli bir performans sergilediği belirlenmiştir. Bu bulgular, farklı agrega türlerinin D-Ç çevrimleri altında gösterdiği dayanıklılık seviyelerini anlamak ve malzeme seçiminde dikkate alınması gereken kritik faktörleri ortaya koymaktadır.



Şekil 4.42. D-Ç etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin eğilme dayanımı değerleri

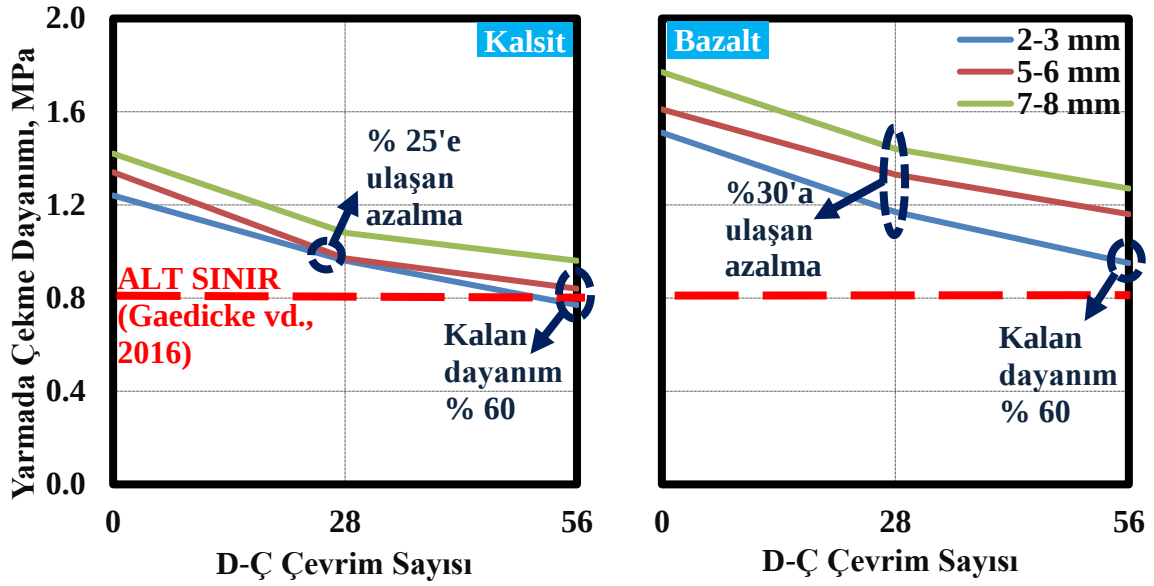
Şekil 4.42’de epoksi bağlayıcılı geçirimli betonların D-Ç çevrimleri etkisinde kalan eğilme dayanımlarını göstermektedir. Şekil incelendiğinde, tüm agrega tür ve boyutları için D-Ç çevrimlerinin etkisiyle eğilme dayanımlarında azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma, çevrim sayısı 28 olduğunda kalsit agregalı numunelerde %40’a, bazalt agregalı numunelerde %25’e ulaşırken; 56 çevrim sonunda kalsit agregalı numunelerde %50’ye, bazalt agregalı numunelerde %45’e kadar artmıştır. Agregatane çapı açısından incelendiğinde, D-Ç çevrimlerinin etkisiyle eğilme dayanım kayıpları 2-3 mm tane boyutunda agrega içeren numunelerde %41, 7-8 mm tane boyutunda agrega içeren numunelerde ise %51 olarak belirlenmiştir. Geçirimli beton numunelerin eğilme etkisi altında, en büyük momentin olduğu kesitteki agrega konumunun ve bağlanma yapısının kritik bir öneme sahip olduğu söylenebilir. D-Ç çevrimleri sırasında epoksi reçine bağlayıcılarında oluşan mikro çatlaklar ile epoksi reçine-agrega ara yüzeyinde oluşan sıyrılmalar, momentin olduğu kesitte yük aktarımını olumsuz etkileyerek dayanım düşüşüne neden olmuştur.

Epoksi bağlayıcıların polyester reçinelere göre daha güçlü bir bağ yapısına sahip olması nedeniyle, D-Ç çevrimlerinin etkisine rağmen numunelerin dayanımlarının ACI 522'de belirtilen alt sınırın oldukça üstünde kaldığı görülmüştür.



Şekil 4.43. D-Ç etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin basınç dayanımı değerleri

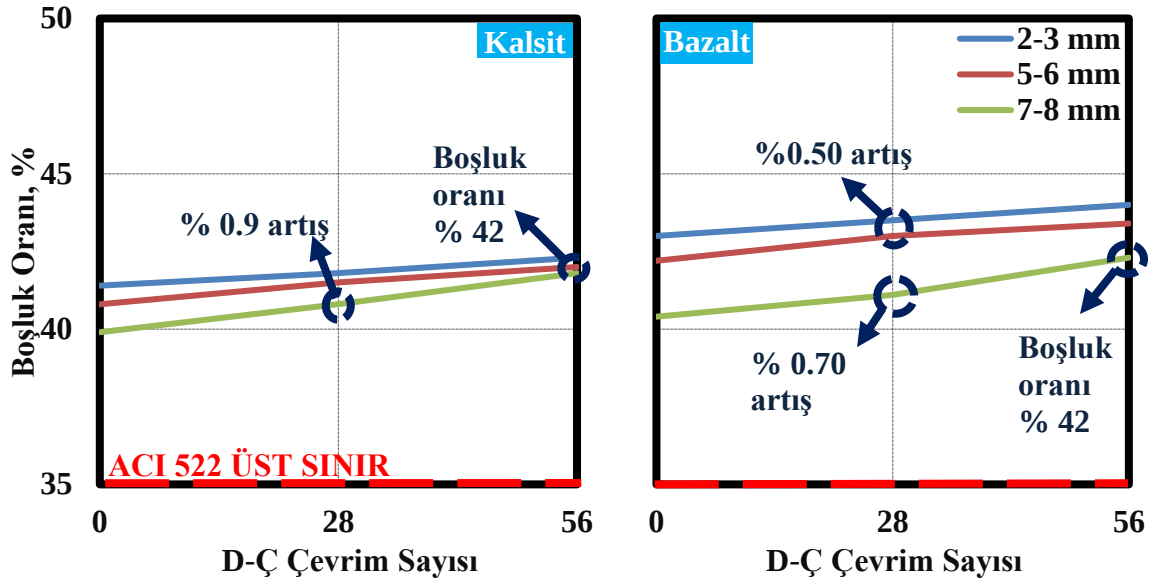
Şekil 4.43, D-Ç çevrimleri etkisi ile değişen basınç dayanımlarını göstermektedir. Şekil incelendiğinde, tüm agrega tür ve boyutları için D-Ç çevrimlerinin etkisiyle basınç dayanımlarında azalma gözlemlenmiştir. Bu azalma, 28 çevrim sonunda %30, 56 çevrim sonunda ise %40 seviyesine ulaşmıştır. Bazalt kökenli agrega içeren PPC numunelerde oluşan dayanım kayıplarının, kalsit kökenli numunelere göre yaklaşık %5 daha az olduğu belirlenmiştir. Bu durum, epoksi reçinenin agrega çevresini iyi sarması ve agregaları çimento esaslı bağlayıcılara göre daha güçlü bir şekilde bağlamasıyla ilişkilendirilmiştir. Agregatane boyutu ve D-Ç çevrim sayısına bağlı olarak basınç dayanım değişiminin %4 ile sınırlı kalması, epoksi reçinenin üstün bağlayıcı özelliklerini göstermektedir. Polyester reçine kullanılan numunelerde kalan dayanımlar, ACI 522'de belirtilen alt sınırın 2 katının altında kalırken, epoksi reçine kullanılan numunelerde dayanımların ACI 522'de belirtilen alt sınırın 2 katını geçtiği gözlemlenmiştir. Donma sırasında oluşan fiziksel itki, bağlayıcıda ve agregareçine ara yüzeyinde mikro çatlakların oluşmasına neden olurken; çözülme ve tekrar donma süreçleriyle bu çatlakların büyüklüğü ve sayısı artmıştır. Bu durum, dayanım kaybının çevrim sayısı ile artmasının temel nedenlerinden biri olarak görülmektedir.



Şekil 4.44. D-Ç etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin y. çekme dayanımı değerleri

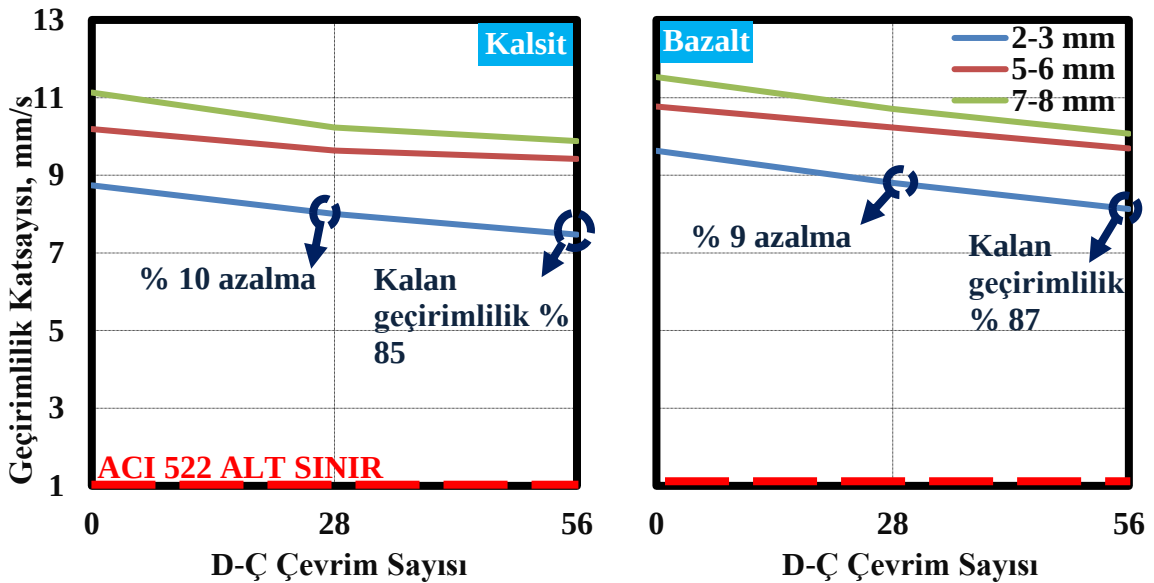
D-Ç çevrimleri etkisi ile değişen yarmada çekme dayanımları Şekil 4.44'te verilmiştir. Şekil 4.44 incelendiğinde D-Ç çevrimleri etkisinde yarmada çekme dayanım kayıplarının 28 çevrimde % 30, 56 çevrimde % 40'a ulaştığı gözlenmiştir. Epoksi reçinesinin agregaya yapışma performansı açısından, bazalt agregası ile üretilen PPC numunelerinin yarmada çekme dayanımlarının, kalsit agregası ile üretilen numunelere göre daha iyi olduğu belirlenmiştir. Bu durum, D-Ç çevrimleri sonrasında bazalt içeren PPC numunelerde kalan dayanımların daha yüksek olmasını açıklamaktadır. Agregatane boyutu açısından incelendiğinde, dayanım kayıplarının genel olarak benzer eğilim gösterdiği, ancak 7-8 mm tane boyutuna sahip bazalt agregalı numunelerde kalan dayanımın 1.27 MPa ile en yüksek seviyede olduğu tespit edilmiştir. Epoksi reçine bağlayıcılı PPC numunelerinin, polyester reçine bağlayıcılı numunelere göre D-Ç çevrimleri sonrasında daha iyi dayanım sonuçları verdiği de görülmüştür. Bağlayıcı reçinenin, agregakadar olmasa da kısmen gevrek bir yapıya sahip olması, D-Ç çevrimleri sırasında oluşan mikro çatlaklar nedeniyle yarmada çekme dayanım kayıplarına yol açmıştır.

PPC numunelerin D-Ç çevrimleri etkisi ile değişen boşluk oranları Şekil 4.45'de verilmiştir. Şekil 4.45 incelendiğinde boşluk oranları % 39.9-% 44 arasında değiştiği görülmüştür. D-Ç çevrim sayısı arttıkça boşluk oranı artmıştır.



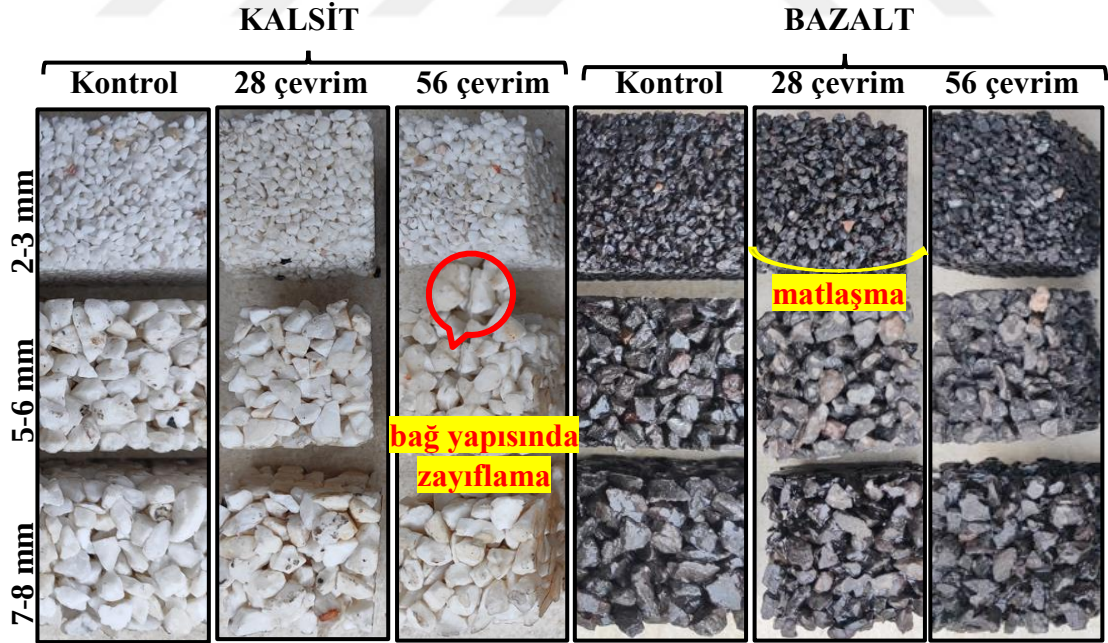
Şekil 4.45. D-Ç etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin boşluk oranı değerleri

Kalsit ve bazalt agregalı numunelerde boşluk oranındaki artış eğiliminin benzer olduğu, bu artışın %1.9'a ulaştığı tespit edilmiştir. Agregatane boyutu açısından incelendiğinde, en düşük artış %0.9 ile 2-3 mm agregat boyutuna sahip numunelerde, en yüksek artış ise %1.9 ile 7-8 mm agregat boyutuna sahip numunelerde görülmüştür. Epoksinin kimyasal yapısının, polyestere göre agregalara daha iyi yapışmasını ve agregatanelerini daha iyi bağlamasını sağlaması nedeniyle, D-Ç çevrimlerinin fiziksel olarak boşluk miktarını değiştirme etkilerinin sınırlı kaldığı belirlenmiştir.



Şekil 4.46. D-Ç etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin geçirimsizlik katsayısı değerleri

Polyester bağlayıcılı PPC numunelerin geçirimsizlik katsayısı-donma çevrim sayısı ilişkisi Şekil 4.46'da verilmiştir. Şekil 4.46 incelendiğinde geçirimsizlik katsayıları 7.47-11.53 mm/s aralığında değiştiği görülmüştür. D-Ç çevrim sayısı arttıkça geçirimsizlik katsayılarında azalma gözlenmiştir. Bu azalma, 28 çevrimde %10'a, 56 çevrimde ise %15'e ulaşmıştır. Agrega türüne bağlı olarak D-Ç çevrimlerinde gerçekleşen geçirimsizlik kayıpları benzerlik göstermiş, ancak 7-8 mm agrega tane boyutuna sahip numunelerde daha yüksek geçirimsizlik değerleri elde edilmiştir. Epoksi reçine bağlayıcılı PPC numunelerde D-Ç çevrimlerinin etkisi altında, çimento bağlayıcılı geçirimsiz betonlar için belirlenen sınır değerinin 7 katından daha fazla geçirimsizlik sağlandığı tespit edilmiştir. Bağlayıcı türüne göre incelendiğinde, polyester bağlayıcılı numunelerle benzer sonuçlar gözlenmesine rağmen, epoksi reçine bağlayıcılı numunelerin daha yüksek geçirimsizlik değerleri sergilediği belirlenmiştir. D-Ç etkisi altında, agrega yüzeyindeki bağlayıcıda oluşan aşınmanın epoksi bağlayıcılı numunelerde daha az parçalanmaya neden olduğu, bunun da numune alt yüzeyinde tıkanıklıkları azaltarak geçirimsizlikteki azalmanın sınırlı kalmasını sağladığı söylenebilir.

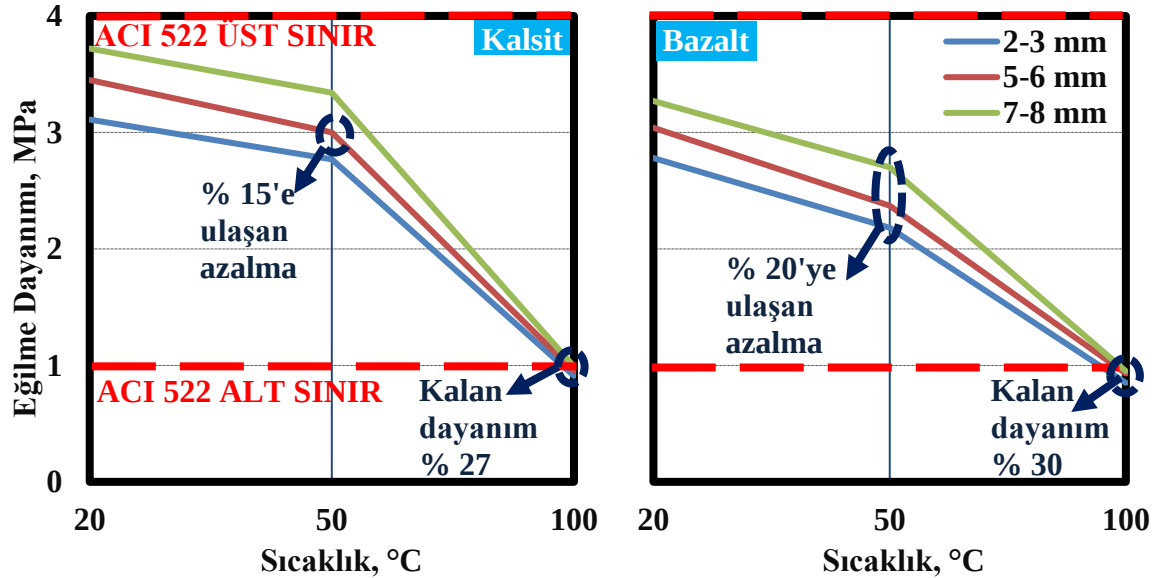


Şekil 4.47. D-Ç çevrimleri etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin değişimleri

Şekil 4.47, D-Ç çevrimlerinin epoksi bağlayıcılı numuneler üzerindeki etkilerini detaylandırmaktadır. Farklı tane çaplarındaki numunelerde kalsit agregası içerenlerde, çevrim sayısının artmasıyla daha yoğun bağ yapısı zayıflamaları ve parça kopmaları tespit edilmiştir. Bazalt agregası içeren numunelerde ise, benzer şekilde bağ yapısında zayıflama ve yüzeyde matlaşma görülmüş, ancak bu etkiler kalsit agregasına göre daha sınırlı kalmıştır. Kontrol numunelerine göre D-Ç çevrimleri, özellikle kalsit agregalı epoksi numunelerde daha belirgin bozulmalara yol açmıştır. Bu bulgular, bazalt agregasının D-Ç çevrimlerine karşı daha dayanıklı olduğunu işaret etmektedir.

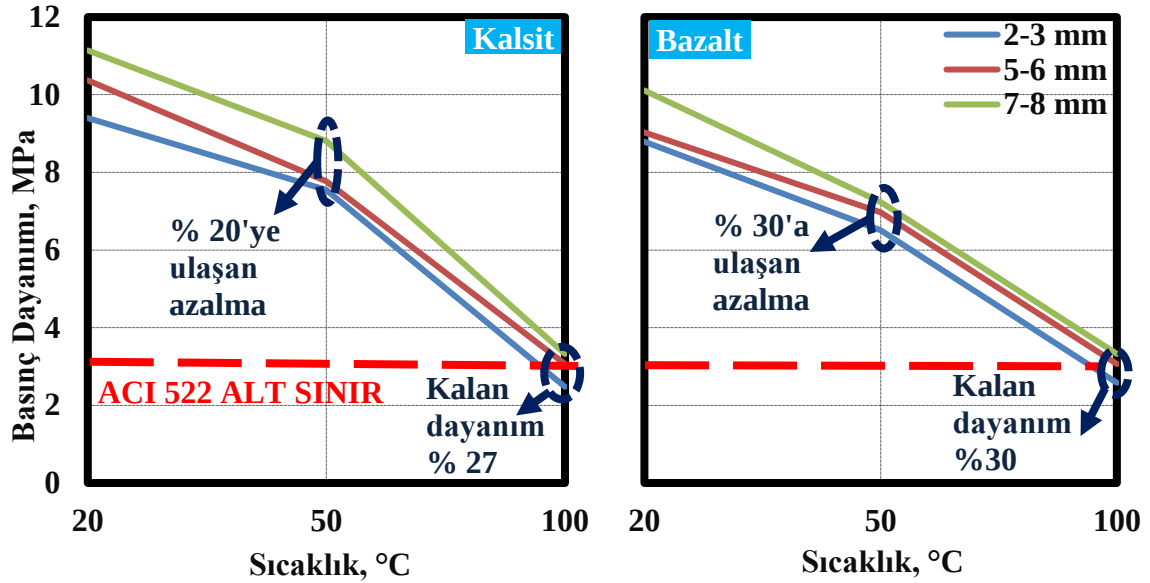
4.2.4. Sıcaklık etkisi deney sonuçları

Şekil 4.48’de, polyester bağlayıcılı geçirimli betonların ortam sıcaklığındaki artış ile oluşan eğilme dayanım değişimleri verilmiştir. Yüksek sıcaklık olarak günümüzde yaz aylarında sıklıkla karşılaşılan 50 °C ve daha sıcak bölgeler için yakın gelecekte ulaşılabilecek 100 °C sıcaklık değerleri seçilmiştir. Her iki sıcaklık değeri de camsı geçiş sıcaklığının altındadır. Şekil 4.48 incelendiğinde, tüm agrega tür ve boyutları için ortam sıcaklığındaki artışla birlikte eğilme dayanımlarında azalma gözlenmiştir.



Şekil 4.48. Sıcaklık etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin eğilme dayanımı değerleri

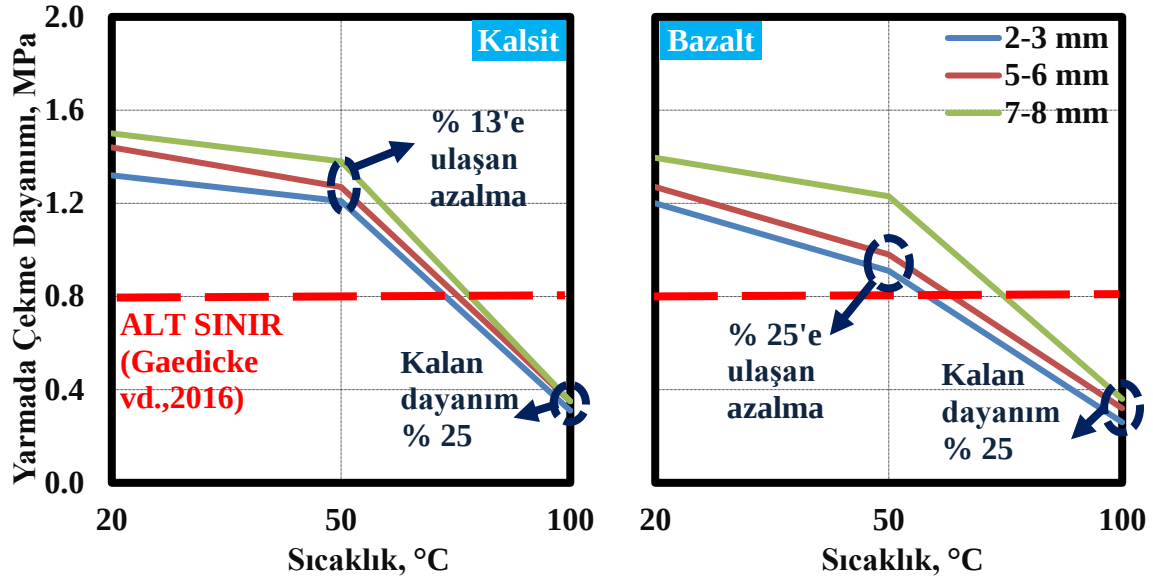
Sıcaklık 50 °C'ye ulaştığında kalsit agregası içeren numunelerde eğilme dayanımı kaybı % 15'e ulaşırken, bazalt agregası içeren numunelerde % 20'ye çıkmıştır. Sıcaklık 100 °C'ye ulaştığında ise kalsit agregası içeren numunelerde % 73, bazalt agregası içeren numunelerde % 70 oranında dayanım kaybı oluşmuştur. Tane çapı açısından, sıcaklık artışına bağlı olarak eğilme dayanım kaybının, 2-3 mm agreg çapına sahip numunelere göre, 7-8 mm agreg çapına sahip numunelerde % 3 oranında daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu sıcaklıklarda polyester reçinenin kimyasal olarak bozunmadığı, ancak kovalent bağ yapılarında atomsal titreşimin hızlanmasıyla atomlar arası mesafenin artışı ve bu durumun şekil değiştirme rijitliğinin azalmasına yol açarak dayanım kaybına neden olduğu belirlenmiştir.



Şekil 4.49. Sıcaklık etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin basınç dayanımı değerleri

Şekil 4.49, sıcaklık etkisi ile değişen basınç dayanımlarını göstermektedir. Şekil incelendiğinde, tüm agreg tür ve boyutları için sıcaklık etkisi altında basınç dayanımlarının azaldığı görülmüştür. Kalsit kökenli agreg içeren PPC numunelere göre, bazalt kökenli agreg içeren PPC numunelerde basınç dayanımındaki azalma, 50 °C'de % 10, 100 °C'de ise % 3 daha fazla olarak tespit edilmiştir. Agreg tane boyutu açısından değerlendirildiğinde, en az etkilenme % 70 ile 2-3 mm boyutlarında agreg içeren numunelerde görülürken, en fazla basınç dayanım kaybı % 73 ile 7-8 mm boyutlarında agreg içeren numunelerde kaydedilmiştir.

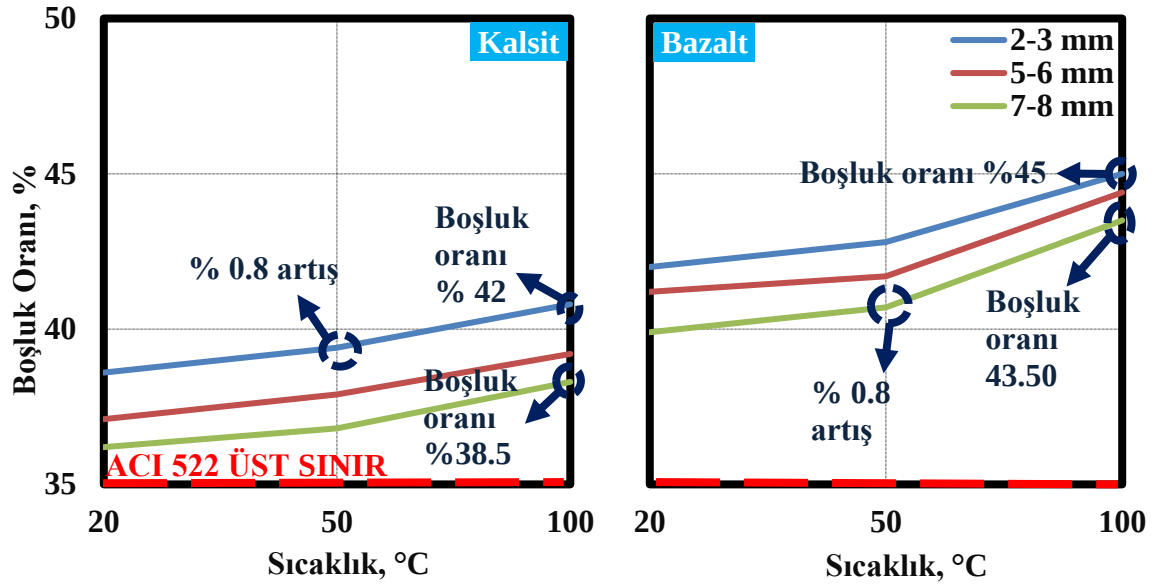
Sıcaklık etkisi ile oluşan basınç dayanım kaybına rağmen, numune sonuçlarının kontrol numuneleri için ACI 522’de belirtilen alt sınır değerini sağladığı görülmüştür. Sıcaklık etkisi altında bağlayıcı reçinenin bağ kuvvetlerinde oluşan azalma, agregaların kuvvet etkisi altında rijitliklerini koruyamamasına yol açmış ve bu durum basınç dayanımındaki kayıplarda etkili olmuştur.



Şekil 4.50. Sıcaklık etkisinde polyester bağ. numunelerin y. çekme dayanımı değerleri

Artan sıcaklık etkisi ile değişen yarmada çekme dayanımları Şekil 4.50’de verilmiştir. Şekil 4.50 incelendiğinde sıcaklık etkisinde yarmada çekme dayanımlarının tüm agrega tür ve boyutları için 1.5 MPa’dan 0.3 MPa kadar azalabildiği görülmüştür. Bu azalma, 50 °C’de bazalt agregası içeren numunelerde % 25, kalsit agregası içeren numunelerde ise % 13 olarak belirlenmiştir. 100 °C’ye ulaşıldığında ise azalma % 75 seviyesine çıkmıştır. Agrega tane çapı açısından değerlendirildiğinde, özellikle 50 °C’de tane çapının dayanım üzerinde etkili olduğu; ancak 100 °C’de tüm tane çapları için benzer kalan dayanımların elde edildiği gözlenmiştir. Yarmada çekme kuvvetinin çizgisel yük olarak uygulandığı bu deneylerde, yükün etkidiği kesitteki agregaları bağlayan reçinelerin sıcaklık artışıyla birlikte şekil değiştirme rijitliğinin azalması ve dayanım kayıplarının oluştuğu söylenebilir.

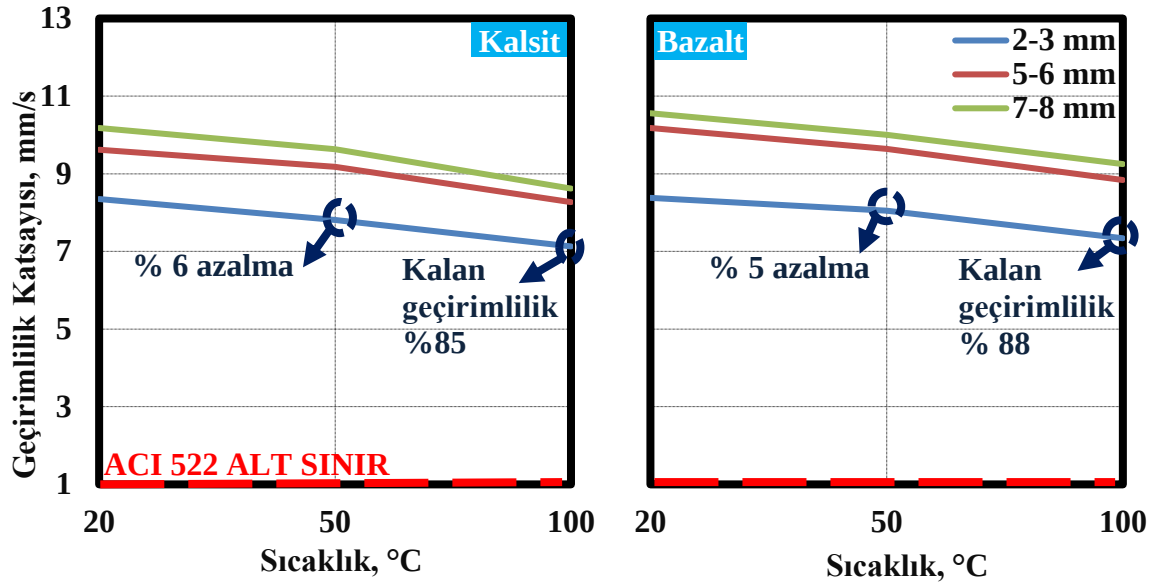
PPC numunelerin sıcaklık etkisi ile değişen boşluk oranları Şekil 4.51’de verilmiştir. Şekil 4.51 incelendiğinde sıcaklık artışı ile boşluk oranları tüm agrega tür ve boyutları için arttığı görülmüştür. Bu artış kalsit agregalı numunelerde % 2.2 olurken, bazalt agregalı numunelerde % 3.6 olmuştur.



Şekil 4.51. Sıcaklık etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin boşluk oranı değerleri

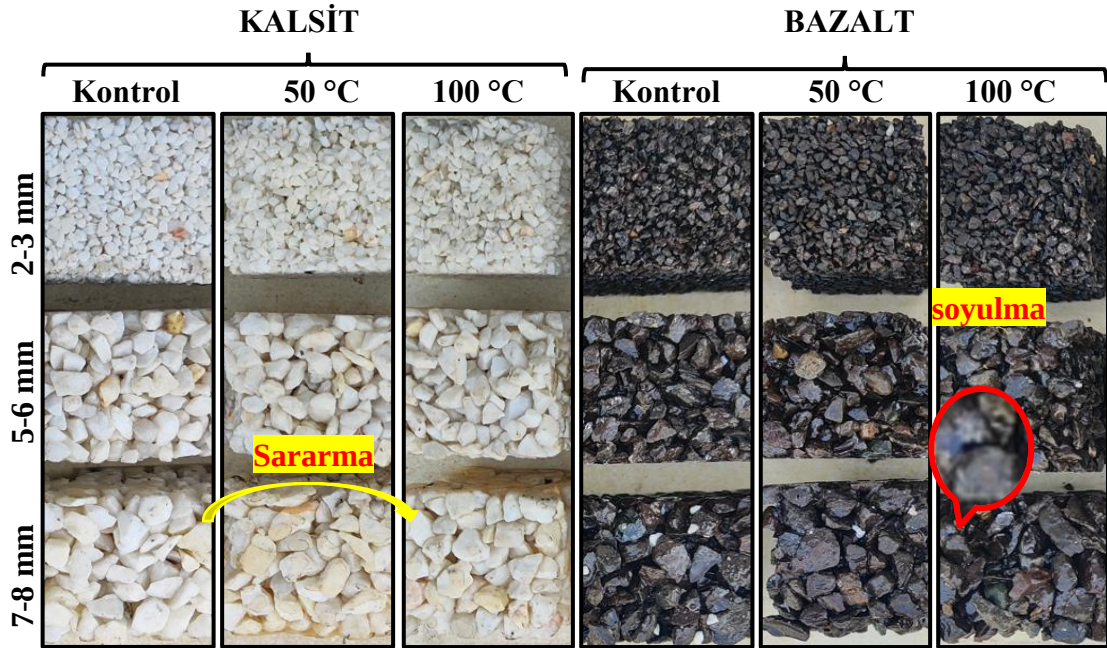
Agrega tane boyutu açısından incelendiğinde ise bu artış benzer sonuçlar görülmüştür. Sıcaklık artışıyla birlikte reçine-agrega arayüzeyinde mikro çatlakların oluşması ve bu çatlakların birleşmesi, bağlayıcı ve agregaların ısıl genleşme katsayılarındaki farklılıklar nedeniyle arayüzeyde gevşemeler oluşmuştur. Literatürde de benzer şekilde, sıcaklık artışı ile polimer esaslı bağlayıcılarda ısıl genleşme nedeniyle arayüzey boşluklarının arttığı ve bunun da boşluk oranında artışa neden olduğu ifade edilmektedir (Bennett ve Luscher, 2018). Agreg a yüzeyindeki soyulmalar, özellikle yüksek sıcaklıkların agreg a ve bağlayıcı arasındaki bağları zayıflattığı durumlarda daha belirgin hale gelmiştir. Bu durum, boşluk oranlarının sıcaklığa duyarlı olarak artmasına yol açmıştır. Polimer bağlayıcıların camsı geçiş sıcaklığı altında mekanik dayanımlarını korumalarına rağmen, artan sıcaklıkta reçine içinde bağ yapılarının rijitliğinin azalması, boşluk oranındaki artışta etkili olmuştur.

Polyester bağlayıcılı PPC numunelerin geçirimsizlik katsayısı-sıcaklık artışı ilişkisi Şekil 4.52’de verilmiştir. Şekil 4.52 incelendiğinde sıcaklık artışı ile geçirimsizlik katsayıları tüm agreg a tür ve boyutları için azaldığı görülmüştür. Bu azalma, 50 °C’de % 6’ya ulaşırken, 100 °C’ye ulaşıldığında kalsit agreg ası içeren numunelerde % 15, bazalt agreg ası içeren numunelerde % 12 oranında bir düşüş kaydedilmiştir. Farklı agreg a tane boyutları arasında geçirimsizlik katsayısındaki azalma benzer eğilimler göstermiştir.



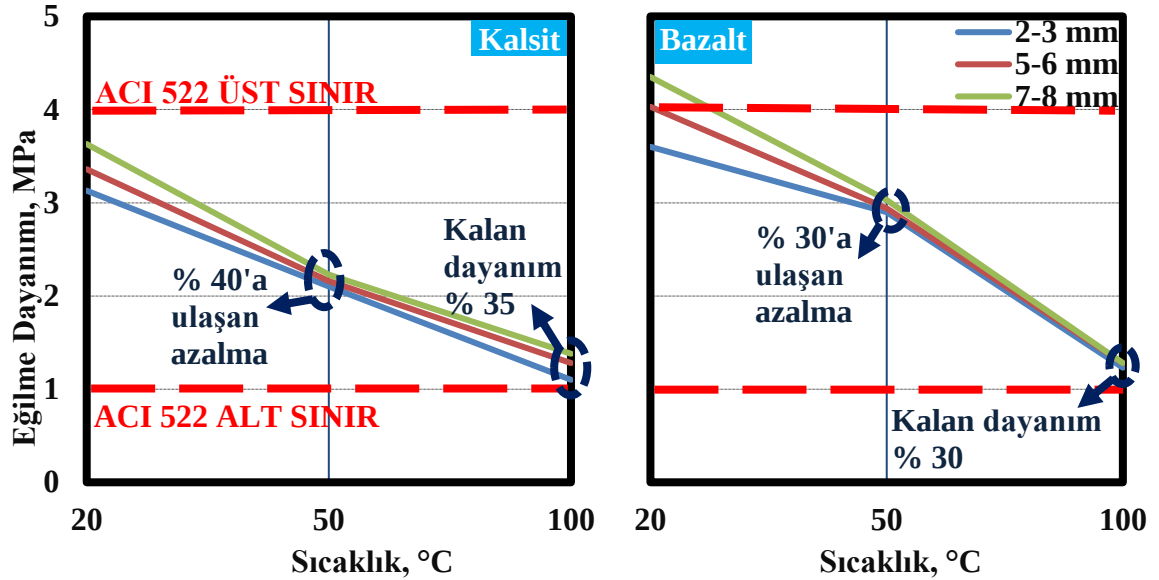
Şekil 4.52. Sıcaklık etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin geçirimsizlik değerleri

Sıcaklık artışı ile reçinenin camsı geçiş sıcaklığına yaklaşması durumunda malzeme rijitliğinde azalma ve bağlanma özelliklerinde zayıflama oluşabilir. Bu etkiler, numune içerisinde agregaların konum değiştirmesi ve yüzeyde oluşan soyulmalarla birleşerek geçirimsizlikte azalmalar görülmesine neden olmaktadır.



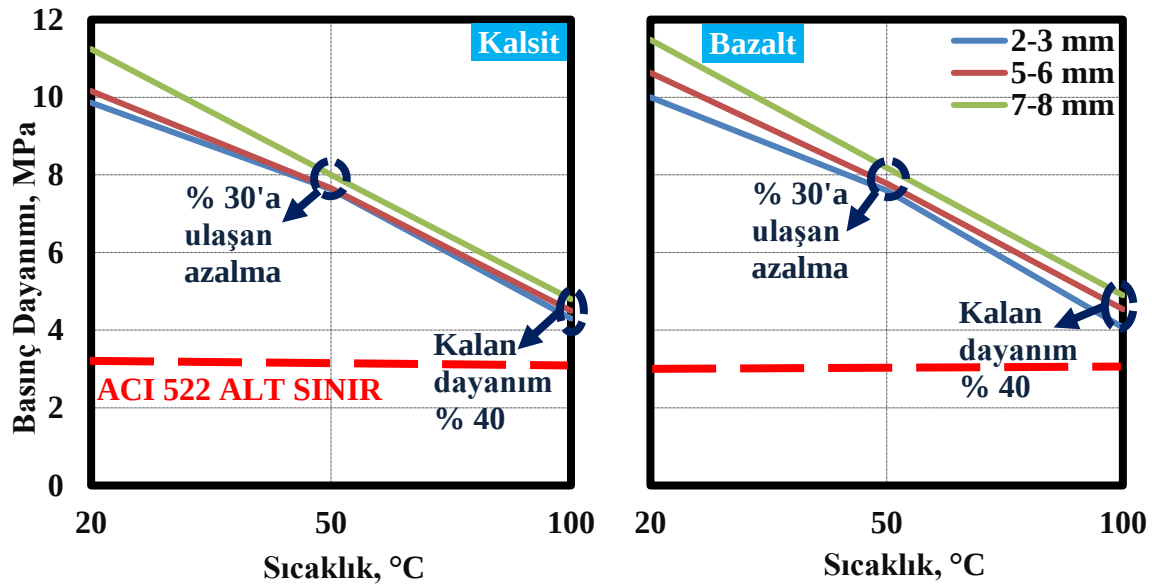
Şekil 4.53. Sıcaklık etkisinde polyester bağlayıcılı numunelerin değişimleri

Şekil 4.53, sıcaklık etkisi altında polyester bağlayıcılı numunelerde gerçekleşen değişimleri göstermektedir. Farklı agrega tane çaplarına (7-8 mm, 5-6 mm, 2-3 mm) sahip numuneler, kontrol (sıcaklık etkisinde kalmamış), 50 °C ve 100 °C ortam sıcaklıklarında incelenmiştir. Sıcaklık artışıyla birlikte polyester reçinelerde sararma ve soyulma gibi fiziksel değişimler gözlemlenmiştir. Sararma, bağlayıcının ısı oksidasyonuna uğraması sonucu oluşurken, 100 °C’de bu etkinin daha belirgin hale geldiği görülmüştür. 7-8 mm kalsit numunelerde 79*9*2 olan L*a*b değeri 100 °C sıcaklıkta bekletildikten sonra 74*11*15 olarak ölçülmüştür. Sarı renk tonunu ifade eden b değeri 2’den 15’e yükselmiştir. Soyulma miktarları ise hem sıcaklık seviyesi hem de agrega türüne bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Kalsit agregalı numunelerde soyulma daha fazla görülürken, bazalt agregalı numunelerde bu etkiler daha sınırlı kalmıştır. Sıcaklık artışıyla polyester bağlayıcının kovalent bağ yapısında zayıflama ve şekil değiştirme rijitliğinde azalma gerçekleşirken, bu durum bağlayıcı ile agrega arasındaki etkileşimin zayıflamasına ve fiziksel değişimlerin artmasına neden olmuştur. Özellikle bazalt agregalı numuneler, sıcaklık etkisi karşısında daha dayanıklı bir yapı sergileyerek fiziksel bozulmaları sınırlı tutmuştur. Bu bulgular, polyester reçinelerin ısı kararlılığının sınırlı olduğunu ve sıcaklık artışıyla fiziksel performanslarının belirgin şekilde değiştiğini göstermektedir.



Şekil 4.54. Sıcaklık etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin eğilme dayanımı değerleri

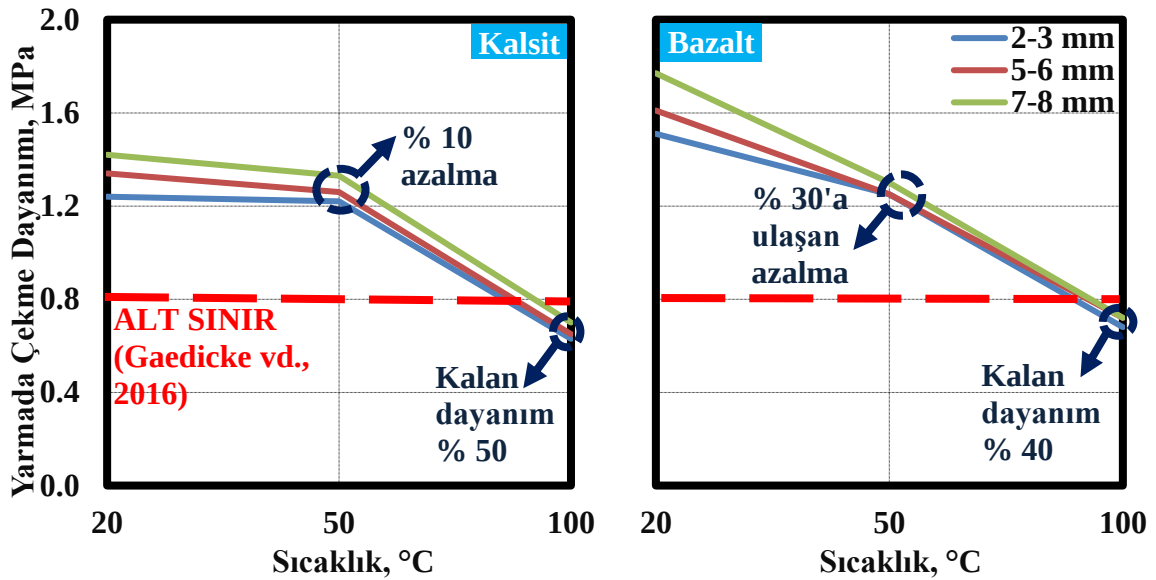
Şekil 4.54, epoksi bağlayıcılı PPC'lerin ortam sıcaklığı artışı ile eğilme dayanım değişimlerini göstermektedir. Ortam sıcaklığı arttıkça tüm numunelerde eğilme dayanımlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Sıcaklık 50 °C'ye ulaştığında, kalsit agregası içeren numunelerde eğilme dayanım kaybı % 40'a, bazalt agregası içeren numunelerde ise % 30'a ulaşmıştır. Sıcaklık 100 °C'ye çıktığında kalsit agregalı numunelerde dayanım kaybı % 65'e, bazalt agregalı numunelerde ise % 70'e kadar yükselmiştir. Agregatane çapı açısından incelendiğinde, sıcaklık artışına bağlı eğilme dayanım kaybının, 2-3 mm agregatane çapına sahip numunelere göre, 7-8 mm agregatane çapına sahip numunelerde % 5 daha fazla olduğu belirlenmiştir. Bu sıcaklık seviyelerinde yapılan deneylerde, numunelerin sıcaklığını kaybetmeden yük uygulanması nedeniyle, özellikle eğilme etkisinde yükün uygulandığı orta noktada, agregalar arasında bağlayıcı reçinenin şekil değiştirmeye karşı koyamaması sonucunda orta noktadan ayrılma şeklinde kırılmalar gerçekleşmiştir. Bu durum, epoksi bağlayıcının sıcaklık artışıyla rijitliğini kaybettiğini ve eğilme dayanımındaki azalmayı etkilediğini göstermektedir.



Şekil 4.55. Sıcaklık etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin basınç dayanımı değerleri

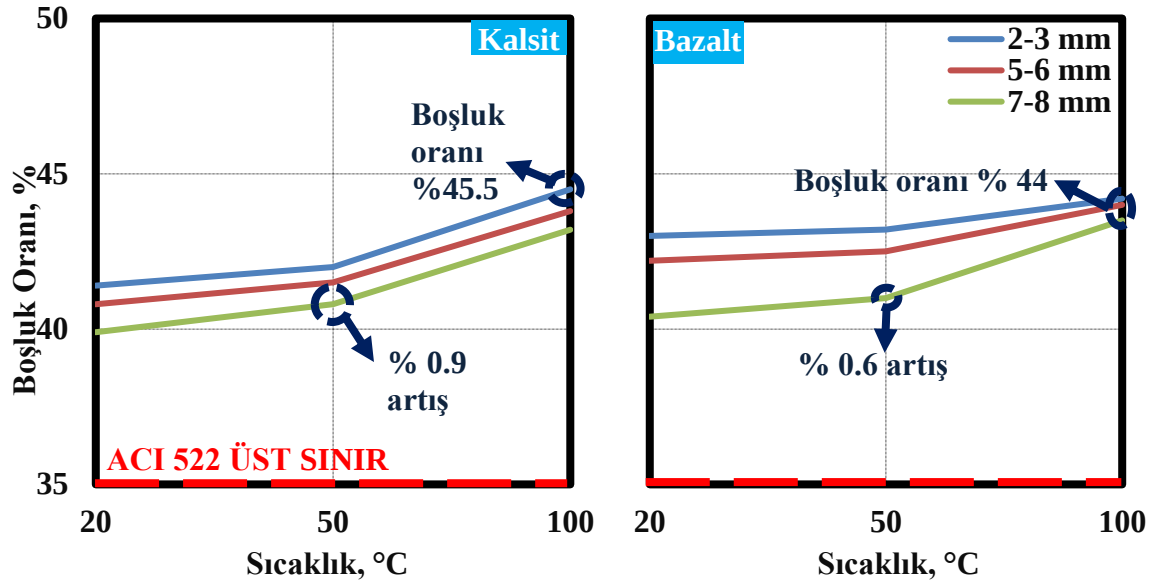
Şekil 4.55, sıcaklık etkisi altında epoksi bağlayıcılı geçirimli betonların basınç dayanımındaki değişimleri göstermektedir. İncelemeler, tüm agregatür ve boyutlarında sıcaklık artışının basınç dayanımını azalttığını ortaya koymuştur. Kalsit ve bazalt agregalar benzer davranış göstermiş, dayanım kayıpları 50°C'de %30, 100°C'de ise %60'a ulaşmıştır.

Agrega tane boyutu açısından bakıldığında, en az etkilenme % 56 ile 2-3 mm tane çapına sahip numunelerde, en fazla düşüş ise % 60 ile 7-8 mm tane çapına sahip numunelerde gözlenmiştir. Epoksi bağlayıcılı PPC numunelerinde, sıcaklık artışı nedeniyle dayanım kaybı oluşsa da, bu numunelerin dayanım değerleri polyester bağlayıcılı PPC numunelere göre daha yüksek olup, ACI 522’de belirtilen alt sınırın üzerinde kalmıştır. Camsı geçiş sıcaklığının altında deneyler yapılmış olmasına rağmen, reçine polimer bağlarının ve agrega-reçine ara yüzeyindeki bağ kuvvetlerinin zayıflaması, numunelerin kısmen gevrek şekilde kırılmasına neden olmuştur. Bu durum, epoksi bağlayıcının ısı etkiler altında dayanım kaybına karşı poliestere göre daha dirençli olduğunu göstermektedir.



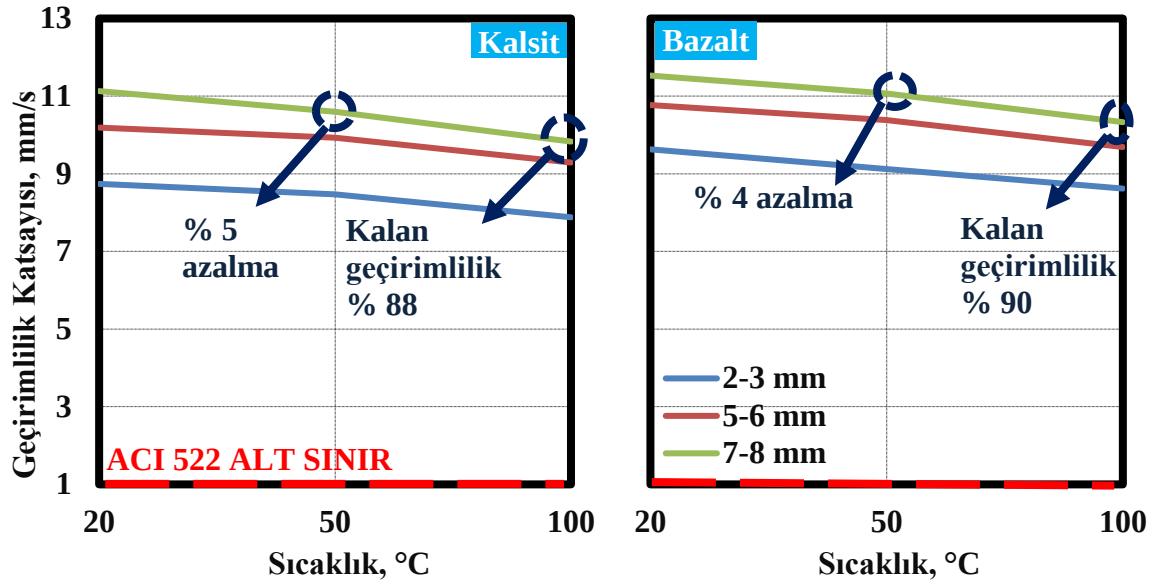
Şekil 4.56. Sıcaklık etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin y. çekme dayanımı değerleri

Artan sıcaklık etkisi ile değişen yarmada çekme dayanımları Şekil 4.56’da verilmiştir. Şekil incelendiğinde sıcaklık etkisinde yarmada çekme dayanımlarının tüm agrega tür ve boyutları için azaldığını ortaya koymuştur. Bu azalma, 50 °C’de bazalt içeren numunelerde % 30, kalsit agregası içeren numunelerde % 10 olarak gerçekleşirken, 100 °C’de bazalt agregası içeren numunelerde % 60, kalsit içeren numunelerde ise % 50’ye ulaşmıştır. Agregatane çapına bağlı olarak dayanımlar arasındaki fark, sıcaklık arttıkça giderek azalmış ve 100 °C’de tüm tane çapları için benzer dayanımlar elde edilmiştir. Agregatürü ve konumunun yarmada çekme dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olmasına rağmen, sıcaklık artışı ile bağlayıcı reçinenin rijitliğinin azalması ve agrega-bağlayıcı arayüz bağ yapısının zayıflaması dayanım düşüşünde etkili olmuştur.



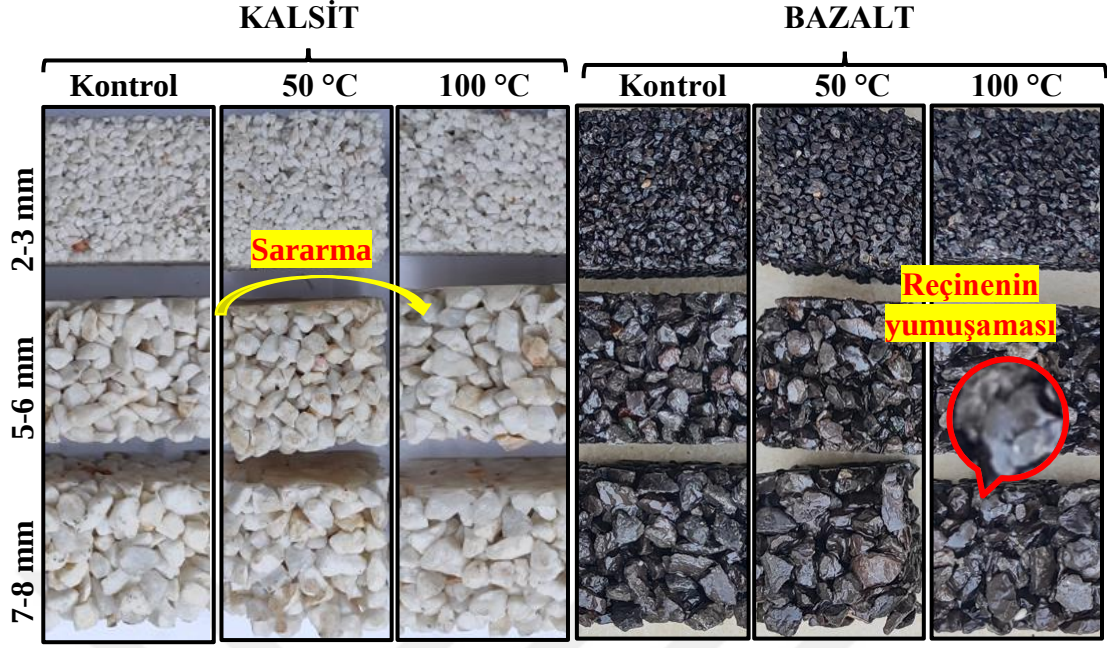
Şekil 4.57. Sıcaklık etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin boşluk oranı değerleri

PPC numunelerin sıcaklık artışı ile değişen boşluk oranları Şekil 4.57’de verilmiştir. Şekil 4.57 incelendiğinde, sıcaklık artışıyla birlikte tüm numunelerde boşluk oranlarının arttığı gözlemlenmiştir. Bu artış, 50 °C’de % 0.9’a, 100 °C’de ise % 3.3’e ulaşmıştır. Kalsit ve bazalt agregalı numunelerde sıcaklık artışına bağlı olarak benzer davranış göstermiştir. Agregatane boyutu açısından değerlendirildiğinde, 2-3 mm agregatane içeren numunelerde, 7-8 mm agregatane içeren numunelere göre boşluk oranındaki değişim % 2’ye ulaşan oranda daha düşük gerçekleşmiştir. Küçük agregatane boyutlarının daha iyi bir dağılım sağlayarak reçine ile daha güçlü bir bağ oluşturduğu ve bu durumun boşluk oranındaki artışı sınırladığı düşünülmektedir. Sıcaklık etkisiyle reçinenin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde oluşan değişiklikler de boşluk oranındaki artışın temel nedenleri arasında yer almaktadır. Artan sıcaklık, reçinenin rijitliğini azaltarak, agregatane-reçine arayüzünde mikro ölçekte ayrışmalara ve boşluk oluşumlarına neden olmuştur. Ayrıca, sıcaklık etkisiyle oluşan ısıl genleşme farklılıkları, agregatane parçalarının yer değiştirmesine ve numune içerisindeki bağ yapısının zayıflamasına yol açmıştır. Bu bulgular, özellikle sıcaklık artışının PPC numunelerin mikro yapısını bozarak daha fazla boşluk oluşumuna neden olduğunu, bu durumun hem reçine bağlayıcının hem de agregatane boyutlarının sıcaklığa karşı gösterdiği performansla doğrudan ilişkili olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.58. Sıcaklık etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin geçirimlilik değerleri

Epoksi bağlayıcılı PPC numunelerin geçirimlilik katsayısı-sıcaklık artışı ilişkisi Şekil 4.58’de verilmiştir. Şekil 4.58 incelendiğinde sıcaklık artışı ile geçirimlilik katsayıları tüm numune türleri için azaldığı görülmüştür. Bu azalma 50 °C’de % 5’e ulaşırken, 100 °C’de % 12’ye ulaşan değerlerde olduğu görülmüştür. Agrega türü ve agregatane çapları açısından incelendiğinde, sıcaklık artışıyla geçirimlilik katsayılarında benzer davranış sergilenmiştir. Sıcaklık artışıyla birlikte reçine yapısında, özellikle agregaları tutan bölümlerde oluşan ayrılmalar ve deformasyonlar, beton içerisindeki mikro kanalların tıkanmasına yol açabilmektedir. Bu durum, numune içinde geçirgenliği azaltan bir faktör olarak öne çıkmıştır. Ayrıca sıcaklığın etkisiyle, reçine ile bağlı agregaların mikro düzeyde yer değiştirmesi, geçirgenliği daha da azaltmıştır. Bununla birlikte, epoksi bağlayıcılı PPC numuneler, geçirimlilik katsayıları açısından ACI 522 standardında belirtilen alt sınırın 7 kat üzerinde sonuçlar vermiştir. Bu durum, epoksi bağlayıcının üstün bir performans sergilediğini göstermektedir. Polyester reçine bağlayıcılı PPC numunelere göre, epoksi bağlayıcılı numunelerde % 10’a ulaşan oranda daha yüksek geçirimlilik değerleri elde edilmiştir. Bu fark, epoksi bağlayıcının kimyasal yapısının, özellikle yüksek sıcaklıklarda, agregat ile daha etkili bir bağ kurabilmesinden kaynaklanmaktadır. Epoksi reçine, agregaların konumunu daha kararlı bir şekilde koruyarak, sıcaklık etkisi altında geçirgenliği oldukça sabit tutmaktadır.



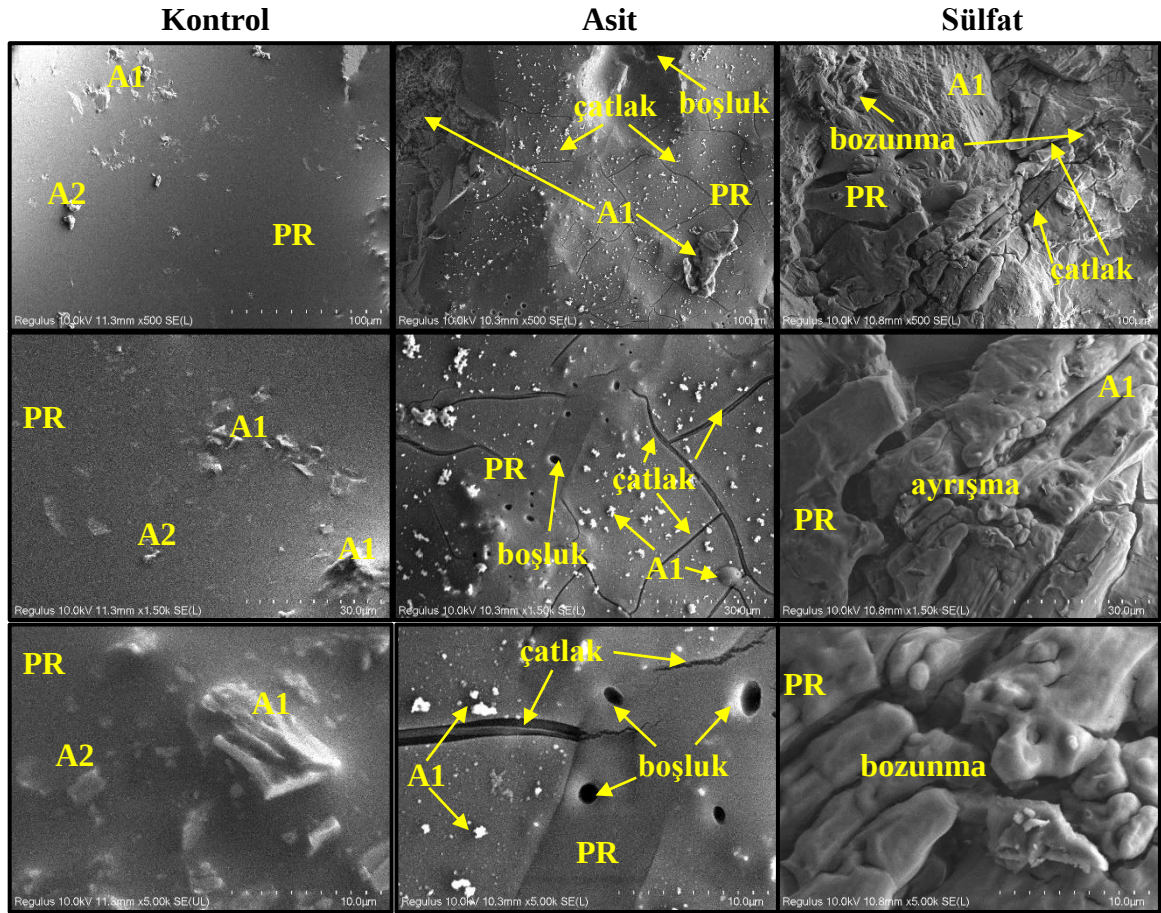
Şekil 4.59. Sıcaklık etkisinde epoksi bağlayıcılı numunelerin değişimleri

Şekil 4.59, epoksi bağlayıcılı numunelerdeki sıcaklık etkisi altında görsel değişimlerini göstermektedir. Yapılan incelemelerde, epoksi bağlayıcının sıcaklık artışıyla birlikte fiziksel ve mekanik özelliklerinde değişimler yaşadığı görülmüştür. Fiziksel değişimler, reçine yapısının ısıl kararlılığının azalmasıyla ilişkilendirilmiştir. Sararma, epoksi reçinenin kimyasal bağlarının yüksek sıcaklıklarda bozularak moleküler seviyede değişikliklere uğramasının bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Farklı agrega türleri arasında gözlemlenen davranış farklılıkları, özellikle bağlayıcı-agrega arayüzündeki ısıl dayanımla ilişkilidir. Bazalt agregası içeren numunelerde, arayüz bağlarının sıcaklık etkisiyle daha dayanıklı kaldığı ve yumuşamanın kalsit agregalı numunelere göre daha sınırlı olduğu gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, kalsit agregalı numunelerde bağlayıcı yumuşaması ve sararması daha belirgin hale gelmiş, bu da mekanik dayanımlarda daha fazla kayba neden olmuştur. Sonuç olarak, epoksi bağlayıcılı numunelerde sıcaklık artışı, bağlayıcı özelliklerinin yanı sıra bağlayıcı-agrega etkileşimlerini de etkileyerek numunelerin mekanik ve fiziksel performansında değişikliklere yol açmıştır.

4.3. Mikroyapı İncelemeleri

4.3.1. Kimyasal etkiler altında kalan numunelerin mikroyapısı

Şekil 4.60’da reçine olarak polyester ve agrega olarak kalsit kullanılarak üretilen kontrol numuneleri ile 180 gün boyunca asit ve sülfat etkisinde kalan numuneleri mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



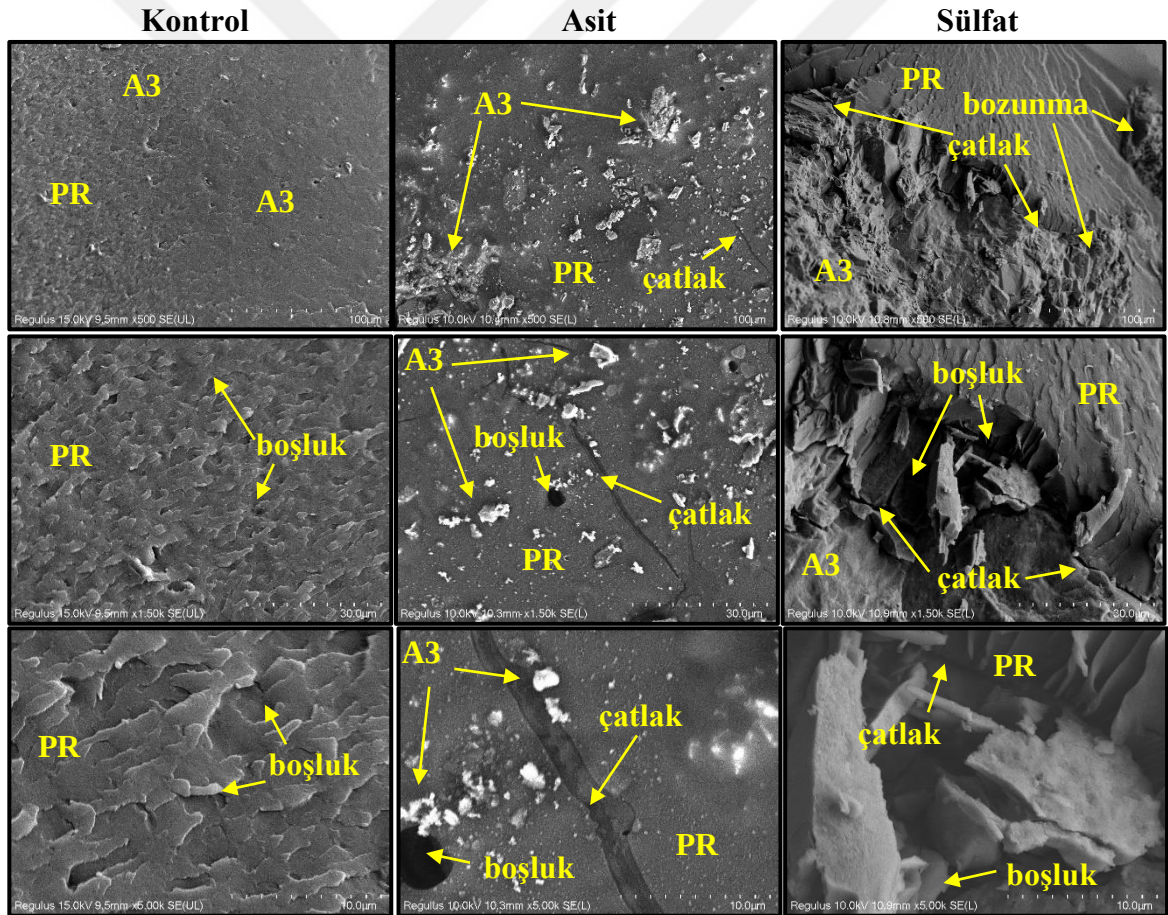
Şekil 4.60. Polyester-kalsit numunelerin kimyasal etkiler altında FE-SEM görüntüleri

Bu görüntüler üzerinde polyester reçine (PR), kalsit (A1) ve dolomit (A2) olarak belirtilen bağlayıcı ve agregaların element analizleri Çizelge 4.1’de verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde polyester ile bağlanmış kalsit agregalı PPC numunelerinde asit etkisinde yüzeyde mikro düzeyde çatlakların ve boşlukların oluştuğu, çatlakların dallandığı görülmüştür. Sülfat etkisi altında ise reçine tabakasında belirgin bozunma ve ayrışma gerçekleşmiştir. Bu değişimler, kalsitin kimyasal reaksiyonlara karşı duyarlılığını ve polyester reçinesinin asidik ve sülfatlı ortamlara sınırlı dayanımını vurgulamaktadır.

Çizelge 4.1. Polyester-kalsit numunelerin ısı etkiler altında SEM analizleri

Element	Kontrol			Asit		Sülfat	
Wt, %	PR	A1	A2	PR	A1	PR	A2
C	64.5	36.8	43.6	56.36	16.85	71.78	17.44
O	35.5	42.2	41.7	43.64	41.77	28.22	46.03
Ca	-	21.0	8.88	-	41.38	-	22.65
Mg	-	-	5.79	-	-	-	13.88

Şekil 4.61’de polyester ve bazalt kullanılarak üretilen kontrol numuneleri ile 180 gün boyunca asit ve sülfat etkisinde kalan numuneleri mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler üzerinde PR ve bazalt (A3) olarak belirtilen bağlayıcı ve agregaların element analizleri Çizelge 4.2.’de belirlenmiştir.



Şekil 4.61. Polyester-bazalt numunelerin kimyasal etkiler altında FE-SEM görüntüleri

Bu görüntüler incelendiğinde polyester bağlayıcı bazalt agregası kullanılması durumunda ise oluşan çatlakların ve boşluk miktarlarının azaldığı, boşluk çapının arttığı görülmüştür. Asit etkisi altında, mikro çatlakların ve boşlukların miktarının azaldığı, ancak boşluk çaplarının arttığı gözlenmiştir. Sülfat etkisinde reçine tabakasında deformasyon ve yapısal bozulma oluşmuştur. Bazalt agregası, kalsite göre kimyasal etkiler altında daha az hasar görmüş ve yapısal bütünlüğünü koruma potansiyeli sergilemiştir.

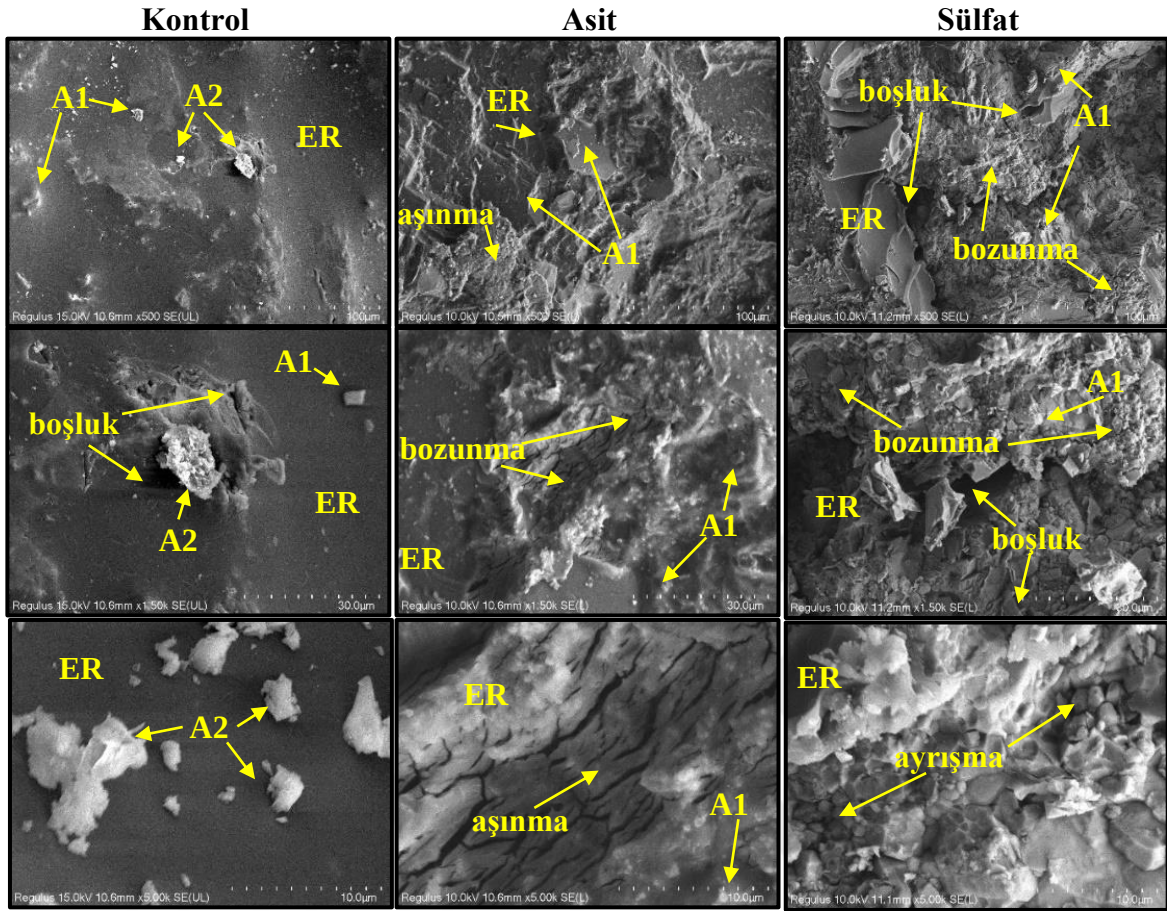
Çizelge 4.2. Polyester-bazalt numunelerin ısı etkiler altında SEM analizleri

Element	Kontrol		Asit		Sülfat	
Wt, %	PR	A3	PR	A3	PR	A3
C	68.08	37.15	70.35	30.52	76.56	6.84
O	31.92	42.73	29.65	33.66	23.44	28.53
Ca	-	-	-	-	-	10.38
Mg	-	-	-	4.98	-	4.98
Na	-	1.85	-	-	-	3.08
Si	-	11.60	-	25.65	-	33.15
Fe	-	-	-	1.23	-	1.23
Al	-	4.68	-	3.95	-	18.02
K	-	2.00	-	-	-	-

Şekil 4.62’de epoksi reçine ve kalsit kullanılarak üretilen kontrol numuneleri ile 180 gün boyunca asit ve sülfat etkisinde kalan numuneleri mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Mikroyapılar üzerinde epoksi reçinesi (ER), A1 ve A2 olarak belirtilen bağlayıcı ve agregaların element analizleri Çizelge 4.3.’de verilmiştir. Bu görüntüler incelendiğinde bağlayıcı olarak epoksi kullanılan numunelerde kalsit agregası içermesi durumunda asit etkisinde reçine tabakasında mikro çatlaklar, boşluklar ve yüzey ayrışması gerçekleşmiştir. Sülfat etkisiyle yüzeyde aşınma ve ayrışmanın daha da yoğunlaştığı gözlenmiştir. Epoksi reçinesi, polyester reçinesine göre kimyasal ortamlara karşı daha iyi bir dayanıklılık göstermiştir.

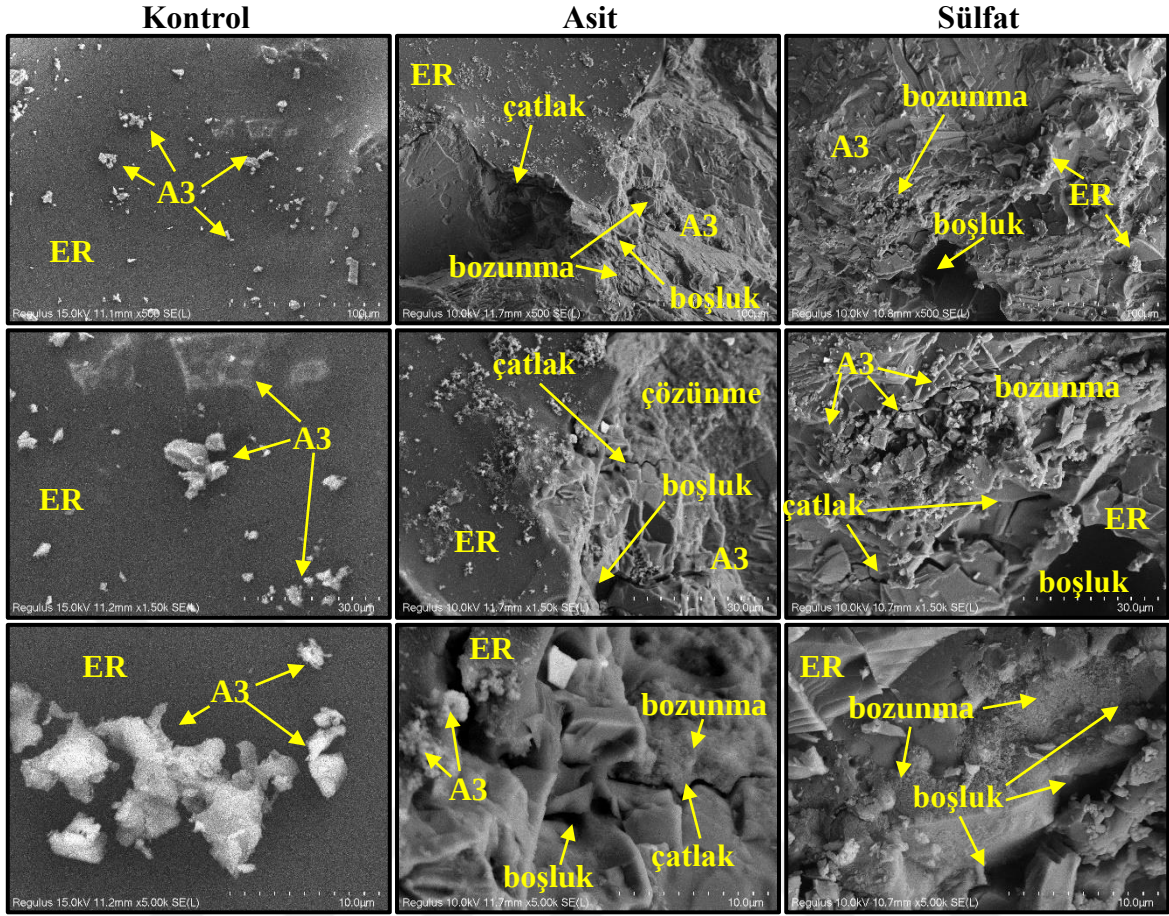
Çizelge 4.3. Epoksi-kalsit numunelerin ısı etkiler altında SEM analizleri

Element	Kontrol			Asit		Sülfat	
Wt, %	ER	A1	A2	ER	A1	ER	A2
C	70.66	25.49	23.24	62.71	33.68	66.67	12.82
O	29.34	48.65	52.21	37.29	31.56	33.33	14.84
Ca	-	14.91	24.55	-	34.76	-	72.34
Mg	-	10.95	-	-	-	-	-



Şekil 4.62. Epoksi-kalsit numunelerin kimyasal etkiler altında FE-SEM görüntüleri

Şekil 4.63’de epoksi reçine ve kalsit kullanılarak üretilen kontrol numuneleri ile kimyasal etkiler altında bırakılan numunelerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler üzerinde bağlayıcı ve agrega olarak tanımlanan PR ve A3 bölgelerinin elemental analizleri, Çizelge 4.4’te verilen EDS analiz sonuçları ile belirlenmiştir. Bağlayıcı olarak epoksi kullanılan numunelerde bazalt agregası kullanılması durumunda asit etkisinde yüzeyde ayrışma gözlenmiş; bu ayrışmanın, sonucunda reçine tabakasında mikro çatlaklar oluşurken, boşlukların artış gösterdiği gözlenmiştir. Epoksi kullanılması durumunda malzeme yüzeyinde polyester kullanımına göre asit etkisinde mikro düzeyde daha pürüzlü yapılar oluştuğu görülmüştür. Sülfat etkisi altındaki numunelerde ise yüzeydeki pürüzlerin daha belirginleştiği ve bazalt agregalı numunelerin kimyasal hasarlara karşı daha dirençli olduğu anlaşılmaktadır. Bazalt agregalı numunelerdeki bu yüksek direnç, agreganın kimyasal saldırılara karşı daha stabil bir performans sergilemesiyle ilişkilendirilmektedir.



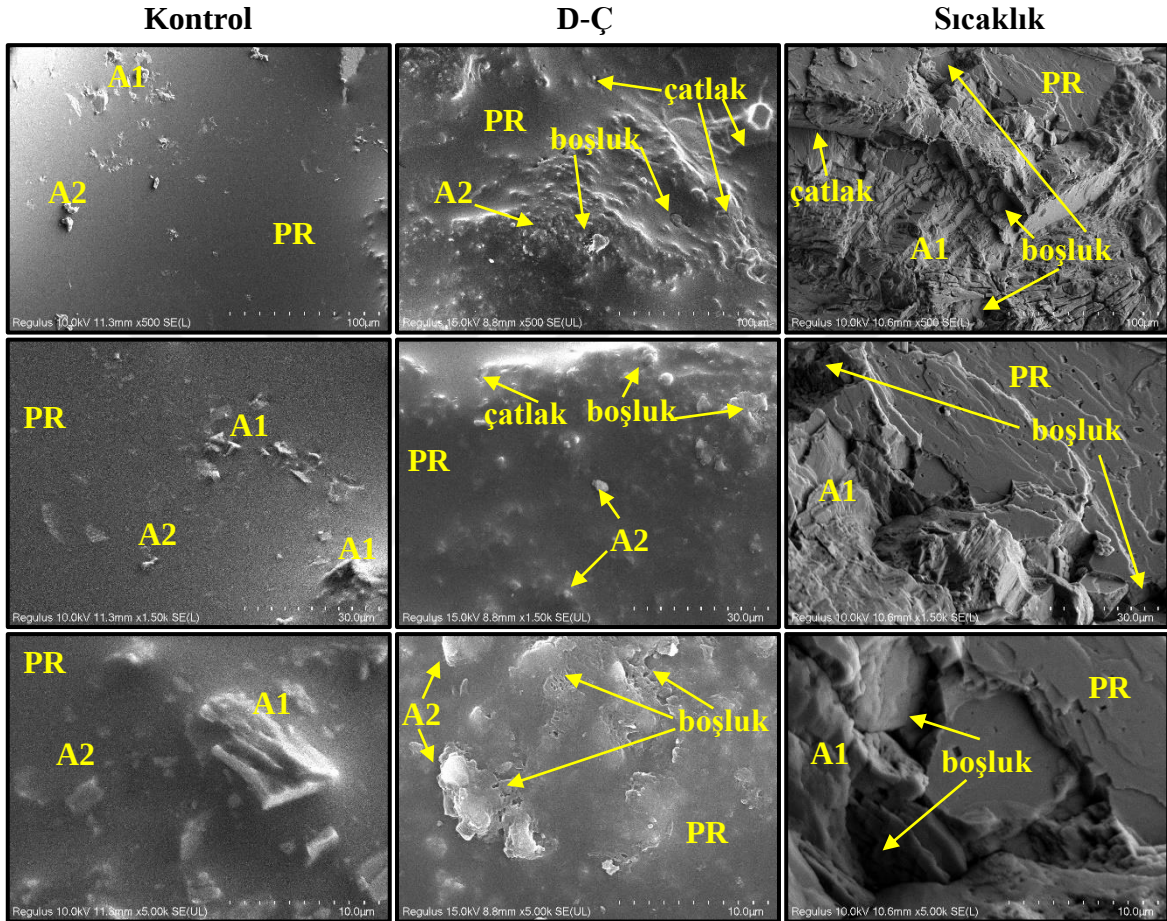
Şekil 4.63. Epoksi-bazalt numunelerin kimyasal etkiler altında FE-SEM görüntüleri

Çizelge 4.4. Epoksi-bazalt numunelerin kimyasal etkiler altında SEM analizleri

Element	Kontrol		Asit		Sülfat	
Wt, %	ER	A3	ER	A3	ER	A3
C	75.16	19.01	60.09	11.92	47.72	-
O	24.84	45.60	39.91	43.67	16.53	29.64
Ca	-	-	-	-	-	-
Mg	-	-	-	3.96	-	3.96
Na	-	1.54	-	-	-	3.64
Si	-	24.57	-	30.33	26.32	43.74
Fe	-	-	-	2.11	-	-
Al	-	3.25	-	8.01	9.43	13.06

4.3.2. Isıl etkiler altında kalan numunelerin mikroyapısı

Şekil 4.64'te polyester reçine ve kalsit kullanılarak üretilen kontrol numuneleri, 56 çevrim D-Ç etkisinde kalan numuneler ile 100°C sıcaklık etkisinde bırakılan numunelerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir.



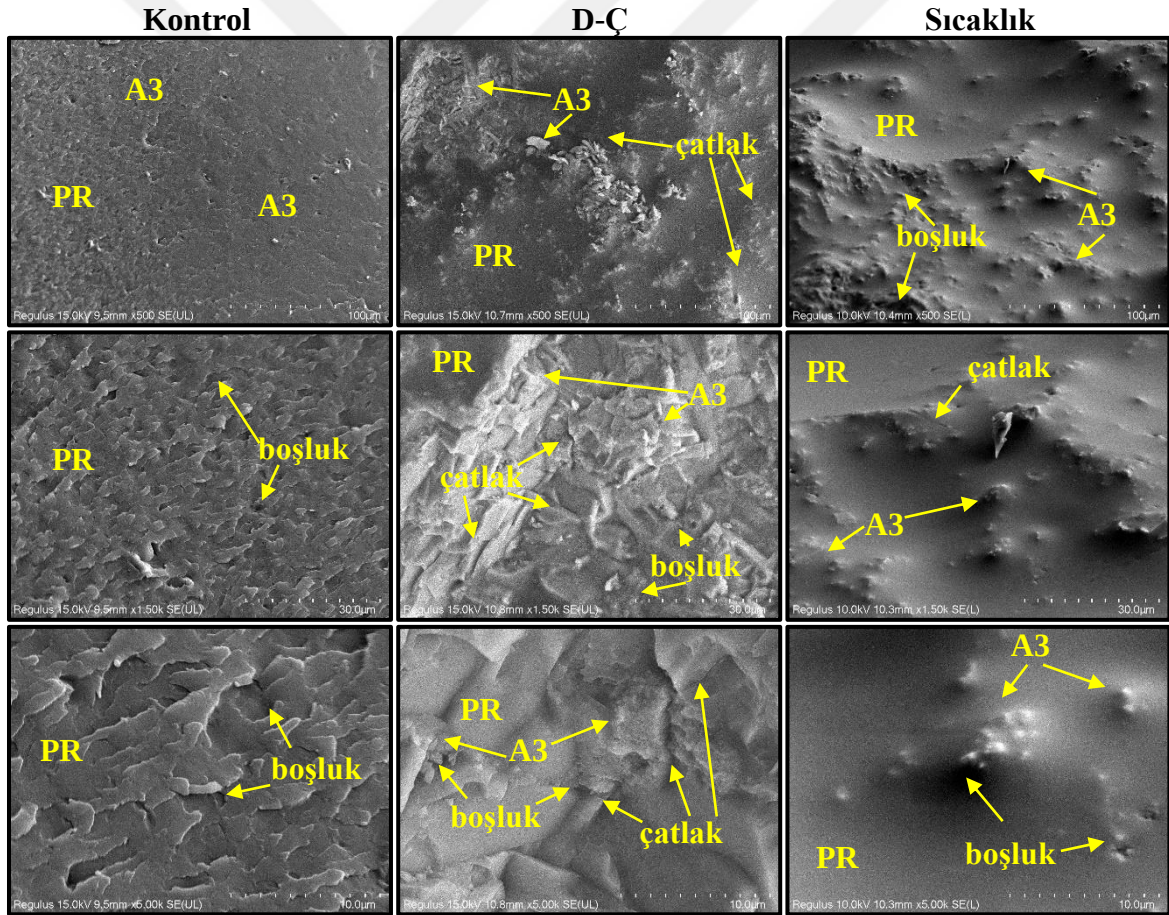
Şekil 4.64. Polyester-kalsit numunelerin ısıl etkiler altında FE-SEM görüntüleri

Bu görüntüler üzerinde PR, A1 ve A2 olarak belirtilen bağlayıcı ve agregaların element analizleri Çizelge 4.5'te verilmiştir. D-Ç etkisinde yüzeyde mikro çatlaklar ve boşluklar oluşmuş, yüksek sıcaklık etkisinde ise reçine ve agregası arasındaki bağ zayıflamış ve boşlukların belirginleştiği gözlenmiştir. Bu durum, polyester reçinesinin ısıl dayanıklılığının sınırlı olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.5. Polyester-kalsit numunelerinin ısı etkiler altında SEM analizleri

Element	Kontrol			D-Ç		Sıcaklık	
Wt, %	PR	A1	A2	PR	A2	PR	A1
C	64.5	36.8	43.6	59.46	30.02	71.36	18.04
O	35.5	42.2	41.7	39.98	44.98	28.64	45.13
Ca	-	21.0	8.88	3.14	21.44	-	36.83
Mg	-	-	5.79	-	3.57	-	-

Şekil 4.65'te polyester reçine ve bazalt kullanılarak üretilen kontrol numuneleri ile 56 çevrim D-Ç etkisinde kalan numuneler ile 100°C sıcaklık etkisinde bırakılan numunelerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler üzerinde PR ve A3 olarak belirtilen bağlayıcı ve agregaların elemental analizleri Çizelge 4.6'da belirlenmiştir.

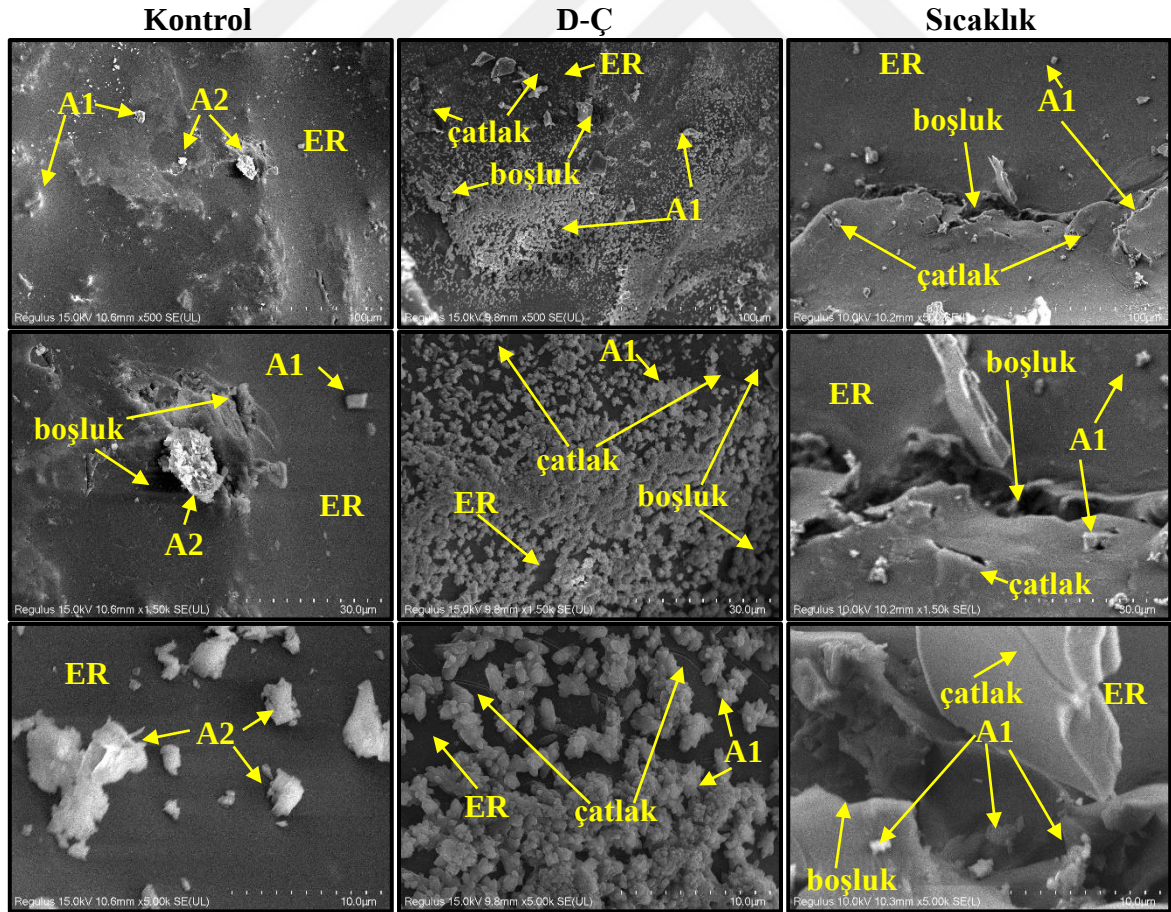


Şekil 4.65. Polyester-bazalt numunelerin ısı etkiler altında FE-SEM görüntüleri

D-Ç çevrimlerinde yüzeyde boşluklar ve mikro çatlaklar oluşurken, yüksek sıcaklık etkisiyle reçine ve agrega arasındaki bağ zayıflamış, boşlukların ve çatlakların arttığı gözlenmiştir. Bazaltın kalsite göre ısı dayanıklılığı daha yüksek bulunmuştur.

Çizelge 4.6. Polyester-bazalt numunelerin ısı etkiler altında SEM analizleri

Element	Kontrol		D-Ç		Sıcaklık	
Wt, %	PR	A3	PR	A3	PR	A3
C	68.08	37.15	60.38	32.17	66.07	28.62
O	31.92	42.73	39.62	32.26	33.93	36.43
Ca	-	-	-	5.01	-	-
Mg	-	-	-	0.60	-	-
Na	-	1.85	-	2.18	-	1.70
Si	-	11.60	-	17.83	-	21.73
Fe	-	-	-	-	-	-
Al	-	4.68	-	9.94	-	8.07
K	-	2.00	-	-	-	3.45

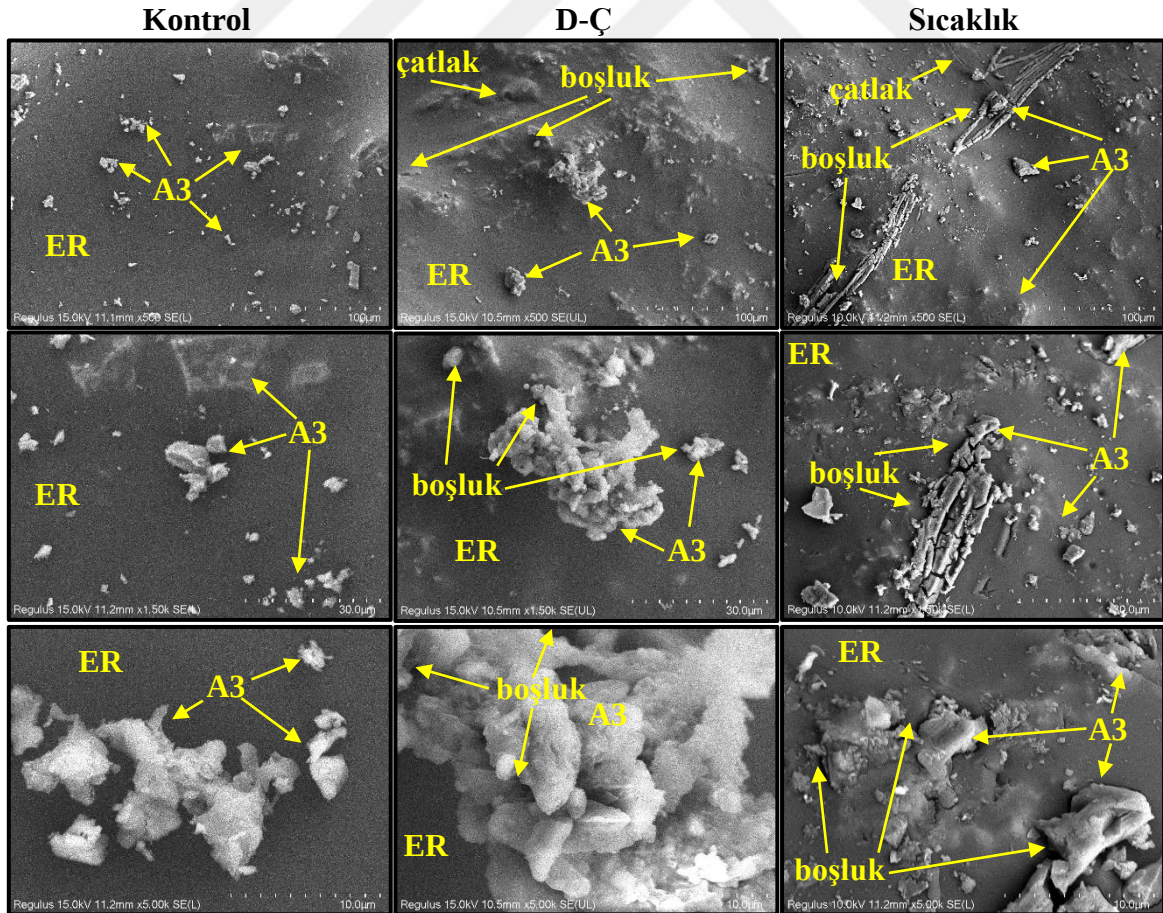


Şekil 4.66. Epoksi-kalsit numunelerin ısı etkiler altında FE-SEM görüntüleri

Şekil 4.66’da epoksi reçine ve kalsit kullanılarak üretilen kontrol numuneleri ile 56 çevrim D-Ç etkisinde kalan numuneler ile 100°C sıcaklık etkisinde bırakılan numunelerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Mikroyapılar üzerinde ER, A1 ve A2 olarak belirtilen bağlayıcı ve agregaların element analizleri Çizelge 4.7’de verilmiştir. D-Ç çevrimleri sırasında boşluk ve çatlaklar oluşmuş, yüksek sıcaklık etkisiyle epoksi reçine ve agrega bağında zayıflama gözlenmiştir. Ancak epoksi reçinesinin, polyester reçinesine göre daha az hasar gördüğü belirlenmiştir.

Çizelge 4.7. Epoksi-kalsit numunelerin ısı etkiler altında SEM analizleri

Element	Kontrol			D-Ç		Sıcaklık	
Wt, %	ER	A1	A2	ER	A2	PR	A2
C	70.66	25.49	23.24	73.23	22.91	81.50	12.34
O	29.34	48.65	52.21	26.77	51.74	18.50	33.19
Ca	-	14.91	24.55	-	22.06	-	38.26
Mg	-	10.95	-	-	3.29	-	16.20



Şekil 4.67. Epoksi-bazalt numunelerin ısı etkiler altında FE-SEM görüntüleri

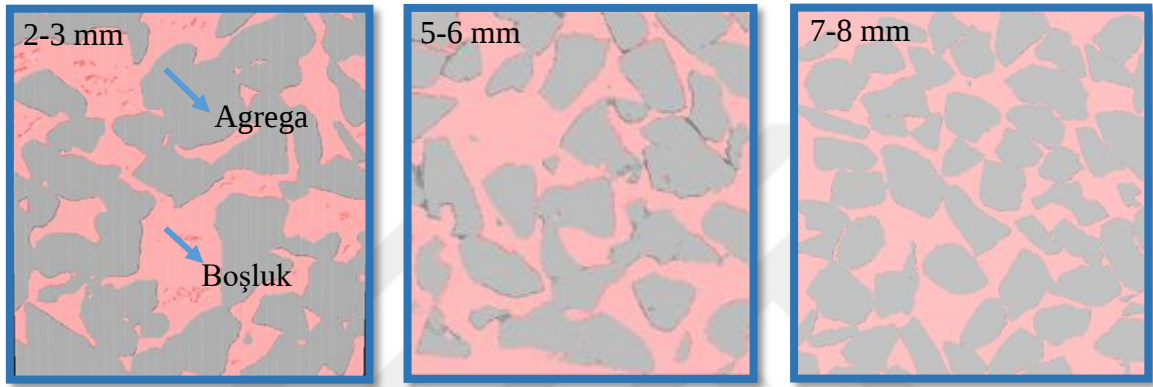
Şekil 4.67’de epoksi reçine ve bazalt kullanılarak üretilen kontrol numuneleri ile 56 çevrim D-Ç etkisinde kalan numuneler ile 100°C sıcaklık etkisinde bırakılan numunelerin mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Bu görüntüler üzerinde PR ve A3 olarak belirtilen bağlayıcı ve agregaların element analizleri Çizelge 4.8’de verilen EDS analiz verileri ile belirlenmiştir. D-Ç çevrimlerinde yüzeyde mikro çatlaklar ve boşluklar oluşmuş, sıcaklık etkisi altında ise epoksi reçinenin yumuşamasına bağlı olarak çatlaklar oluşmamış, ancak agregaların pürüzlü bir yüzey yapısının ortaya çıktığı gözlenmiştir. Bazalt agregası, ısı etkiler altında epoksi bağlayıcı ile daha uyumlu bir performans sergilemiştir.

Çizelge 4.8. Epoksi-bazalt numunelerin ısı etkiler altında SEM analizleri

Element	Kontrol		D-Ç		Sıcaklık	
Wt, %	ER	A3	ER	A3	ER	A3
C	75.16	19.01	72.96	9.12	81.82	7.09
O	24.84	45.60	27.04	48.21	18.18	37.60
Ca	-	-	-	-	-	-
Mg	-	-	-	-	-	17.27
Na	-	1.54	-	-	-	-
Si	-	24.57	-	24.85	-	18.98
Fe	-	-	-	9.41	-	-
Al	-	3.25	-	4.56	-	-
K	-	6.03	-	-	-	-

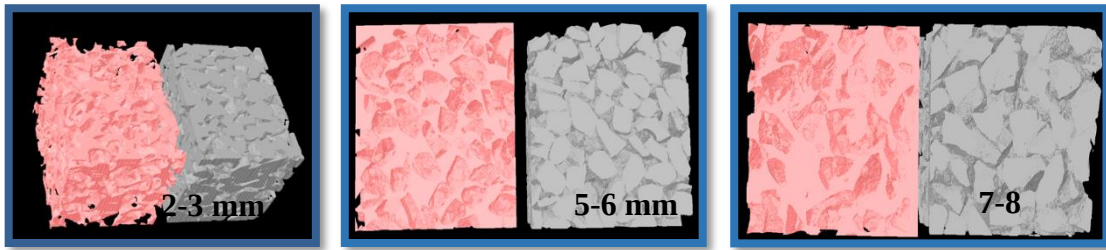
4.4. Mikro-BT ile 3B Analiz

Geçirimli polimer beton numuneleri üzerinde Mikro-BT taramaları sonucunda NRecon programı ile yapılandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Elde edilen kesitler üzerinde ilgilenilen alanlar ve hacimler belirlenmiştir. CTAn yazılımıyla gerçekleştirilen analizler sonucunda boşluk oranları elde edilmiş ve hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmaları sonucunda, 3B boşluk oranının gerçek boşluk oranını temsil ettiği gösterilmiştir.



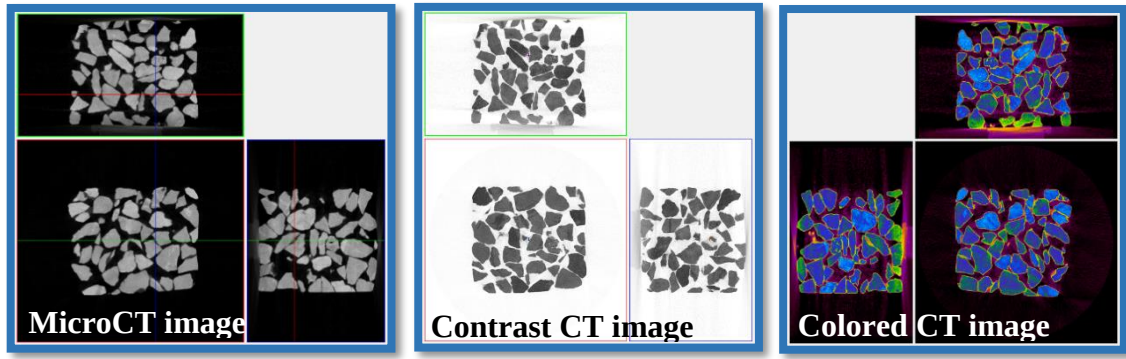
Şekil 4.68. Epoksi-bazalt numunelerinin 2B kesit görüntüleri (CT Dilimi)

Mikro-BT taramaları sonucunda elde edilen görüntüleri üzerinde, Şekil 4.68’de görüldüğü gibi, istenilen kesitteki yüzey boşluk alanı ve agrega alanı elde edilmektedir. Şekilde pembe alanlar numune kesitindeki boşlukları, gri alanlar ise agrega alanlarını göstermektedir.



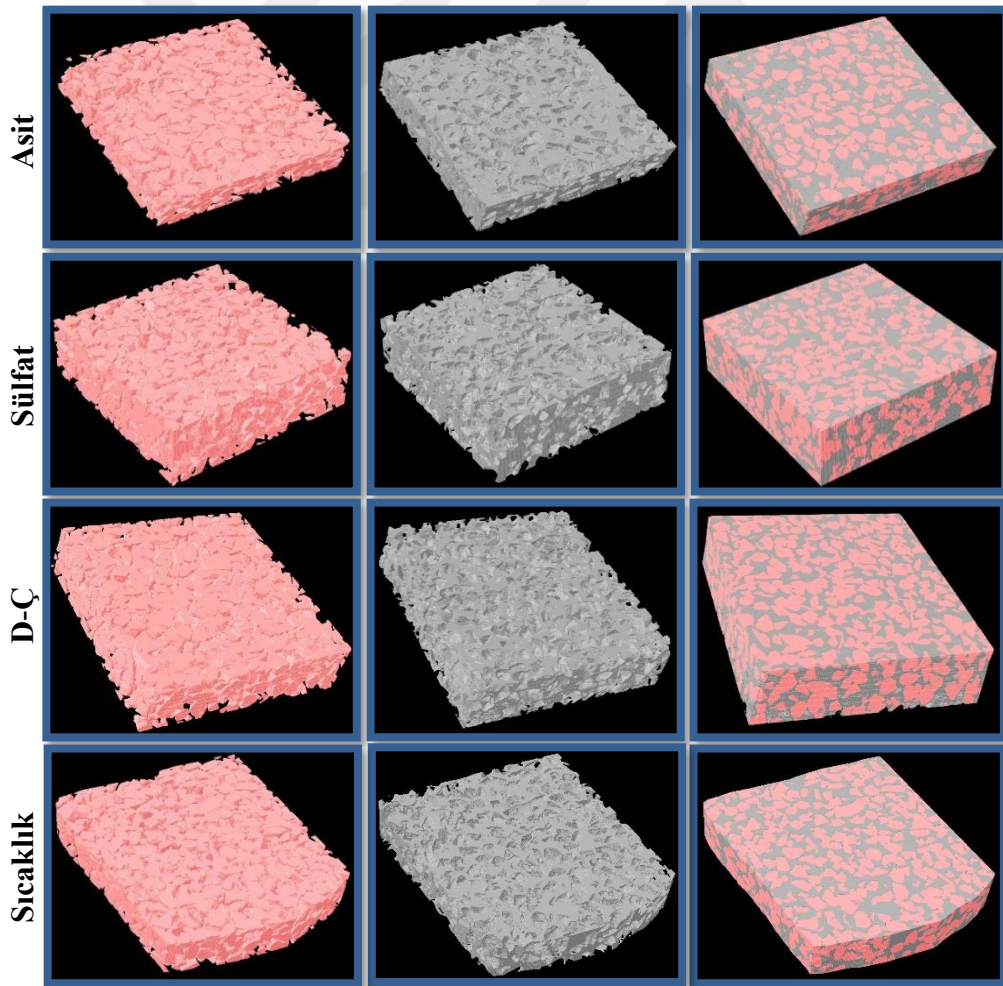
Şekil 4.69. Epoksi-bazalt numunelerinin 3B model görüntüleri

Mikro-BT çekimleri sonrası elde edilen görüntüler birleştirilerek üç boyutlu model görüntüleri elde edilmiş ve Şekil 4.69’da verilmiştir. Şekildeki pembe modeller numune içindeki boşlukların 3B modelini, gri model görüntüleri ise agregaların 3B modelini göstermektedir.



Şekil 4.70. Epoksi-bazalt (7-8 mm) numunelerin kesit görüntüleri

Model görüntülerindeki reçine tabakasını görselleştirmek için üst, ön ve yan görüntüler Dataviewer yazılımı aracılığıyla alınmış ve analiz edilmiştir. Şekil 4.70'te görüldüğü gibi, normal görüntüde belirlenen reçine alanları kontrast ve renklendirilmiş modellerde de analiz edilerek net görüntüler elde edilmiştir.



Şekil 4.71. Epoksi-bazalt numunelerin agresif koşullarda oluşan 3D model görüntüleri

Şekil 4.71’de epoksi-bazalt (2-3 mm) numunelerin agresif koşullarda oluşan 3B model görüntüleri görülmektedir. Şekil 4.71 incelendiğinde asit etkisinde, epoksi reçinenin yüzeyindeki mikro çatlakları artırmış ve reçineyi kimyasal olarak zayıflatmıştır. Bu, boşlukların genişlemesine ve birleşmesine yol açmıştır. Bazalt agregası asite karşı genelde dirençli olsa da, epoksi reçine bağlayıcının çözülmesi agregaların yüzeylerinin açığa çıkmasına neden olmuştur. Bu, gri kısımların hacminde azalma veya agregaların daha belirgin hale gelmesiyle kendini göstermiştir. Epoksi reçine ve bazalt agregaları arasındaki bağın asit etkisiyle zayıfladığı ve katı yapıdaki bütünlük kaybının arttığı gözlemlenmiştir.

Sülfat iyonlarının epoksi reçine üzerinde doğrudan kimyasal etkisi sınırlı olduğu söylenebilir. Ancak matriste genişleme veya mikro çatlakların oluşması, boşluk alanlarının şekil değiştirmesine yol açmıştır. Bazalt agregasının sülfat dayanımı yüksektir; ancak epoksi reçine, sülfat kaynaklı gerilmelerden etkilenmesi nedeni ile gri kısımlarda yüzey hasarlarına neden olmuştur. Sülfat etkisiyle epoksi reçine-bazalt agregası bağının zayıfladığı ve katı modelde agregaların çevresinde çatlak oluşumları görüldüğü anlaşılmaktadır.

Epoksi reçine, düşük sıcaklıklarda sertleşme ve büzülme gösterebilir. Boşluklardaki suyun donması ve çözülmesi mikro çatlakları büyütürken pembe alanların genişlemesine yol açmıştır. Bazalt agregası mekanik olarak dayanıklı olsa da, D-Ç döngülerinde epoksi reçine ve agregalar arasında bağ kaybı gözlenmiştir. D-Ç çevrimleri, epoksi reçine-bazalt agregası arayüzeyinde ayrışmalara yol açarak katı yapıdaki bütünlüğü zayıflatır ve agregası-boşluk geçiş bölgesinde çatlaklar oluşur.

Yüksek sıcaklık etkisi epoksi reçinenin ısı genleşmesine ve viskozitesinin değişmesine neden olabilir. Bu durum, boşlukların genişlemesine yol açabilmektedir. Bazalt agregası yüksek sıcaklıklarda stabil kalabilse de, epoksi reçine bağlayıcının ısı kararlılığının azalması agregaların çevresinde mekanik bütünlük kaybını arttırmaktadır. Epoksi reçine ile bazalt agregası arasındaki bağ, sıcaklık etkisiyle zayıflar. Bu durum, gri ve pembe alanların sınırlarında belirgin ayrışmalar olarak gözlemlenebilmektedir.

Çizelge 4.9. Deneysel ve 3B analiz ile elde edilen boşluk oranları

Numune türü		Deneysel		3D katı model		
		Boşluk oranı (%)	Geçirimsizlik katsayısı (mm/s)	Açık Boşluk (%)	Kapalı Boşluk (%)	Toplam Boşluk (%)
Kontrol	Polyester-Kalsit	38.6	8.35	40.08	0.004	40.08
	Polyester-Bazalt	42.0	8.38	41.94	0.055	42.00
	Epoksi-Kalsit	41.4	8.74	42.34	0.002	42.34
	Epoksi-Bazalt	43.0	9.63	43.10	0.001	43.10
Asit	Polyester-Kalsit	44.4	6.23	44.92	0.004	44.93
	Polyester-Bazalt	43.9	6.86	43.26	0.011	43.27
	Epoksi-Kalsit	44.1	7.03	44.27	0.003	44.28
	Epoksi-Bazalt	43.5	7.53	43.88	0.010	43.89
Sülfat	Polyester-Kalsit	41.8	6.86	41.52	0.005	41.53
	Polyester-Bazalt	43.7	7.18	45.92	0.011	45.93
	Epoksi-Kalsit	43.9	7.53	44.31	0.004	44.31
	Epoksi-Bazalt	43.4	7.82	43.31	0.007	43.32
D-Ç	Polyester-Kalsit	42.5	7.16	41.93	0.004	41.93
	Polyester-Bazalt	43.8	7.23	44.46	0.011	44.47
	Epoksi-Kalsit	42.3	7.47	40.97	0.004	40.97
	Epoksi-Bazalt	44.0	8.13	44.88	0.012	44.89
Sıcaklık	Polyester-Kalsit	40.8	7.13	42.08	0.005	42.09
	Polyester-Bazalt	45.0	7.34	46.44	0.010	46.45
	Epoksi-Kalsit	44.5	7.88	43.52	0.004	43.53
	Epoksi-Bazalt	44.2	8.62	43.15	0.009	43.16

Çizelge 4.9, katı hal modelinden elde edilen asit saldırısından sonra açık ve kapalı boşluk oranlarını, deneysel boşluk oranlarını ve deneysel geçirimsizlik katsayılarını göstermektedir. Değerler incelendiğinde, kontrol numunelerinin kapalı boşluk oranları asit saldırısı altında önemli bir değişim göstermemiştir. Bu durum, asit saldırısı altında reçinenin içyapısında makro boşlukların oluşmadığını göstermektedir. Deneysel boşluk oranına benzer şekilde, katı modelde elde edilen açık boşluk oranı asit saldırısı altında %5'e kadar artmıştır. Asitin etkisi altında reçine yapısının ve reçine-agrega ara yüzünün bozunması, katı modelde elde edilen sonuçları olumsuz etkilememiş, gerçekçi bir modelin oluşturulabileceği görülmüştür. Elde edilen numunelerde daha fazla kapalı boşluk olması durumunda, geçirgenliği etkileyen boşluk yapısı azalacağından uygunsuz beton tasarımı oluşabilir. Katı modelde elde edilen kapalı ve açık boşlukların belirlenmesinin tasarım için önemli bir parametre olduğu söylenebilir. Genel olarak toplam boşlukların açık boşluklardan oluşması nedeniyle oluşan boşluk yapısının geçirgenliğe katkı sağladığı ve bu nedenle uygun bir tasarım yapıldığı söylenebilir.

Sülfat saldırısı altında malzemelerin boşluk oranları ve geçirgenlik özelliklerindeki değişimler incelendiğinde sülfat etkisiyle polyester-bazalt kombinasyonunda açık boşluk oranı %45.92'ye yükselmiştir. Bu da mikro yapıda bozunmaları işaret etmektedir. Ancak, epoksi-kalsit ve epoksi-bazalt numunelerinde boşluk oranındaki değişiklikler (%44.31 ve %43.31) sınırlı kalarak epoksi reçineli numunelerin sülfata karşı daha dirençli olduğunu ortaya koymuştur. Geçirimsizlik açısından, epoksi-bazalt numunesi (7.82 mm/s) en yüksek değeri korumuştur; bu, bazaltın sülfat ortamındaki dayanımıyla ilişkilidir. Katı modelleme ile deneysel veriler arasındaki uyum, modellemenin doğruluğunu desteklemektedir.

D-Ç çevrimleri, açık boşluk oranlarında belirgin değişikliklere neden olmamıştır. Polyester-bazalt ve epoksi-bazalt kombinasyonlarında açık boşluk oranları sırasıyla %44.46 ve %44.88 olarak kaydedilmiştir. Kapalı boşluk oranlarının yüksekliği, yapısal bozulmaların sınırlı kaldığını göstermektedir. D-Ç döngüleri altında epoksi reçineli sistemler dayanıklılık açısından öne çıkmış ve soğuk iklimlerde tercih edilmesi gerektiğini göstermiştir. Deneysel ve katı model boşluk oranlarının uyumu dikkat çekicidir. Örneğin, epoksi-bazalt numunesinde toplam boşluk oranı deneysel olarak %44.0, katı modelle %44.88 olarak belirlenmiştir. D-Ç etkisiyle ısı gerilmeler, özellikle polyester numunelerde belirgin değişimlere yol açarken, epoksi matrisli numunelerde boşluk oranlarının daha az değişmesi ısı dayanımının yüksekliğiyle ilişkilidir. Yüksek sıcaklık koşullarında deneysel ve katı model sonuçları, malzeme mikro yapısındaki değişiklikleri yansıtmada etkili olmuştur. Polyester-bazalt kombinasyonu, açık boşluk oranında %46.44'e ulaşarak en fazla değişimi göstermiştir. Buna karşılık, epoksi reçineli numunelerde (örneğin, epoksi-kalsit: %43.52) boşluk oranındaki değişiklikler sınırlı kalmıştır. Bu durum, epoksi reçineli malzemelerin yapısal bütünlüklerini koruduğunu ve daha güvenilir bir seçenek sunduğunu ortaya koymaktadır. Katı modelleme, deneysel sonuçlarla uyum içinde performansı doğru şekilde tahmin etmiştir. Sonuç olarak, asit, sülfat, D-Ç ve yüksek sıcaklık gibi çevresel etkiler, malzemelerin boşluk yapısı ve geçirgenlik özelliklerini farklı oranlarda etkilemektedir. Epoksi reçineli malzemeler daha yüksek dayanım gösterirken, polyester bazlı malzemeler çevresel etkilerden daha fazla etkilenmiştir. Bu analizler, çevresel koşullara uygun malzeme seçiminin önemini vurgulamaktadır.

4.5. Geçirimlilik Verileri ile Regresyon Analizi

Kontrol ve asit, sülfat, D-Ç, sıcaklık gibi dayanıklılık etkilerinde kalan geçirimli betonların geçirimlilik verileri ile regresyon analizleri yapılarak Python programlama dili kullanılarak geçirimlilik katsayılarını veren matematiksel eşitlikler yazılmıştır.

Kontrol numuneleri için reçine türü, agrega türü, agrega tane çapına bağlı olarak değişen geçirimlilik verileri Python’da hazırlanmıştır. Veri listeleri hazırlandıktan sonra Python kod satırlarına pandas kütüphanesi yüklenmiştir. Listedeki alınan veriler girdi olarak eklendikten sonra dataframe veri çerçevesi oluşturulmuştur. Sistemi eğitmek için sisteme bağımlı ve bağımsız değişken tanımlamaları yapılmıştır. Reçine türü, agrega türü, agrega tane çapı girdileri sisteme bağımsız değişken (X) olarak atanırken bağımlı değişken (Y) olarak geçirimlilik katsayısı atanmıştır. “LinearRegression” komutu ile model oluşturulup “learning” tamamlanmıştır. Denklem katsayıları sistemden çıktı olarak alınmıştır. Geçirimli polimer beton numuneleri için elde edilen denklemin determinasyon katsayısı ve hata ölçütleri hesaplanmıştır.

Regresyon analizi için Python eğitildikten sonra geçirimli polimer beton numuneleri için geçirimlilik katsayısını veren denklemler:

$$Y=7.8872 - 0.7403*X1 - 0.4270*X2 + 0.4529*X3 \quad (4.1)$$

$$Y=8.3156 - 0.8104*X1 - 0.7099*X2 + 0.4136*X3 - 0.0106*X4 \quad (4.2)$$

$$Y=8.1818 - 0.9523*X1 - 0.5720*X2 + 0.4405*X3 - 0.0074*X5 \quad (4.3)$$

$$Y=8.1789 - 0.8299*X1 - 0.5500*X2 + 0.4224*X3 - 0.0220*X6 \quad (4.4)$$

$$Y=8.3531 - 0.9188*X1 - 0.4557*X2 + 0.4033*X3 - 0.0114*X7 \quad (4.5)$$

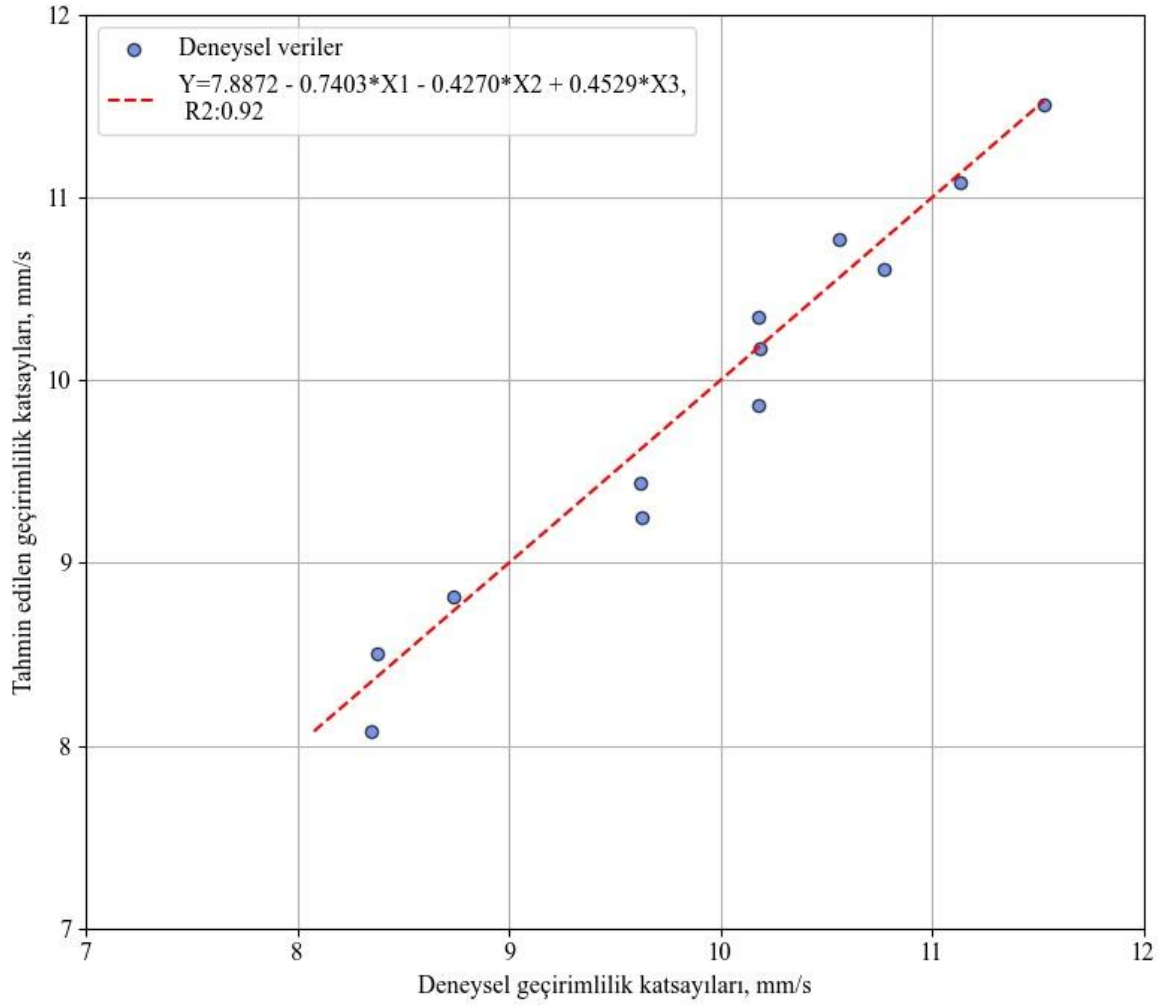
Bu denklemlerde Y= Geçirimlilik katsayısı, X1 = Reçine türü, X2 = Agrega türü, X3 = Agrega tane çapı, X4 = Asit etkisinde bekleme süresi, X5 = Sülfat etkisinde bekleme süresi, X6 = D-Ç çevrim sayısı, X7 = Sıcaklık etkisindeki derecedir. (X1 polyester için 0, epoksi için 1; X2 kalsit için 0, bazalt için 1; X3 en büyük tane çapı)

Geçirimli polimer beton numuneleri geçirimsizliğine etki eden parametrelere ait katsayılar, istatistiksel kontrol parametreleri Çizelge 4.10'da verilmiştir. Burada determinasyon katsayı değeri 0 ile 1 arasında bir değer alır. 1'e daha yakın bir değer, modelin veri setindeki değişkenliği daha iyi açıkladığını gösterir. MSE, RMSE ve MAE hata ölçütlerinin küçük değerlerde çıkması modelin performans değerlendirmesi açısından olumludur. Bütün hata ölçütleri oldukça küçük değerlerde çıkmıştır. Determinasyon katsayısı ve hata ölçütleri birlikte değerlendirildiğinde elde edilen denklemin veri setleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.10. Matematiksel eşitliklerdeki katsayılar ve istatistik kontrol parametreleri

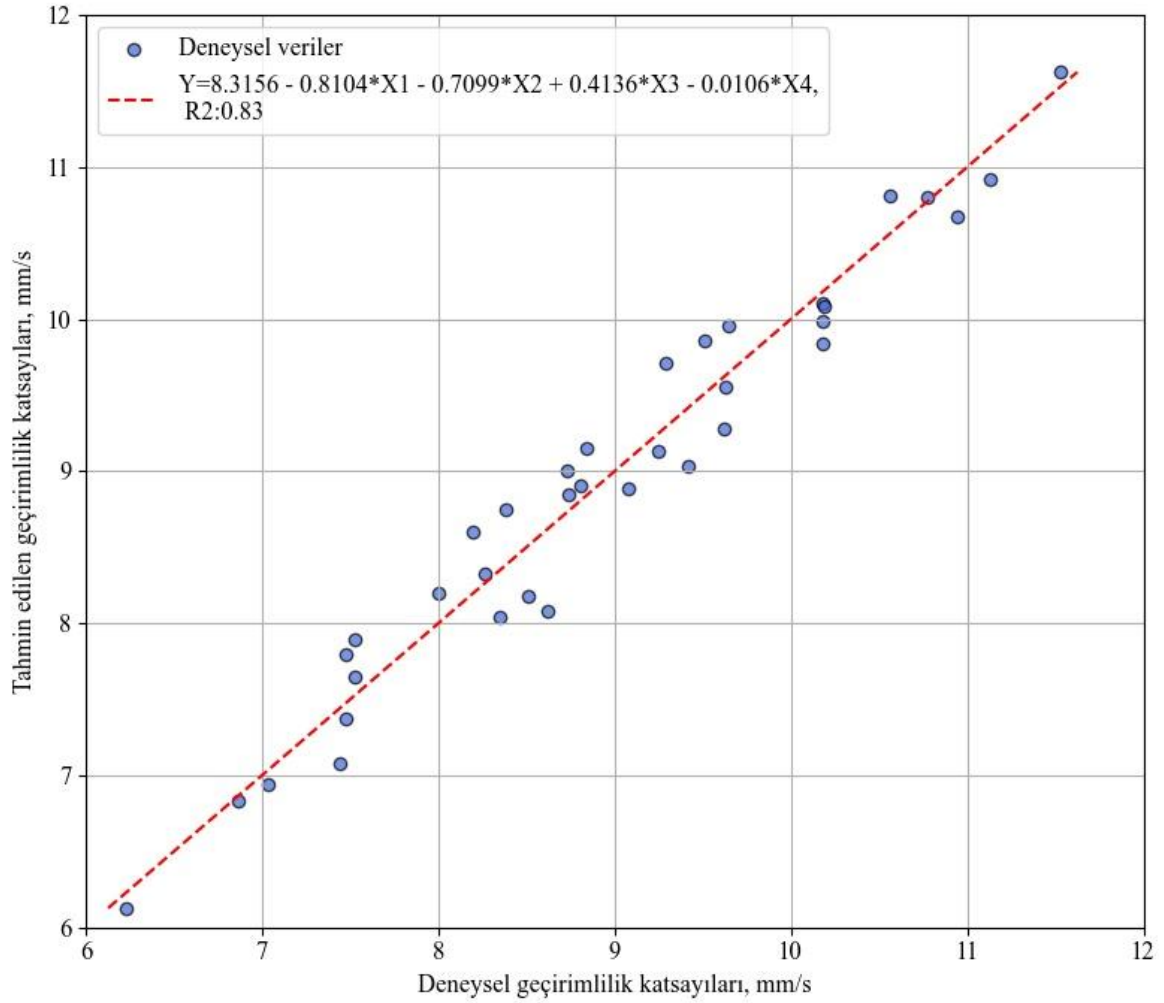
	Katsayılar				İstatistik kontrol parametreleri			
	Reçine türü	Agrega türü	Agrega tane çapı	Ortam faktörü	R ²	MSE	RMSE	MAE
Kontrol	- 0.7403	- 0.4270	0.4529	-	0.9152	0.08288	0.2879	0.2737
Asit	- 0.8104	- 0.7099	0.4136	- 0.0106	0.8335	0.0979	0.3129	0.2815
Sülfat	- 0.9523	- 0.5720	0.4405	- 0.0074	0.8733	0.1143	0.3380	0.2885
D-Ç	- 0.8299	- 0.5500	0.4224	- 0.0220	0.8515	0.1186	0.3444	0.2992
Sıcaklık	- 0.9188	- 0.4557	0.4033	- 0.0114	0.8909	0.0699	0.2644	0.2273

Python programlama dili kullanılarak farklı çap ve türde agrega ve farklı türde reçine içeren kontrol betonların geçirimsizlik katsayılarını veren matematiksel denklemler hesaplandıktan sonra deney verileri ile tahmin değerleri arasındaki karşılaştırma yapılarak elde edilen denklemlerin uyumluluğu incelenmiştir. Deney sonuçları ile tahmin değerleri arasındaki karşılaştırma Şekil 4.72'de gösterilmiştir. Şekil 4.72 incelendiğinde regresyon analizi sonucunda oluşturulan denklemden elde edilen tahminler ile deney sonuçların oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Şekil incelendiğinde eğilim çizgisindeki aykırı değer sayısının (Outliers) kabul edilebilir düzeyde olduğu görülmektedir. Şekilde aşırı uyum ve yetersiz uyum (Overfit - Underfit) durumu görülmemiştir. Aşırı uyum, algoritmanın eğitim setinde iyi çalıştığı, ancak deney setlerinde daha iyi performans gösteremediği anlamına gelmektedir. Deney ve tahmin veri sayısı ise yeterli seviyededir.



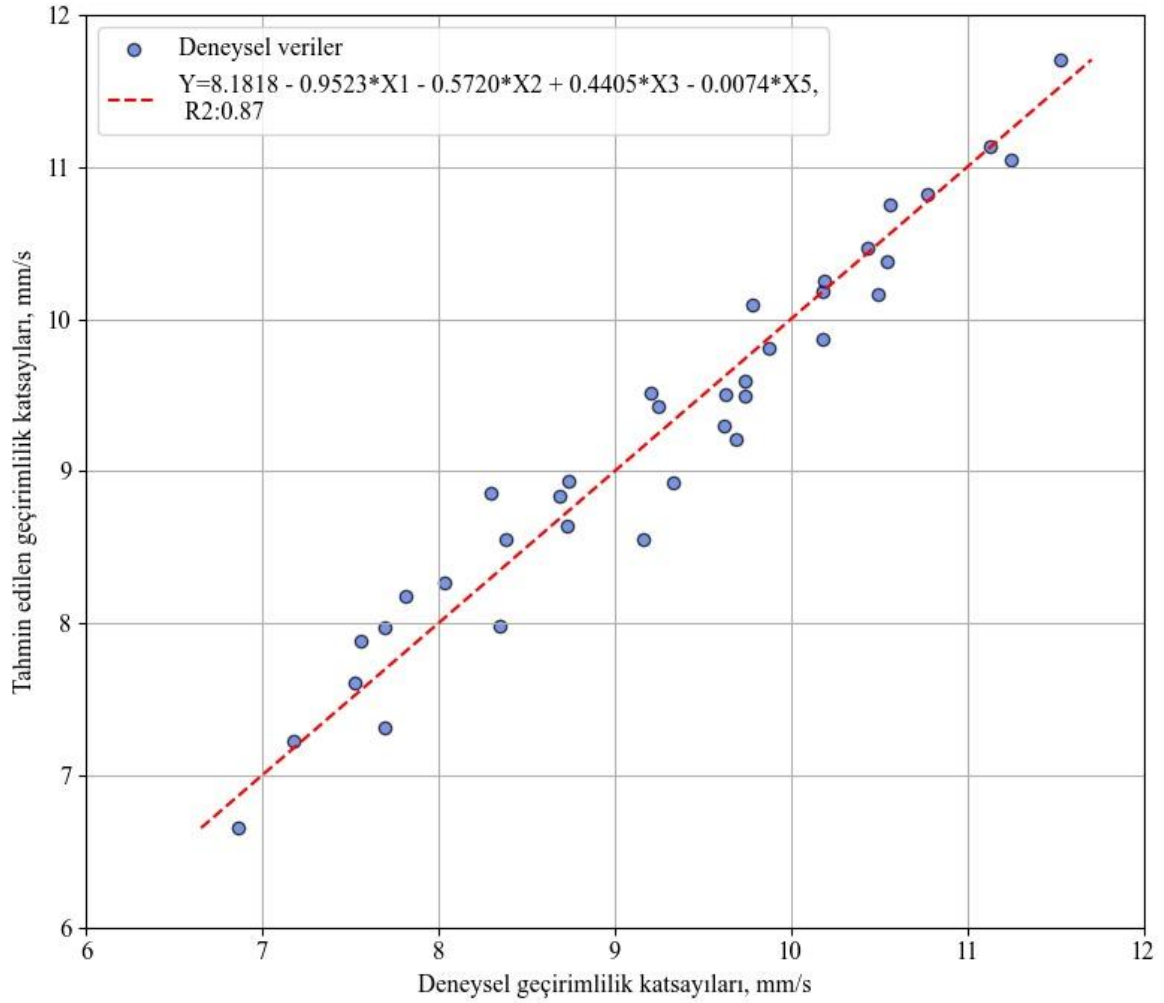
Şekil 4.72. Kontrol numunelerin tahmin edilen ve deneysel geçirimsizlik katsayıları

Asit etkisinde Çizelge 4.10’da verilen katsayılar incelendiğinde polyester bağlayıcı ve kalsit agregata türünün, asitte bekleme süresi artışının geçirimsizliği azalttığı, agregata tane çapındaki artışında geçirimsizliği arttırdığı görülmüştür. İstatistiksel kontrol parametreleri incelendiğinde korelasyon katsayısı geçirimsizlik ile agregata çap, tür ve reçine türü arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Hata ölçütlerinin küçük değerlerde olması modelin performansı açısından olumludur. Python programı yardımı ile elde edilen geçirimsizliğe yönelik matematiksel denklemlere bağlı hesaplanan tahmin değerleri ile deney sonuçlarının karşılaştırması Şekil 4.73’te gösterilmiştir. Şekil 4.73 incelendiğinde tahmin ile deneysel veriler arasında 45°’ye yakın doğrusal bir grafik elde edilmiştir. Burada tahmin değerleri deneysel verileri doğru bir şekilde temsil edebildiğini göstermektedir. Verilerin doğru çevresinde saçılmasının fazla olmaması elde edilen denklemin güvenilirliğini arttırmaktadır.



Şekil 4.73.Asit etkisinde numunelerin tahmin edilen ve deneysel geçirimlilik katsayıları

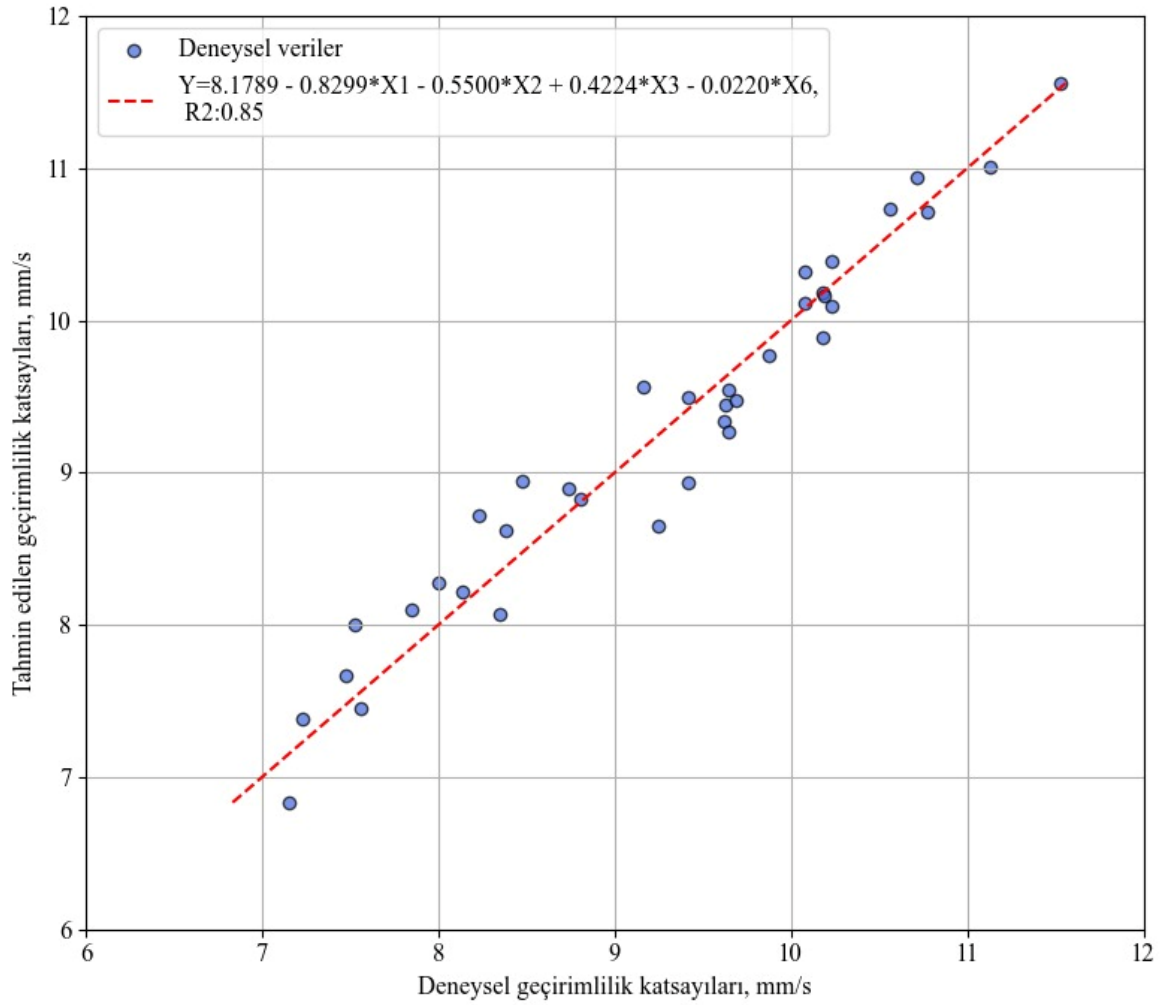
Çizelge 4.10’da verilen katsayılar incelendiğinde sülfat etkisinde epoksi bağlayıcı ve bazalt agrega türünün, agrega tane çapındaki artışında geçirimliliği artırdığı, sülfatta bekleme süresi artışının geçirimliliği azalttığı görülmüştür. Sülfatta bekleme süresi asitte bekleme süresine göre geçirimliliğin azalmasına daha az etki ettiği söylenebilir. Asite göre korelasyon katsayısı sülfat etkisinde arttığı görülmüştür. Asite benzer şekilde hata ölçütlerinin küçük değerlerde olduğu görülmüştür. Python programı yardımı ile elde edilen geçirimliliğe yönelik matematiksel denklemlere bağlı hesaplanan tahmin değerleri ile deney sonuçlarının karşılaştırması Şekil 4.74’te gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde tahmin ile deneysel veriler arasında 45°’ye yakın doğrusal bir grafik elde edilmiştir. Burada tahmin değerleri deneysel verileri doğru bir şekilde temsil edebildiğini göstermektedir. Asit etkisine göre sülfat etkisinde verilerin doğru çevresinde saçılmasının arttığı söylenebilir.



Şekil 4.74. Sülfat etkisinde numunelerin tahmin edilen ve deneysel geç. kats.

D-Ç çevrimleri etkisinde kalmış numune içeriğine ait Çizelge 4.5'te verilen katsayılar incelendiğinde polyester bağlayıcı ve kalsit agregası türünün, D-Ç çevrim sayısı artışının geçirimliliği azalttığı, agregası tane çapındaki artışında geçirimliliği arttırdığı görülmüştür. Kimyasal etkilere göre D-Ç etkisinde geçirimliliğin daha da azaldığı belirlenmiştir. İstatistiksel kontrol parametreleri incelendiğinde korelasyon katsayısı geçirimlilik ile agregası çap, tür ve reçine türü arasında kuvvetli bir ilişki olduğunu ortaya koymaktadır. Hata ölçütlerinin küçük değerlerde olması modelin performansı açısından olumludur.

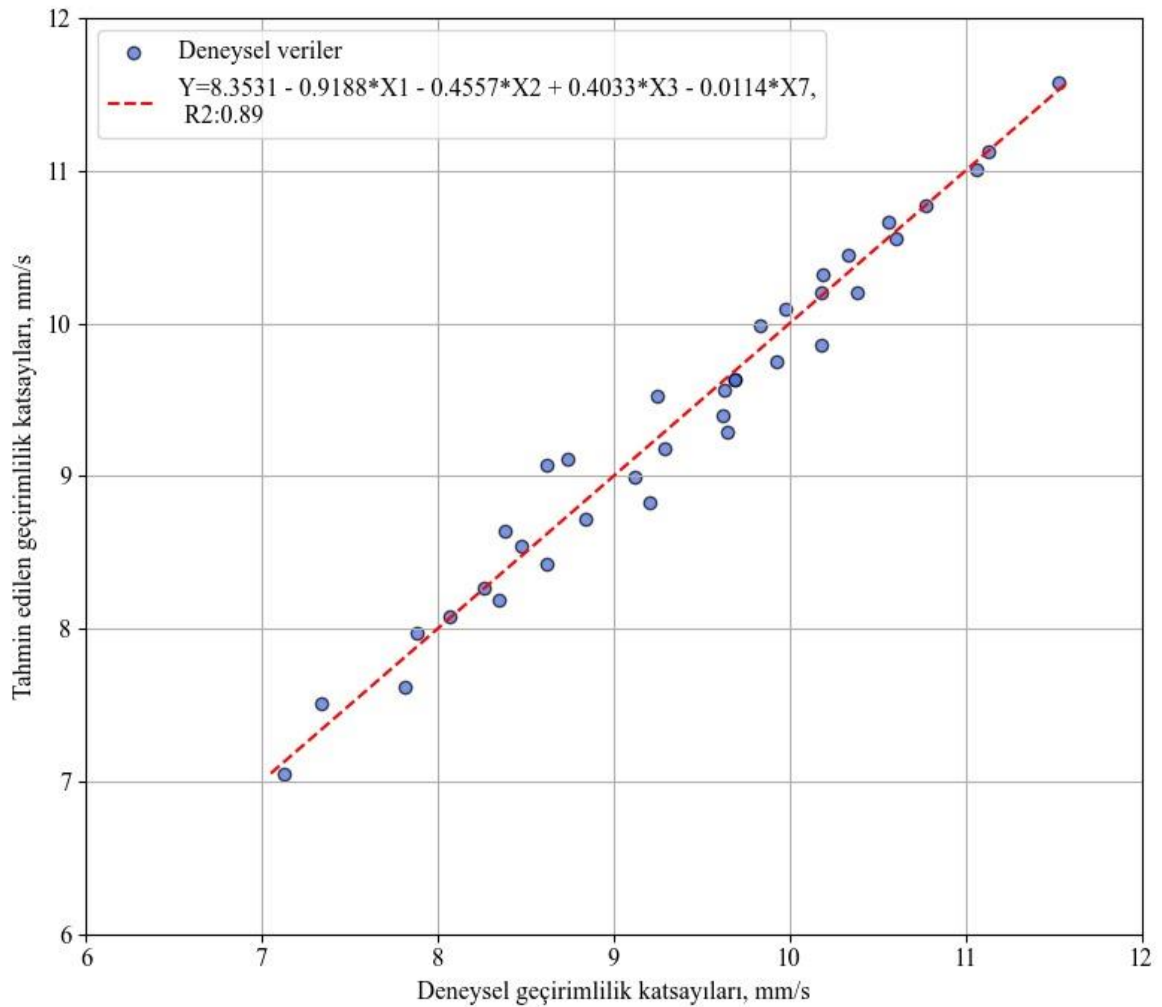
Python ile elde edilen geçirirmliliğe yönelik matematiksel denklemlere bağlı hesaplanan tahmin değeri ile deney sonuçlarının karşılaştırması Şekil 4.75'te gösterilmiştir. Şelil 4.75 incelendiğinde tahmin ile deneysel veriler arasında 45°'ye yakın doğrusal bir grafik elde edilmiştir. Burada tahmin değeri deneysel verileri doğru bir şekilde temsil edebildiğini göstermektedir. Verilerin doğru çevresinde saçılmasının fazla olmaması elde edilen denklemin güvenilirliğini arttırmaktadır.



Şekil 4.75. D-Ç etkisinde numunelerin tahmin edilen ve deneysel geçirirmlilik katsayıları

Çizelge 4.10'da verilen katsayılar incelendiğinde sıcaklık etkisinde epoksi bağlayıcı ve bazalt agregası türünün, agregası tane çapındaki artışında geçirirmliliği arttırdığı, sıcaklık etkisinde ortam sıcaklığının artışı geçirirmliliği azalttığı görülmüştür. Sıcaklık artışı, D-Ç çevrim sayısına göre geçirirmliliğin azalmasına daha az etki ettiği söylenebilir.

D-Ç etkisine göre korelasyon katsayısı sıcaklık etkisinde arttığı görülmüştür. D-Ç etkisine benzer şekilde hata ölçütlerinin küçük değerlerde olduğu görülmüştür. Python programı yardımı ile elde edilen geçirimliliğe yönelik matematiksel denklemlere bağlı hesaplanan tahmin değerleri ile deney sonuçlarının karşılaştırması Şekil 4.77’de gösterilmiştir. Şekil 4.77 incelendiğinde ile elde edilen bu dağılım grafiğinde tahmin ile deneysel veriler arasında 45°’ye yakın doğrusal bir grafik elde edilmiştir. Burada tahmin değerleri deneysel verileri doğru bir şekilde temsil edebildiğini göstermektedir. D-Ç etkisine göre sıcaklık etkisinde veriler doğru çevresinde saçılmasının azaldığı söylenebilir.



Şekil 4.76. Sıcaklık etkisinde numunelerin tahmin edilen ve deneysel geç. kats.

4.6. Literatürdeki Diğer Sonuçlarla Karşılaştırma

Literatürde, bağlayıcı olarak çimento kullanılan geçirimli betonların üzerine gerçekleştirilen çalışmalarda kullanılan agregaların türü, boyutu ile elde edilen geçirimlilik katsayısı, boşluk oranı, basınç dayanımı ve eğilme dayanımı sonuçları Çizelge 4.11’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. Literatürde yapılan benzer çalışmalar ve sonuçları

No	Bileşenler		Fiziksel özellikler		Mekanik özellikler		Kaynak	
	Bağlayıcı Tipi	Agrega türü	Agrega boyutu, mm	Boşluk, %	Geçirimlilik katsayısı, mm/s	Basınç dayanımı,MPa		Eğilme dayanımı ,MPa
1	Polyester/Epoksi	Kalsit/Bazalt	2-3 5-6 7-8	36.2 43.0	8.35 11.53	8.79 11.48	2.78 4.35	Özdemir, 2024
2	CEM I 42.5R	Çakıl	4-6	29	13	5	-	Lyu vd., 2024
3	CEM I 42.5R SA	Kırmataş	3-5	25	10.24	11.8	-	Zhao vd., 2023
4	OPC	Granit	5-10	24	2.1	7	1.5	Ariffin vd., 2018
5	OPC SA	Kırmataş Kum	5-10	22.2	2.72	10.3	-	Hung vd., 2021
6	CEM II 52.5 SA	Granit	4.75-9.5 9.5-13.2 13.2-16	25	9	14	3	Liu, H. vd., 2018
7	CEM I 42.5R SA	Çakıl	5-10	20	3.0	8.5	-	Xiao vd., 2023
8	CEM I 42.5R	Kırmataş	5-10 10-15	22	3.8	10.1	-	Ojhap vd., 2020
9	OPC	Kırmataş	4.75-9.5 9.5-16 16-19.5	14	5.0	12	-	Yang vd., 2018
10	OPC SA SD	Çakıl	2.4-4.8 4.8–6.4 6.4–9.5 9.5-12.7	25	1.5	5	-	Fu vd., 2014

GDA: Geri dönüştürülmüş agregası UK: Uçucu kül; SD: Silis Dumanı; SA: Süper akışkanlaştırıcı
OPC: Geleneksel Portland Çimentosu

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tezde, farklı tür ve boyutta agregalar ve bağlayıcı olarak farklı polimer reçineler kullanılarak geçirimli polimer betonlar elde edilmiştir. Bu betonların fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen numunelerin ısı ve kimyasal etkilere karşı olan dayanıklılığını belirlemek için agresif ortam koşullarının fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. Bu etkiler altında içyapıda oluşan değişimler mikroyapı analizi ile detaylandırılmıştır. İç yapıdaki boşlukların daha net bir şekilde ortaya konabilmesi için Mikro-BT ile katı model çalışmaları yapılmıştır. Son olarak, elde edilen deneysel verilerle Python programlama dili kullanılarak regresyon analizi gerçekleştirilmiş ve geçirimlilik katsayılarını belirten matematiksel eşitlikler oluşturulmuştur. Çizelge 5.1’de farklı koşullandırmalar altında geçirimli betonun özelliklerinin en yüksek değerlere ulaştığı bileşenler gösterilmiştir.

Bu tezde belirlenen sonuçlar şunlardır:

- PPC’lerde fiziksel özellikler incelendiğinde polyester reçine ve kalsit kullanılması durumunda epoksi ve bazalt kullanılan numunelere göre birim ağırlık ve UPV değerleri artarken, boşluk oranı ve geçirimlilik katsayıları azalmıştır. Agregatane boyutu arttıkça birim ağırlık, UPV değerleri ve geçirimlilik katsayıları artarken, boşluk oranları azalmıştır. PPC numunelerin mekanik özellikleri incelendiğinde agregatane çapındaki artışın mekanik özelliklere olumlu etkisi gözlenmiş olup en yüksek dayanım 11.53 MPa ile epoksi ve bazalt kullanılan numunelerde elde edilmiştir. Basınç dayanımında reçine türü diğer bileşenlere göre daha belirleyici bir etkiye sahipken, yarmada çekme dayanımında tane boyutunun da reçine türü kadar önemli bir etken olduğu belirlenmiştir. Mikroyapı analizleri, her iki reçinenin de agregayüzeyini etkili bir şekilde kaplayarak agregalar arasında güçlü bir bağlayıcılık sağladığını ortaya koymuştur. Mikroyapıda çatlak, deformasyon veya bozunmaya rastlanmamış olması, betonun geçirimlilik performansına olumlu katkı sağlamıştır.

Çizelge 5.1. En yüksek değerlerin elde edildiği bileşenler

En yüksek değerlerin elde edildiği bileşenler				
	Özelik	Reçine Türü	Agrega Türü	Agrega Tane Çapı
KONTROL	Birim Ağırlık	Polyester	Kalsit	7-8 mm
	UGH	Polyester	Kalsit	7-8 mm
	Boşluk oranı	Epoksi	Bazalt	2-3 mm
	Geçirimsizlik katsayısı	Epoksi	Bazalt	7-8 mm
	Dayanım	Epoksi	Bazalt	7-8 mm
ASİT	Boşluk oranı	Polyester	Kalsit	7-8 mm
	Geçirimsizlik katsayısı	Epoksi	Bazalt	7-8 mm
	Dayanım	Epoksi	Bazalt	2-3 mm
SÜLFAT	Boşluk oranı	Polyester	Kalsit	7-8 mm
	Geçirimsizlik katsayısı	Epoksi	Bazalt	7-8 mm
	Dayanım	Epoksi	Bazalt	2-3 mm
D-Ç	Boşluk oranı	Polyester	Kalsit	7-8 mm
	Geçirimsizlik katsayısı	Epoksi	Bazalt	7-8 mm
	Dayanım	Epoksi	Bazalt	7-8 mm
SICAKLIK	Boşluk oranı	Polyester	Kalsit	7-8 mm
	Geçirimsizlik katsayısı	Epoksi	Bazalt	7-8 mm
	Dayanım	Epoksi	Bazalt	7-8 mm

- Asit atağı, polyester reçine bağlayıcılı PPC’lerde renk değişimi, yüzeyde soyulma, ayrışma ve kimyasal bozunmalara yol açmıştır. Asit etkisinde kalma süresi uzadıkça, eğilme, basınç ve yarmada çekme dayanımlarında kayıplar artmış, agrega tane boyutunun artmasıyla birlikte asit etkisiyle oluşan dayanım kayıpları da artmıştır. PPC numunelerinde, asit etkisinde kalsit kullanıldığında renkte koyulaşma, bazalt kullanıldığında ise renkte açılma gözlemlenmiştir. Bazalt içeren numuneler, asit atağından kalsite göre daha az etkilenmiştir. Kalsit içeren numunelerde, özellikle agrega tane boyutunun artmasıyla asit etkisinin mekanik özellikler üzerindeki olumsuz etkisi daha belirgin hale gelmiştir. Polyester bağlayıcılı numunelerde soyulma ve aşınmalar gözlenmiştir. Epoksi ile polyester karşılaştırıldığında, epoksi bağlayıcılı numuneler dayanım açısından daha yüksek sonuçlar vermiştir. Asit etkisiyle, numunelerde boşluk oranı artmış fakat akış yolunun uzaması nedeniyle geçirimsizlikte azalma gerçekleşmiştir.

- Sülfat atağı, hem polyester hem de epoksi bağlayıcılı PPC numunelerde kimyasal bozunma, renk değişimi, soyulma ve ayrışma gibi olumsuz etkilere yol açmıştır. Sülfat etkisinde kalma süresinin uzamasıyla birlikte eğilme, basınç ve yarmada çekme dayanımlarında kayıplar artmıştır. Polyester bağlayıcılı numunelerin sülfat etkisinde mekanik özelliklerinde oluşan değişimde agrega türünün belirgin etkisi görülmemiştir. Sülfat etkisinde kalma süresi arttıkça tane çapının olumlu etkisi de azalmıştır. Epoksi bağlayıcılı numunelerde ise bazalt içeren numunelerin sülfat atağından kalsit içeren numunelere göre daha az etkilendiği gözlenmiştir. Sülfat etkisi altında, hem epoksi hem de polyester bağlayıcılı numunelerde boşluk oranında artış, geçirimsilikte azalma ve mekanik dayanımda düşüşler oluşmuş, ancak epoksi bağlayıcının bazalt ile uyumu sonucunda dayanım açısından daha üstün performanslar elde edilmiştir.
- D-Ç çevrimleri, polyester reçine bağlayıcılı PPC numunelerde eğilme, basınç ve yarmada çekme dayanımlarında kayıplara neden olmuş, bu kayıpların çevrim sayısının artışıyla daha da belirgin hale geldiği gözlenmiştir. Reçine olarak epoksi kullanılması durumunda D-Ç sonrası polyestere göre dayanım kayıplarının daha az olduğu görülmüştür. Agregaya yönünden D-Ç etkisi altında bazalt içeren numunelerin dayanımlarının, kalsit içerenlere göre daha az etkilendiğini göstermiştir. Çevrim sayısı arttıkça ince agrega kullanılan numunelerde dayanım kayıplarının azaldığı gözlenmiştir. Boşluk oranı açısından incelendiğinde, D-Ç çevrimleri boşluk oranını artırmış ancak bu artış, bağlayıcıların agrega ile güçlü bir bağ oluşturması nedeniyle sınırlı kalmıştır. Numunelerde görsel olarak renk değişimleri gözlenirse de numunelerin yapısal bütünlükleri bozulmamıştır.
- Sıcaklık etkisi, polyester ve epoksi bağlayıcılı PPC'lerde çeşitli fiziksel ve mekanik değişimlere neden olmuştur. Artan sıcaklıkla birlikte tüm numunelerde eğilme, basınç ve yarmada çekme dayanımlarında azalma görülmüş; buna karşılık boşluk oranı artmış ve geçirimsilik katsayısı azalmıştır. Polimer bağlayıcılı numunelerde, sıcaklık artışlarının bağlayıcı reçinenin rijitliğini azaltarak mekanik dayanım kayıplarına neden olduğu gözlenmiştir. Epoksi bağlayıcılı numunelerde polyestere göre dayanım kayıplarının daha az olduğu gözlenmiş, sıcaklık arttıkça agrega türü ve tane çapının etkisinin son derece azaldığı görülmüştür. Polyester ve kalsit ile elde edilen numunelerde 100 °C'de numunenin yüzey renginde belirgin sararmalar gözlenmiştir. Epoksi bağlayıcının ısı performansının polyester bağlayıcıya göre daha üstün olduğu söylenebilir.

- Mikroyapı analizleri, kimyasal ve ısı etkilerinin polyester ve epoksi bağlayıcılı PPC numuneler üzerindeki farklı etkilerini net bir şekilde ortaya koymuştur. Kimyasal etkiler altında, polyester reçine bağlayıcılı kalsit agregalı numunelerde yüzeyde mikro düzeyde çatlak dallanmalarına ve boşluk oluşumuna neden olmuştur. Bazalt agregalı numunelerde ise çatlak miktarının azaldığı, ancak boşluk çaplarının arttığı tespit edilmiştir. Epoksi bağlayıcılı kalsit agregalı numunelerde asit etkisi, yüzeyde ayrışma, mikro çatlaklar ve boşluk oluşumuna yol açarken; bazalt agregalı numunelerde daha az kimyasal hasar gözlenmiş ve epoksi reçinenin kimyasal ortamlara karşı daha yüksek dayanıklılık sergilediği belirlenmiştir. Isıl etkiler altında polyester bağlayıcılı numunelerde, D-Ç çevrimleri çatlak ve boşluk artışına yol açmış; yüksek sıcaklıklarda ise reçine-agrega bağlarının zayıflaması sonucu belirgin boşluklar ve çatlaklar oluşmuştur. Epoksi bağlayıcılı numunelerde ise ısı etkilerinin polyester bağlayıcılı numunelere göre daha sınırlı hasara neden olduğu belirlenmiştir. Özellikle bazalt içeren numunelerde, epoksi bağlayıcının agregası ile daha uyumlu bir performans sergilediği gözlenmiştir.
- Mikro BT ile 3B modelleme ve deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların uyumlu olması, geçirimli beton tasarımında deney ihtiyacını ortadan kaldırması açısından oldukça önemli bir durumdur. Katı hal modellerinden elde edilen sonuçların deneysel sonuçları desteklediği görülmüştür. Katı modelde belirlenen kapalı boşlukların çok az olması boşlukların geçirgenlik üzerinde etkili bir şekilde çalıştığını göstermiştir.
- PPC numunelerinin geçirimlilik katsayılarına etki eden parametreler, Python kullanılarak yapılan regresyon analizi ile değerlendirilmiştir. Reçine türü, agregası türü, agregası tane çapı dikkate alınarak asit, sülfat, D-Ç, sıcaklık gibi çevresel etkiler altında geçirimlilik katsayısını tahmin eden matematiksel denklemler geliştirilmiştir. Elde edilen denklemler, deneysel sonuçlarla uyumlu bulunmuş ve doğrusal regresyon analizi sonucunda düşük hata ölçütleri ile yüksek determinasyon katsayıları elde edilmiştir.
- Asit etkisinde polyester bağlayıcı ve kalsit geçirimliliği azaltırken, agregası tane çapı geçirimliliği artırmıştır. Sülfat etkisinde, epoksi bağlayıcı ve bazalt agregasının, sülfat etkisinde bekleme süresine göre daha fazla geçirimliliği artırdığı gözlemlenmiştir.

- D-Ç çevrimleri ve sıcaklık etkisinde ise epoksi ve bazalt ile agrega tane çapındaki artışın geçirimsizliği artırdığı belirlenmiştir. Model doğruluğu ve hata analizleri, tahmin değerleri ile deneysel veriler arasında yüksek bir uyum göstermiştir. Bu sonuçlar, geçirimli betonların tasarımında reçine türü, agrega türü, agrega tane çapı ve çevresel koşulların etkin şekilde dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Günümüzde geçirimli beton daha çok çimentolu sistemlerde uygulanmaktadır. İklim değişikliklerine bağlı çevresel sorunlar geçirimli beton üzerine yapılan çalışmaların önemini ortaya koymaktadır. Çimento üretiminin CO₂ salınımında önemli rol oynaması, kullanımı sırasında çevresel etkilere bağlı dayanıklılık problemleri geçirimli betonda alternatif bağlayıcılara yönelik çalışmaları arttırmıştır. Bu tezde geçirimli beton üretiminde bağlayıcı olarak reçine kullanılması önerilmektedir. Çimentolu sistemlere göre daha hafif, yüksek boşluk oranlarına ve geçirgenliğe sahip betonlar elde edilebileceği görülmüştür. Geçirimsizlik özelliği dikkate alındığında, epoksi bağlayıcılı agrega tane boyutu büyük, bazalt agrega kullanılan PPC önerilir. Yüksek dayanım gerektiren yerlerde tasarım optimizasyonu sağlanarak epoksi ve bazalt kullanımı önerilir. Bu tez sonucunda ısı ve kimyasal etkiler altında PPC'lerde dayanım değerlerinde ve geçirgenlikte düşüşler olabileceği ancak agresif ortam koşuluna rağmen reçine bağlayıcılı geçirimli betonların ACI 522'de çimentolu sistemlerde için verilen sınır koşullarını sağladığı görülmüştür. Agresif ortam koşullarında dayanım ve geçirimsizlik kaybını azaltmak için bazalt kullanılması ve dayanım kaybının hızını daha da azaltmak için daha ince agrega boyutunun tercih edilmesi önerilir.

Bundan sonra yapılacak çalışmalar, polimer geçirimli betonun özelliklerine ait sınır değerlerin belirlenmesi amacıyla farklı türde reçine ve agrega kullanılarak fiziksel ve mekanik özelliklerin değerlendirilmesini içerebilir. Geçirimli polimer betonun hedef kullanım alanı için belirlenen geçirimsizlik katsayısı ve dayanım değerlerine ulaşılabilmesi amacıyla, reçine/agrega oranı ve agrega granülometrisi üzerinde tasarım optimizasyonları yapılabilir. Bu doğrultuda elde edilen veriler üzerinde gerçekleştirilecek analizlere işgücünden, zamandan ve enerjiden tasarruf sağlayacak modeller oluşturulabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- ACI 522-R10, 2010. *Report on Pervious Concrete*, Farmington Hills, MI.
- Adresi, M., Yamani, A., Tabarestani, M. K., Rooholamini, H. (2023). *A comprehensive review on pervious concrete*, Construction and Building Materials, 407, 133308.
- Akkaya, A., Çağatay, İ. H. (2016). *Geçirimli Betonların Basınç Dayanımı Üzerine DeneySEL Bir Çalışma*. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(2), 209-216. <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.310279>
- AlShareedah, O., Nassiri, S. (2020). *Pervious concrete mixture optimization, physical, and mechanical properties and pavement design: A review*, Journal of Cleaner Production, 125095. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125095>.
- Anwar, F., El-Hassan, H., Hamouda, M., Hinge, G., Mo, K. (2022). *Meta-Analysis of the Performance of Pervious Concrete with Cement and Aggregate Replacements*, Buildings. <https://doi.org/10.3390/buildings12040461>.
- Ariffin, N. F., Jaafar, M. M., Lim, N. A. S., Bhutta, M. A. R., Hussin, M. W. (2018). *Mechanical properties of polymer-modified porous concrete*. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 342, No. 1, p. 012081). IOP Publishing.
- Ash, A., Shwartz, M. (1999). *R2: a useful measure of model performance when predicting a dichotomous outcome*, Statistics in medicine, 18 4, 375-84.
- Balaguru, P.N., Shah, S.P. (1992). *Fiber-reinforced cement composites*. McGraw-Hill, Inc.
- Bennett, K., Luscher, D. (2018). *Effective Thermoelasticity of Polymer-Bonded Particle Composites with Imperfect Interfaces and Thermally Expansive Interphases*. Journal of Elasticity, 136, 55-85. <https://doi.org/10.1007/S10659-018-9688-Z>.
- Borhan, T., Karawi, R. (2020). *Experimental investigations on polymer modified pervious concrete*. Case Studies in Construction Materials, 12. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00335>.
- Chai, T., Draxler, R. (2014). *Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the literature*. Geoscientific Model Development, 7, 1247-1250. <https://doi.org/10.5194/GMD-7-1247-2014>.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Chicco, D., Warrens, M., Jurman, G. (2021). *The coefficient of determination R-squared is more informative than SMAPE, MAE, MAPE, MSE and RMSE in regression analysis evaluation*. PeerJ Computer Science, 7. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.623>.
- Chinchillas-Chinchillas, M., Rosas-Casarez, C., Arredondo-Rea, S., Gómez-Soberón, J., Corral-Higuera, R. (2019). *SEM Image Analysis in Permeable Recycled Concretes with Silica Fume. A Quantitative Comparison of Porosity and the ITZ*, Materials, 12. <https://doi.org/10.3390/ma12132201>.
- Chockalingam, T., Vijayaprabha, C., Raj, J. L. (2023). *Experimental study on size of aggregates, size and shape of specimens on strength characteristics of pervious concrete*. Construction and Building Materials, 385, 131320.
- Colangelo, F., Petrillo, A., Cioffi, R., Borrelli, C., Forcina, A. (2020). *Eco-efficient industrial waste recycling for the manufacturing of fibre-reinforced innovative geopolymer mortars: Integrated product and process design*, Journal of Cleaner Production, 242. 118476. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127777>
- Cutler, J., Dickenson, M. (2020). *Introduction to Machine Learning with Python*, Textbooks on Political Analysis. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36826-5_10.
- Daukšys, M., Dunauskas, A., Juočiušas, S. (2023). *Effect of coarse aggregate characteristics on the permeability properties of pervious concrete*, In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 1276, No. 1, p. 012004). IOP Publishing.
- Dias, S., Almeida, J., Tadeu, A., de Brito, J. (2024). *Alternative concrete aggregates-Review of physical and mechanical properties and successful applications*, Cement and Concrete Composites, 105663. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105663>
- Elalaoui, O., Ghorbel, E., Mignot, V., Ouezdou, M. B. (2012). *Mechanical and physical properties of epoxy polymer concrete after exposure to temperatures up to 250 C*, Construction and Building Materials, 27(1), 415-424.
- El-Hassan, H., Kianmehr, P., Zouaoui, S. (2019). *Properties of pervious concrete incorporating recycled concrete aggregates and slag*. Construction and Building Materials. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.03.325>.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Ferić, K., Kumar, S., Romić, A., Gotovac, H. (2023). *Effect of Aggregate Size and Compaction on the Strength and Hydraulic Properties of Pervious Concrete. Sustainability*. <https://doi.org/10.3390/su15021146>.
- Fu, T., Yeih, W., Chang, J., Huang, R. (2014). *The Influence of Aggregate Size and Binder Material on the Properties of Pervious Concrete*. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2014, 1-17. <https://doi.org/10.1155/2014/963971>.
- Gaedicke, C., Torres, A., Huynh, K. C., Marines, A. (2016). *A method to correlate splitting tensile strength and compressive strength of pervious concrete cylinders and cores*. *Construction and Building Materials*, 125, 271-278.
- Giustozzi, F. (2016). *Polymer-modified pervious concrete for durable and sustainable transportation infrastructures*, *Construction and Building Materials*, 111, 502-512. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2016.02.136>.
- Hao, J., Ho, T. (2019). *Machine Learning Made Easy: A Review of Scikit-learn Package in Python Programming Language*, *Journal of Educational and Behavioral Statistics*, 44, 348 - 361. <https://doi.org/10.3102/1076998619832248>.
- Hari, R., Mini, K. M. (2024). *Mechanical and clogging characteristics of SBR modified pervious concrete reinforced with geogrids-A Functional Data Analysis approach*, *Construction and Building Materials*, 412, 134780.
- Hu, J., Qian, Z., Liu, P., Wang, D., Oeser, M. (2020). *Investigation on the permeability of porous asphalt concrete based on microstructure analysis*, *International Journal of Pavement Engineering*, 21, 1683-1693.
- Huang, B., Wu, H., Shu, X., Burdette, E. G. (2010). *Laboratory evaluation of permeability and strength of polymer-modified pervious concrete*, *Construction and Building Materials*, 24(5), 818-823.
- Hung, V., Seo, S., Kim, H., Lee, G. (2021). *Permeability and Strength of Pervious Concrete According to Aggregate Size and Blocking Material*. *Sustainability*.
- Ingrao, C., Giudice, A.L., Tricase, C., Mbohwa, C., Rana, R. (2014). *The use of basalt aggregates in the production of concrete for the prefabrication industry: Environmental impact assessment, interpretation and improvement*, *Journal of Cleaner Production*, 75, 195-204.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Jamshidi, M., Pourkhorshidi, A. (2012). *Modified polyester resins as an effective binder for polymer concretes*. Materials and Structures, 45, 521-527.
- Jiang, X., Ling, T.C., Mo, K.H., Shi, C. (2021). *A critical review of waste glass powder–Multiple roles of utilization in cement-based materials and construction products*, Journal of Building Engineering, 35, 102011.
- Lian, C., Zhuge, Y. (2010). *Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation*, Construction and Building Materials, 24, 2664-2671. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2010.04.057>.
- Liu, H., Luo, G., Wei, H., Yu, H. (2018). *Strength, Permeability, and Freeze-Thaw Durability of Pervious Concrete with Different Aggregate Sizes, Porosities, and Water-Binder Ratios*. Applied Sciences. <https://doi.org/10.3390/APP8081217>.
- Liu, R., Liu, H., Sha, F., Yang, H., Zhang, Q., Shi, S., Zheng, Z. (2018). *Investigation of the Porosity Distribution, Permeability, and Mechanical Performance of Pervious Concretes*, Processes. <https://doi.org/10.3390/PR6070078>.
- Liu, T., Wang, Z., Zou, D., Zhou, A., Du, J. (2019). *Strength enhancement of recycled aggregate pervious concrete using a cement paste redistribution method*, Cement and Concrete Research, 122, 72-82.
- Loh, W. (2011). *Classification and regression trees*, Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery, 1. <https://doi.org/10.1002/widm.8>.
- Lyu, Q., Dai, P., Chen, A. (2024). *Correlations among physical properties of pervious concrete with different aggregate sizes and mix proportions*. Road Materials and Pavement Design. <https://doi.org/10.1080/14680629.2024.2331193>.
- Martín, J. (1999). *Kinetic analysis of an asymmetrical DSC peak in the curing of an unsaturated polyester resin catalysed with MEKP and cobalt octoate*. Polymer, 40, 3451-3462. [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(98\)00556-4](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(98)00556-4).
- Meinel, D., Staude, A., Ehrig, K. (2014). *Analyzing Microstructure and Damage in Construction Materials with 3D Micro CT*. , 23-28.
- Murcia, D., Shanti, S., Hamidi, F., Rimsza, J., Yoon, H., Gunawan, B., Abdellatef, M., Taha, M. (2023). *Development and Characterization of a Sustainable Bio-Polymer Concrete with a Low Carbon Footprint*. Polymers,

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Nadir, H. M., Ahmed, A. (2022). *The mechanisms of sulphate attack in concrete—a review*, Modern Approaches on Material Science, 5(2), 658-670.
- Nagpal, A., Gabrani, G. (2019). *Python for Data Analytics*, Scientific and Technical Applications. 2019 Amity International Conference on Artificial Intelligence (AICAI), 140-145. <https://doi.org/10.1109/AICAI.2019.8701341>.
- Nazeer, M., Kapoor, K., Singh, S. P. (2023). *Strength, durability and microstructural investigations on pervious concrete made with fly ash and silica fume as supplementary cementitious materials*. Journal of Building Engineering, 69, 106275.
- Neithalath, N., Weiss, J., Olek, J. (2006). *Predicting the permeability of pervious concrete (enhanced porosity concrete) from non-destructive electrical measurements*. United States: Purdue University.
- Nodehi, M. (2021). *Epoxy, polyester and vinyl ester based polymer concrete: a review*, Innovative Infrastructure Solutions, 41062 s.
- Ojha, P. N., Kumar, S., Singh, B., Mohapatra, B. N. (2020). *Pervious concrete, plastic concrete and controlled low strength material-a special applications concrete*. Journal of Building Materials and Structures, 7(2), 221-235.
- Oliphant, T. (2007). *Python for Scientific Computing*, Computing in Science & Engineering, 9. <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.58>.
- Onizhuk, M., Ivanov, V., Panteleimonov, A., Kholin, Y. (2017). *Alternative Methods For Constructing Of Linear Regressions*, 12, 105-111.
- Özdemir, A. E., Ünal, S., Canbaz, M. (2024). *Resistance of Lightweight Polymer Concrete in Aggressive Environment*. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 1-12.
- Qin, Y., Yang, H., Deng, Z., He, J. (2015). *Water Permeability of Pervious Concrete Is Dependent on the Applied Pressure and Testing Methods*. Advances in Materials Science and Engineering, 2015, 1-6. <https://doi.org/10.1155/2015/404136>.
- Said, A., Quiroz, O. (2018). *Innovative Polymer-Modified Pervious Concrete*. 243-247. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78175-4_29.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Sandoval, G., Galobardes, I., Teixeira, R., Toralles, B. (2017). *Comparison between the falling head and the constant head permeability tests to assess the permeability coefficient of sustainable Pervious Concretes*. Case Studies in Construction Materials, 7, 317-328. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2017.09.001>.
- Sha, F., Zhang, S. M., Sun, X. C., Fan, G. X., Diao, Y., Duan, X. F., Wang, H. (2024). *Mechanical performance and pore characteristics of pervious concrete*, Case Studies in Construction Materials, 21, e03674.
- Stanić, F., Govedarica, O., Jaćimović, N., Lekić, B., Randelović, A. (2023). *A Novel Semi-Analytical (Inertial) Solution for Determining Permeability of Highly Pervious Porous Materials Using the Two-Reservoir Laboratory Setup*. Water Resources Research, 59. <https://doi.org/10.1029/2022WR034158>.
- Tang, C., Cheng, C., Tsai, C. (2019). *Mix Design and Mechanical Properties of High-Performance Pervious Concrete*. Materials, 12.
- Topçu, İ.B., (2006) *Yapı Malzemeleri ve Beton*, Eskişehir, 503 s
- Topçu, İ. B., Hocaoglu, İ. (2023). *Beton Teknolojisindeki Yeni Gelişmeler*, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 31(4), 1028-1044.
- TS 2824 EN 1338, 2005, *Zemin döşemesi için beton kaplama blokları - Gerekli şartlar ve deney metotları*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, s.8-10, 31-32.
- TS 436 EN 1340, 2005, *Zemin döşemesi için beton bordür taşları - Gerekli şartlar ve deney metotları*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, s.13.
- TS EN 1015-10, 2001, *Kâgir harcı-Deney metotları- Bölüm 10: Sertleşmiş harcın boşluklu kuru birim hacim kütlelerinin tayini*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, s.1-3.
- TS EN 1015-11, 2000, *Kâgir Harcı – Kâgir harcı - Deney metotları - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın basınç ve eğilme dayanımının tayini*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, s.4-10.
- TS EN 12504-4, 2012, *Beton deneyleri - Bölüm 4: Ultrasonik atımlı dalga hızının tayini*, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara, s.4-7.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Umale, S., Joshi, G. V. (2019). *Study of effect of chemicals (acid) attack on strength and durability of hardened concrete*. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 6(4), 548-552.
- Ünal, S., Canbaz, M. (2022). *Effect of industrial wastes on self-cleaning properties of concrete containing anatase-TiO₂*. Revista de la construcción, 21(3), 493-505.
- Venkati, B., Manjulavani, K. (2024). *Variation of aggregate size using sensors based on impact strength of pervious concrete*. Measurement: Sensors, 33, 101094. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101094>
- Wang, Z., Liu, Z., Zeng, F., He, K., Guo, S. (2024). *Review on frost resistance and anti-clogging of pervious concrete*. Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition).
- Wu, H., Liu, Z., Sun, B., Yin, J. (2016). *Experimental investigation on freeze-thaw durability of Portland cement pervious concrete (PCPC)*, Construction and Building Materials, 117, 63-71.
- Wu, J., Hu, L., Hu, C., Wang, Y., Zhou, J., Li, X. (2023). *Impact of Polypropylene Fiber on the Mechanical and Physical Properties of Pervious Concrete: An Experimental Investigation*, Buildings. <https://doi.org/10.3390/buildings13081966>
- Xiao, Q., Hu, X., Li, X., Zhang, G., Zhao, J. (2023). *Study on the Basic Mechanical Properties and Discrete Element Method Simulation of Permeable Concrete*. Sustainability. <https://doi.org/10.3390/su151813310>
- Xie, F., Li, J., Zhao, G., Zhou, P., Zheng, H. (2020). *Experimental study on performance of cast-in-situ recycled aggregate concrete under different sulfate attack exposures*, Construction and Building Materials, 253. 119144. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119144>.
- Yang, H., Liu, R., Zheng, Z., Liu, H., Gao, Y., Liu, Y. (2018). *Experimental Study on Permeability of Concrete*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 108. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/108/2/022067>.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Yogafanny, E., Triatmadja, R., Nurrochmad, F., Supraba, I. (2023). *Permeability coefficient of pervious cement mortar measured by the constant head and falling head methods*. Journal of Applied Engineering Science, <https://doi.org/10.5937/jaes0-44066>.
- Yu, F., Sun, D., Hu, M., Wang, J. (2019). *Study on the pores characteristics and permeability simulation of pervious concrete based on 2D/3D CT images*. Construction and Building Materials. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2018.12.135>.
- Yu, F., Sun, D., Wang, J., Hu, M. (2019). *Influence of aggregate size on compressive strength of pervious concrete*, Construction and Building Materials, 209, 463-475. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.140>
- Zhang, J., Guodong, M., Ruiping, M., Cui, X., Li, L., Xu, H. (2018). *Numerical study on seepage flow in pervious concrete based on 3D CT imaging*, Construction and Building Materials, 161, 468-478. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.11.149>.
- Zhang, Y., Li, H., Abdelhady, A., Yang, J. (2020). *Comparative laboratory measurement of pervious concrete permeability using constant-head and falling-head permeameter methods*, Construction and Building Materials, 263, 120614. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120614>.
- Zhao, P., Liu, X., Zuo, J., Huangfu, H., Liu, R., Xie, X., ... Shah, S. P. (2024). *Research on the strength prediction for pervious concrete based on design porosity and water-to-cement ratio*. Reviews on Advanced Materials Science, 63(1), 20220335.
- Zheng, Y., Zhuo, J., Zhang, P., Ma, M. (2022). *Mechanical properties and meso-microscopic mechanism of basalt fiber-reinforced recycled aggregate concrete*, Journal of Cleaner Production, 370, 133555. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133555>
- Zhong, R., Wille, K. (2015). *Material design and characterization of high performance pervious concrete*. Construction and Building Materials, 98, 51-60. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.08.027>.