



**ATIK LASTİK KATKILI
SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON (SSB) YOLLARIN
PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

Ömer Faruk KELEŞ

**Danışman: Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK
Doktora Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2024**

(Her hakkı saklıdır.)

T.C.
ATATÜRK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**ATIK LASTİK KATKILI SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON (SSB) YOLLARIN
PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI**

(Investigation of The Performance of Roller Compacted Concrete (RCC) Pavements
Containing Waste Rubber)

DOKTORA TEZİ

Ömer Faruk KELEŞ

Danışman: Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK

Erzurum
Haziran 2024

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

ATIK LASTİK KATKILI SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON (SSB) YOLLARIN PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK danışmanlığında, **Ömer Faruk KELEŞ** tarafından hazırlanan bu çalışma, **26/06/2024** tarihinde aşağıdaki jüri tarafından İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Ulaştırma Bilim Dalı'nda Doktora tezi olarak **oybirliği** ile kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Prof. Dr. Ahmet TORTUM <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Kadri Vefa EZİRMİK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR <i>Karadeniz Teknik Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Halim Ferit BAYATA <i>Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

Enstitü Yönetim
Kurulunun .../.../.... tarih
ve sayılı kararı.

Bu tezin Atatürk Üniversitesi Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddelerinde belirtilen şartları yerine getirdiğini onaylarım.

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN

Enstitü Müdürü

Aslı ıslak imzalıdır

Bu çalışma, Atatürk Üniversitesi BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje No: **FDK-2022-10554**

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaklardan yapılan bildiriş, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak olarak kullanımı, 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanunundaki hükümlere tabidir.

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Doktora Tezi olarak *Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK* danışmanlığında sunulan “Atık Lastik Katkılı Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Yolların Performansının Araştırılması” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	0	30
Kuramsal Temeller	3	30
Materyal ve Yöntem	10	35
Bulgular	3	20
Tartışma	3	20
Tezin Geneli	4	25

Not: Yedi kelimeye kadar benzerlikler ile Başlık, Kaynakça, İçindekiler, Teşekkür, Dizin ve Ekler kısımları tarama dışı bırakılabilir. Yukarıdaki azami benzerlik oranları yanında tek bir kaynaktan olan benzerlik oranlarının %5'den büyük olmaması gerekir.

Sunulan bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ettiğimizi beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Ömer Faruk KELEŞ	Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK
01.07.2024	01.07.2024
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

* Tez ile ilgili YÖKTEZ’de yayınlamasına ilişkin bir engelleme var ise aşağıdaki alanı doldurunuz.

Tezle ilgili patent başvurusu yapılması / patent alma sürecinin devam etmesi sebebiyle Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 2 (iki) yıl süreyle engellenmiştir.

Enstitü Yönetim Kurulunun .../.../.... tarih ve sayılı kararı ile teze erişim 6 (altı) ay süreyle engellenmiştir.

TEŞEKKÜR

Doktora Tezi olarak sunduğum bu çalışma sürecinin tüm aşamalarında bilgi ve tecrübesinden yararlandığım ve göstermiş olduğu ilgi ve desteklerinden dolayı çok değerli danışman hocam Sayın Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK' a içtenlikle şükranlarımı sunarım.

Bu çalışma, Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi (BAP) tarafından desteklenen “Atık Lastik katkılı Silindire Sıkıştırılmış Beton (SSB) Yolların Performansının Araştırılması” isimli Doktora Tez Projesi (FDK-2022-10554) kapsamında yapılmıştır. Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine katkılılarından dolayı teşekkür ederim.

Tez izleme komitemde bulunarak, bu süreçte değerli görüş ve desteklerini sunan Sayın Prof. Dr. Ahmet TORTUM ve Sayın Prof. Dr. Kadri Vefa EZİRMİK' e içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca doktora tez savunma jürimde bulunarak tezimin gelişmesine ve son halini almasında katkı sağlayan Sayın Prof. Dr. Muhammet Vefa AKPINAR' a ve Sayın Doç. Dr. Halim Ferit BAYATA 'ya teşekkür ederim.

Tez sürecimde deneysel çalışmalarındaki yardımlarından dolayı Doç. Dr. Halim Ferit BAYATA ve sonlu elemanlar metodundaki yardımlarından dolayı da Dr. Öğretim Üyesi Fatih İrfan BAŞ başta olmak üzere, her türlü yardımlarını ve kıymetli vakitlerini benden esirgemeyen Dr. Öğretim Üyesi M. Ali ÇOLAK, Arş. Gör. Ahmet Oğuz DEMİRİZ, Dr. Öğretim Üyesi H. Alperen BULUT, Dr. Öğretim Üyesi Ufuk KANDİL, Arş. Gör. Ahmet İhsan TURAN, Arş. Gör. Alper ÇELİK, Dr. Öğretim Üyesi Adem IŞIK, Dr. Öğretim Üyesi Harun AKOĞUZ, Dr. Öğretim Üyesi Okan Mert KATIPOĞLU ile Dr. Öğretim Üyesi İsmet ULUSU' ya çok teşekkür ederim.

Son olarak yaşantım süresince olduğu gibi doktora eğitimim boyunca da her zaman yanımda olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli eşime ve aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

Ömer Faruk KELEŞ

ÖZET

DOKTORA TEZİ

ATIK LASTİK KATKILI SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETON (SSB) YOLLARIN PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

Ömer Faruk KELEŞ

Danışman: Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK

Amaç: Bu çalışmada, sürdürülebilir silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) yol üretebilmek amacıyla, çevreyi kirleten ve her yıl yeterince bertaraf edilemeyen farklı boyutlarda atık lastiklerin kaba ve ince agrega yerine kullanılarak atık lastiğin SSB yolların mekanik, durabilite ve termal özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Yöntem: Parçalanmış, kırıntılı ve toz olmak üzere üç farklı boyuta sahip atık lastikler SSB karışımlarda maksimum %30 olacak şekilde altı düzeyde (%2.5, %5, %7.5, %10, %20 ve %30) agrega yerine hacimce ikame edilmiştir. Atık lastiklerin bileşimi ile elde edilen SSB yol karışımların mekanik özelliklerini incelemek amacıyla basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımları ile birlikte UPV, birim ağırlık ve elastisite modülleri belirlenmiş ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Atık lastik katkı SSB yol karışımlarının durabilite özelliklerini belirlemek amacıyla ise numuneler yüksek sıcaklık, donma-çözünme ile birlikte asit ve sülfat etkisine maruz bırakılmıştır. Ayrıca çalışmada atık lastik katkı SSB'nin fiziksel yapısını ve bunun beton özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için mikroyapı analizi taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak ele alınmıştır. Bununla birlikte, dış ortam sıcaklık verileri kullanılarak, 3B yazılım paketi ANSYS programı ile modellemeler sonlu elemanlar analiziyle yapılmıştır. Yapılan bu modellemeler ile atık lastiklerin SSB yollarda sıcaklık değişiminden kaynaklı oluşan gerilmeler üzerine etkileri incelenmiştir.

Bulgular: Atık lastik içeriğinin artmasıyla SSB karışımların dayanımlarında düşüşler elde edilmiştir. %30 atık lastik katkı SSB numunelerde, atık lastik içermeyen kontrol numuneleriyle kıyaslandığında basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımlarında sırasıyla %81, %60 ve %74 dayanım kaybı meydana gelmiştir. Dayanımlarda düşüşe sebep olmasına rağmen atık lastiğin %20 oranında kullanımıyla 4,96 MPa eğilme dayanımına sahip karışım elde edilerek kaplamalarda kullanımları mümkün kılınmıştır. %30 atık lastik katkı karışımlarda yüksek sıcaklık sonrası basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarında %62, %71 ve %97 oranlarında kayıp gerçekleşmiştir. %30 atık lastik katkı karışımlarda 300 döngümlük donma-çözünme sonrası basınç dayanımlarında %21 oranında kayıp gerçekleşmiştir. 180 gün asit etkisi sonrası %30 atık lastik katkı numunelerde basınç dayanım kaybı %55 oranında olurken, 180 gün sülfat etkisi sonrası %30 atık lastik katkı numunelerde basınç dayanım kaybı %18 oranında gerçekleşmiştir. Kaba ve ince agreganın kısmen atık lastiklerle değiştirmesiyle birlikte elastisite modülünde yaklaşık olarak %90 gibi önemli bir gerileme belirlenmiştir.

Sonuçlar: Atık lastiğin agrega yerine SSB'de kullanılması karışımların mekanik ve durabilite özelliklerinde olumsuz etkiye sebep olmuştur. Atık lastik miktarının artması karışım için daha fazla su ihtiyacının ortaya çıkmasına yol açmış ve düşük özgül ağırlığa ve boşluklu yapıya sahip olması nedeniyle %15 daha hafif karışım elde edilmesi sağlamıştır. Termal açıdan değerlendirildiğinde sonlu elemanlar analiz sonuçları, atık lastik içeriğinin artmasıyla yol tabakasında sıcaklık farklarından dolayı meydana gelen gerilmelerin azaldığı belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Silindirle sıkıştırılmış beton, atık lastik, mekanik özellikler, durabilite özellikleri, termal analiz, sonlu elemanlar yöntemi.

Haziran 2024, 202 sayfa

ABSTRACT

DOCTORAL DISSERTATION

INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF ROLLER COMPACTED CONCRETE (RCC) PAVEMENTS CONTAINING WASTE RUBBER

Ömer Faruk KELEŞ

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Osman Ünsal BAYRAK

Purpose: In this study, in order to produce sustainable roller compacted concrete (RCC) pavements, waste rubber tyres of different sizes, which pollute the environment and cannot be disposed of sufficiently every year, were used as coarse and fine aggregate substitutes to investigate the effects of waste rubber on the mechanical, durability and thermal properties of RCC pavements.

Method: Waste rubber in three different sizes (shredded, crumb and powder) was replaced by aggregate at six levels (2.5%, 5%, 7.5%, 10%, 20% and 30%) with a maximum of 30% in SSB mixtures. The compressive, flexural and splitting tensile strengths as well as UPV, unit weight and modulus of elasticity were determined and compared with each other in order to investigate the mechanical properties of the SSB pavement mixtures with waste rubber composition. In order to determine the durability properties of SSB pavement mixtures containing waste rubber, the specimens were subjected to elevated temperature, freeze thaw, acid and sulphate effects. In addition, microstructural analysis was performed using scanning electron microscopy (SEM) to investigate the physical structure of SSB with waste rubber and its effect on concrete properties. In addition, using outdoor temperature data, modeling was performed by finite element analysis using the 3D software package ANSYS. With these models, the effects of waste rubber tires on the stresses caused by temperature changes in SSB pavements were investigated.

Findings: In SSB specimens with 30% waste rubber content, 81%, 60% and 74% strength loss occurred in compressive, flexural and splitting tensile strengths, respectively, when compared to control specimens without waste rubber. Although it caused a decrease in strength, a mixture with a flexural strength of 4,96 MPa was obtained with the use of 20% waste rubber, making it possible to use them in pavements. In mixtures with 30% waste rubber content, 62%, 71% and 97% loss occurred in compressive, splitting tensile and flexural strengths after elevated temperature. In mixtures containing 30% waste rubber, a 21% loss in compressive strength occurred after 300 cycles of freeze thawing. After 180 days of acid effect, compressive strength loss was 55% in 30% waste tire-containing specimens, while compressive strength loss was 18% in 30% waste tire-containing specimens after 180 days of sulfate effect. With the partial replacement of coarse and fine aggregate with waste tires, a significant decrease of approximately 90% in the modulus of elasticity was determined.

Results: The use of waste rubber in SSB instead of aggregate had a negative effect on the mechanical and durability properties of the mixtures. The increase in the amount of waste rubber resulted in the need for more water for the mixture and resulted in a 15% lighter mixture due to its low specific gravity and hollow structure. From a thermal point of view, the finite element analysis results show that the stresses in the pavement layer due to temperature differences decrease with increasing waste rubber content.

Keywords: Roller compacted concrete, waste rubber, mechanical properties, durability properties, thermal analysis, finite element method.

June 2024, 202 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xvii
GİRİŞ.....	1
Amaç ve Kapsam	2
KURAMSAL TEMELLER.....	4
Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Yol	4
Tanım ve tarihçe.....	4
Silindirle sıkıştırılmış beton yolun avantajları ve dezavantajları	7
Silindirle sıkıştırılmış beton yolun uygulama alanları	9
Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yol Özellikleri ve Karışım Tasarımı.....	10
SSB yol üretimi	12
SSB yollarda kullanılan malzemeler.....	26
SSB yolların karışım ve yapısal tasarımları	32
Beton Yollarda Atık Kullanımı	33
Atık lastik.....	33
Silindirle sıkıştırılmış beton yollarda atık lastik kullanımı	36
Literatür Özeti	36
MATERYAL VE YÖNTEM	41
Materyal	41
Agrega.....	41
Çimento ve Su.....	43
Atık Lastik.....	44
Yöntem.....	46
Su içeriğinin ve karışım oranlarının belirlenmesi	46
SSB karışım hesabı ve kodlama	49

Numunelerin üretimi ve kür	51
Yapılan Deneyler, Ölçümler ve Analizler.....	53
Taze beton birim ağırlık deneyi	53
Basınç dayanımı deneyi	54
Elastisite modülü deneyi	55
Yarmada çekme dayanımı deneyi	56
Eğilme dayanımı deneyi.....	57
Ultrases geçiş hızı deneyi.....	57
Kılcal su emme deneyi	59
Yüksek sıcaklık etkisi	61
Donma-çözünme etkisi.....	63
Asit ve sülfat etkisi.....	65
Mikroyapı analizi	67
Sıcaklık dağılımı ve sonlu elemanlar analizi	68
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	73
Taze Beton Birim Ağırlık Deneyi Sonuçları.....	73
Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları	74
Elastisite Modülü Deneyi Sonuçları.....	77
Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi Sonuçları	79
Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları.....	81
Mikroyapı Analizi	84
Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları	86
Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları	90
Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonuçları.....	97
Görsel analiz.....	97
Kütle değişimi	99
Basınç dayanımı	103
Yarmada çekme dayanımı.....	105
Eğilme dayanımı	107
Ultrases geçiş hızı	110
Mikroyapı analizi	114
Donma-Çözünme Etkisi Sonuçları.....	117
Görsel analiz.....	117
Kütle değişimi	120
Basınç dayanımı	123

Yarmada çekme dayanımı.....	124
Ultras es geçiş hızı	126
Mikroyapı analizi	128
Asit ve Sülfat Etkisi Sonuçları	130
Görsel analiz.....	130
Kütle değişimi	134
Basınç dayanımı	139
Ultras es geçiş hızı	144
Sonlu Elemanlar Analizi	148
Sıcaklık model doğrulaması.....	154
Statik (yapısal) model doğrulaması.....	157
SSB plakların sonlu elemanlar analiz sonuçları.....	159
SSB yolların modellenmesi ve sonlu elemanlar analiz sonuçları	161
SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	168
KAYNAKLAR.....	171
ÖZGEÇMİŞ.....	182

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. SSB Yollar İçin Karma Agrega Gradasyon Aralıkları	29
Tablo 2. Agregaların Fiziksel Özellikleri	42
Tablo 3. SSB Karışımlarda Kullanılan Agreganın Elek Analiz Sonucu	43
Tablo 4. Çimentonun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri	44
Tablo 5. Atık Lastiklerin Fiziksel Özellikleri	44
Tablo 6. SSB Karışımların Su İçeriği – Maksimum Kuru Birim Ağırlık İlişkisi.....	49
Tablo 7. SSB Karışımların Karışım Oranları.....	50
Tablo 8. Birim Ağırlık Deney Sonuçları	73
Tablo 9. SSB Numunelerin Basınç Dayanımı Deney Sonuçları	75
Tablo 10. SSB Numunelerin Elastisite Modülü Deney Sonuçları	78
Tablo 11. SSB Numunelerin Yarmada Çekme Dayanımı Deney Sonuçları	79
Tablo 12. SSB Numunelerin Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları	81
Tablo 13. SSB Silindir Numunelerin UPV Sonuçları.....	86
Tablo 14. SSB Kiriş Numunelerin UPV Sonuçları.....	87
Tablo 15. SSB Numunelerin Kılcallık Katsayıları	91
Tablo 16. SSB Küp Numunelerin Yüksek Sıcaklık Kütle Kayıpları.....	99
Tablo 17. SSB Kiriş Numunelerin Yüksek Sıcaklık Kütle Kayıpları.....	100
Tablo 18. SSB Numunelerin Yüksek Sıcaklık Basınç Dayanımları.....	104
Tablo 19. SSB Numunelerin Yüksek Sıcaklık Yarmada Çekme Dayanımları.....	106
Tablo 20. SSB Numunelerin Yüksek Sıcaklık Eğilme Dayanımları	108
Tablo 21. SSB Küp Numunelerin Yüksek Sıcaklık UPV Sonuçları	111
Tablo 22. SSB Kiriş Numunelerin Yüksek Sıcaklık UPV Sonuçları	112
Tablo 23. SSB Numunelerin Donma-Çözünme Kütle Kayıpları	121
Tablo 24. SSB Numunelerin Donma-Çözünme Basınç Dayanımları.....	123
Tablo 25. SSB Numunelerin Donma-Çözünme Yarmada Çekme Dayanımları.....	124
Tablo 26. SSB Numunelerin Donma-Çözünme UPV Sonuçları	126
Tablo 27. SSB Numunelerin Asit Etkisi Kütle Kayıpları	134
Tablo 28. SSB Numunelerin Sülfat Etkisi Kütle Kayıpları	136
Tablo 29. SSB Numunelerin Asit Etkisi Basınç Dayanımları	139
Tablo 30. SSB Numunelerin Sülfat Etkisi Basınç Dayanımları	141
Tablo 31. SSB Numunelerin Asit Etkisi UPV Sonuçları.....	145
Tablo 32. SSB Numunelerin Sülfat Etkisi UPV Sonuçları.....	146
Tablo 33. SSB Plakların Yaz Aylarındaki Sıcaklık Ölçüm Sonuçları.....	149

Tablo 34. SSB Plakların Kış Aylarındaki Sıcaklık Ölçüm Sonuçları.....	150
Tablo 35. SSB'nin Kaplama Kalınlığı Boyunca Ölçülen ve Hesaplanan Sıcaklık Dağılımları	152
Tablo 36. Plak ve Yol Modellemeleri İçin Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Veriler	154
Tablo 37. Kontrol Numunesi İçin Basınç Testi ve Statik Yapısal Analiz İçin Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi Karşılaştırması	158
Tablo 38. SSB Plakların Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları	159
Tablo 39. 3,5x7,0 m Boyutlarındaki SSB Yolların Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları.....	163



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Silindirle sıkıştırılmış beton yol	4
Şekil 2. Silindirle sıkıştırılmış beton yol tarihçesi	6
Şekil 3. Türkiye’de silindirle sıkıştırılmış beton yol uygulanan iller	6
Şekil 4. SSB yolun havaalanları ve limanlarda uygulaması.....	9
Şekil 5. SSB yolun tomruk tesisleri ve emniyet şeritlerinde uygulanması	10
Şekil 6. SSB yolun yerleştirilmeden önce temel tabaksının hazırlanması	13
Şekil 7. SSB yolun üretilmesi ve kaplama sahasına taşınması.....	14
Şekil 8. SSB yolun yerleştirilmesi.....	15
Şekil 9. SSB yolların sıkıştırılması	17
Şekil 10. İlk serim şeridinin sıkıştırılması.....	19
Şekil 11. İç serim şeritlerinin sıkıştırılması.....	20
Şekil 12. SSB yollarda boyuna taze derz yapımı.	21
Şekil 13. SSB yollarda boyuna soğuk derzlerin oluşturulması.	22
Şekil 14. İkinci tabakada kullanılan serme pabucu ve birinci tabaka bağlantısından bitişik ikinci şeritten yansıyan boyuna çatlak	23
Şekil 15. SSB yollarda enine ve boyuna kesilmiş derzler.....	24
Şekil 16. SSB yollara uygulanan su kürü	25
Şekil 17. SSB yollara kür kimyasalının uygulanması	25
Şekil 18. Beton yollarda membran kürünün uygulanması.	26
Şekil 19. SSB yollar için önerilen karma agrega gradasyonu ile ince ve kaba agrega gradasyon eğrileri.....	28
Şekil 20. Depolanan atık lastikler.....	34
Şekil 21. Farklı boyutlarda lastik üretim süreci.	35
Şekil 22. Çalışmada kullanılan agregaların fiziksel özelliklerin belirlenmesi.	41
Şekil 23. Çalışmada kullanılan agregalar.	42
Şekil 24. SSB karışımının agrega granülometri eğrisi.	43
Şekil 25. Parçalanmış, kırıntı ve toz atık lastik.	44
Şekil 26. SEM görüntüleri; atık lastik (0-1 mm) (a) ve SSB’de atık lastik (b).	45
Şekil 27. Atık lastik parçacıklarının XRD spektrumu.....	46
Şekil 28. SSB karışımlar için modifiye proktor deneyinin yapılışı.....	47
Şekil 29. Numunelerin ağırlıklarının belirlenmesi ve etüvde kurutulması.	48
Şekil 30. SSB karışımların su içeriği – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi.....	49
Şekil 31. SSB numunelerin üretilmesinde kullanılan titreşimli tokmak ve el kompaktörü.	51

Şekil 32. SSB numunelerin üretimi ve kür.....	52
Şekil 33. SSB plakların dökümü öncesi zeminin kompaktörle sıkıştırılması	53
Şekil 34. SSB plakların üretimi.....	53
Şekil 35. Taze beton birim ağırlık deneyi.	54
Şekil 36. Tek eksenli basınç deneyi cihazı ve deneyin yapılışı.....	55
Şekil 37. Elastisite modülü deney düzeneği ve deneyin yapılışı.....	56
Şekil 38. Yarmada çekme deney düzeneği ve deneyin yapılışı.	56
Şekil 39. Eğilme deneyi cihazı ve deneyin yapılışı.....	57
Şekil 40. Ultrases geçiş hızı deney cihazı.	58
Şekil 41. Ultrases geçiş hızı deneyinin yapılışı.....	59
Şekil 42. Kılcal su emme test prosedürü (Anonymous 2020d).....	59
Şekil 43. SSB disklerin etüvde kurutulması.....	60
Şekil 44. Kılcal su emme testi için hazırlanan SSB diskler ve testin yapılışı.	60
Şekil 45. Yüksek sıcaklık fırını ve numunelerin fırına yerleştirilmesi.	62
Şekil 46. Yakım sonrası SSB numunelere uygulanan deneyler.	62
Şekil 47. Yakım prosedürünün şematik gösterimi.	63
Şekil 48. Donma-çözünme kabini.	64
Şekil 49. Numunelerin sülfirik asit ve sodyum sülfat çözeltilerine daldırılması ve kapalı şekilde bekletilmesi.....	65
Şekil 50. Asit ve sülfat etkisi sonrası SSB numunelere uygulanan deneyler.....	66
Şekil 51. Numunelerin asit ve sülfat çözeltilerine daldırılmadan önce ve sonra temizlenmesi, etüvde kurutulması ve tartılması.	67
Şekil 52. Mikroyapı analizi için kullanılan taramalı elektron mikroskobu.....	68
Şekil 53. SEM numuneleri ve numunelerin cihaza yerleştirilmesi.	68
Şekil 54. SSB plaklardan yaz ve kış aylarında sıcaklık verilerinin toplanması.	69
Şekil 55. Sıcaklık veri kaydedicisi ve termokuplların kalibrasyonu.	70
Şekil 56. Termokuplların SSB karışımlara yerleştirilmesi.....	70
Şekil 57. Termokuplların SSB plaklar içerisinde konumlandırıldığı yerler.....	71
Şekil 58. Çalışmada yapılan deney özetleri.	72
Şekil 59. SSB birim ağırlıkların atık lastik oranına göre değişimi.....	74
Şekil 60. SSB basınç dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.....	76
Şekil 61. SSB numunelerinin basınç dayanımı testi sonrası kırılma yüzeyleri.....	77
Şekil 62. SSB numunelerinin elastisite modüllerinin atık lastik oranına göre değişimi.	78
Şekil 63. SSB numunelerinin gerilim-gerinim eğrileri.	79
Şekil 64. SSB yarmada çekme dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.....	80

Şekil 65. SSB numunelerinin yarmada çekme dayanımı testi sonrası kırılma yüzeyleri.....	81
Şekil 66. SSB eğilme dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.....	83
Şekil 67. C ve WR30 SSB numunelerinin eğilme dayanımı testi sonrası kırılma yüzeyleri. ..	83
Şekil 68. Birim ağırlık ve dayanımlar arasındaki ilişki.....	84
Şekil 69. SSB numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (C ve WR30).....	85
Şekil 70. Silindir ve Kiriş SSB numunelerin UPV değerleri.	88
Şekil 71. SSB numunelerin basınç dayanımları ve UPV arasındaki ilişkiler.....	89
Şekil 72. SSB numunelerin eğilme dayanımları ve UPV arasındaki ilişkiler.	89
Şekil 73. Su emme oranının elde edildiği örnek grafik (Anonymous 2020d).....	90
Şekil 74. 28 günlük SSB numunelerin kılcallık katsayılarının atık lastik oranına göre değişimi.....	92
Şekil 75. 90 günlük SSB numunelerin kılcallık katsayılarının atık lastik oranına göre değişimi.....	93
Şekil 76. 28 ve 90 günlük SSB numunelerin kılcallık katsayılarının ilişkisi.....	93
Şekil 77. SSB numunelerin 28 günlük su emme - zaman grafik örnekleri.	95
Şekil 78. SSB numunelerin 90 günlük su emme - zaman grafik örnekleri.	96
Şekil 79. Farklı sıcaklıklara maruz kalan SSB numunelerin görsel karşılaştırılması.	98
Şekil 80. SSB küp numunelerin yüksek sıcaklık kütle değişim oranlarının atık lastik oranına göre değişimi.....	100
Şekil 81. SSB kiriş numunelerin yüksek sıcaklık kütle değişim oranlarının atık lastik oranına göre değişimi.....	101
Şekil 82. SSB küp numunelerin yüksek sıcaklık bağıl kütle oranlarının sıcaklığa göre değişimi.....	102
Şekil 83. SSB kiriş numunelerin yüksek sıcaklık bağıl kütle oranlarının sıcaklığa göre değişimi.....	102
Şekil 84. SSB numunelerin yüksek sıcaklık basınç dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.....	104
Şekil 85. SSB numunelerin yüksek sıcaklık basınç dayanımlarının sıcaklığa göre değişimi.	105
Şekil 86. SSB numunelerin yüksek sıcaklık yarmada çekme dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.....	106
Şekil 87. SSB numunelerin yüksek sıcaklık yarmada çekme dayanımlarının sıcaklığa göre değişimi.....	107
Şekil 88. SSB numunelerin yüksek sıcaklık eğilme dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.....	108

Şekil 89. SSB numunelerin yüksek sıcaklık eğilme dayanımlarının sıcaklığa göre değişimi.....	109
Şekil 90. SSB numunelerin yüksek sıcaklık UPV değerlerinin atık lastik oranına göre değişimi.....	112
Şekil 91. SSB küp numunelerin yüksek sıcaklık UPV değerlerinin oranına göre değişimi. .	114
Şekil 92. SSB kırış numunelerin yüksek sıcaklık UPV değerlerinin sıcaklığa göre değişimi.....	114
Şekil 93. Kontrol SSB numunelerin (C) yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri.....	115
Şekil 94. %30 atık lastik katkılı SSB numunelerin (WR30) yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri.....	116
Şekil 95. 300 donma-çözünme döngü sonrası SSB numunelerindeki yüzey çatlakları.	118
Şekil 96. Donma-çözünme döngülerine maruz kalan SSB numunelerde meydana gelen pullanmalar.....	118
Şekil 97. Donma-çözünme döngülerine maruz kalan SSB numunelerin görsel karşılaştırılması.	120
Şekil 98. SSB numunelerin donma-çözünme kütle değişim oranlarının atık lastik oranına göre değişimi.....	121
Şekil 99. SSB numunelerin donma-çözünme kütle oranlarının döngü saylarına göre değişimi.....	122
Şekil 100. SSB numunelerin donma-çözünme basınç dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.....	124
Şekil 101. SSB numunelerin donma-çözünme yarmada çekme dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.....	125
Şekil 102. SSB numunelerin donma-çözünme UPV değerlerinin atık lastik oranına göre değişimi.....	127
Şekil 103. SSB numunelerin donma-çözünme UPV değerlerinin döngü saylarına göre değişimi.....	128
Şekil 104. Kontrol (C) ve %30 atık lastik katkılı SSB numunelerin (WR30) 300 donma-çözünme döngü sonrası SEM görüntüleri.....	129
Şekil 105. SSB numunelerinin asit etkisi sonrası atık lastik oranına göre görsel değişimi. ..	131
Şekil 106. SSB numunelerinin sülfat etkisi sonrası atık lastik oranına göre görsel değişimi.	131
Şekil 107. Sülfürik asit çözeltilerine maruz kalan SSB numunelerin görsel karşılaştırılması.	132

Şekil 108. Sodyum sülfat çözeltilerine maruz kalan SSB numunelerin görsel karşılaştırılması.	133
Şekil 109. SSB numunelerin asit etkisi kütle değişim oranlarının atık lastik oranına göre değişimi.	135
Şekil 110. SSB numunelerin sülfat etkisi kütle değişim oranlarının atık lastik oranına göre değişimi.	136
Şekil 111. Asit etkisi sonrası SSB numunelerin bağıl kütle oranlarının günlere göre değişimi.	137
Şekil 112. Sülfat etkisi sonrası SSB numunelerin bağıl kütle oranlarının günlere göre değişimi.	137
Şekil 113. SSB numunelerin asit etkisi basınç dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.	140
Şekil 114. SSB numunelerin sülfat etkisi basınç dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.	141
Şekil 115. SSB numunelerin asit etkisi basınç dayanımlarının günlere göre değişimi.	142
Şekil 116. SSB numunelerin sülfat etkisi basınç dayanımlarının günlere göre değişimi.	143
Şekil 117. SSB numunelerin asit etkisi UPV değerlerinin atık lastik oranına göre değişimi.	146
Şekil 118. SSB numunelerin sülfat etkisi UPV değerlerinin atık lastik oranına göre değişimi.	147
Şekil 119. Yaz ve kış aylarında ölçülen hava sıcaklığının zamana göre değişimi.	149
Şekil 120. Beton plaklardaki bilineer sıcaklık değişimi.	150
Şekil 121. SSB plakların orta noktasından ölçülen sıcaklığın plak kalınlığına göre değişimi.	151
Şekil 122. SSB numunelerin ısı iletkenlik katsayılarının atık lastik oranına göre değişimi.	153
Şekil 123. SSB plaktaki sıcaklık dağılımı.	154
Şekil 124. Bir levha boyunca ısı iletimi (Earle 1983)	155
Şekil 125. SSB plaktaki toplam ısı akışı.	156
Şekil 126. SSB plaktaki termal şekil değiştirme.	157
Şekil 127. SSB plağın statik (yapısal) doğrulanması.	158
Şekil 128. Kontrol numunesi için statik yapısal analiz gerilme-şekil değiştirme verileri.	159
Şekil 129. SSB kontrol plak numunesinde meydana gelen maksimum asal gerilme.	160
Şekil 130. SSB kontrol plak numunesinde X ve Y yönlerindeki deformasyon.	160
Şekil 131. SSB kontrol plak numunesinde Z yönündeki deformasyon.	161
Şekil 132. SSB kontrol plak numunesinde meydana gelen toplam şekil değiştirme.	161
Şekil 133. SSB yol modeli için derz kesimi ve derz sınır şartları.	162

Şekil 134. SSB yol modeli için sıcaklık sınır şartları.....	162
Şekil 135. SSB yol numunesindeki sıcaklık dağılımı.	163
Şekil 136. SSB yolda meydana gelen maksimum asal gerilme.	164
Şekil 137. SSB yolda X yönünde meydana gelen doğrusal deformasyon.	166
Şekil 138. SSB yolda Y yönünde meydana gelen doğrusal deformasyon.	166
Şekil 139. SSB yolda Z yönünde meydana gelen doğrusal deformasyon.....	167



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

AASHTO	: American Association of State Highway and Transportation Officials
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
ACI	: American Concrete Institute
ACPA	: American Concrete Pavement Association
Al₂O₃	: Alüminyum oksit
ANFIS	: Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
ANOVA	: Analysis of Variance
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BSK	: Bitümlü Sıcak Karışım
CaO	: Kalsiyum oksit
CH	: Kalsiyum hidroksit
Cl	: Klor
cm	: Santimetre
cm²	: Santimetrekare
cm³	: Santimetreküp
CSH	: Kalsiyum silikat hidrat
dk	: Dakika
dm³	: Desimetreküp
DYK	: Doygun Yüzey Kuru
Fe₂O₃	: Demir oksit
ft	: Feet
GBFS	: Ground granulated blast-furnace slag
gr	: Gram
H₂SO₄	: Sülfürik asit
ITZ	: Interfacial Transition Zone
K	: Kelvin
K₂O	: Potasyum oksit
kg	: Kilogram
km	: Kilometre
m	: Metre
m³	: Metreküp
MgO	: Magnezyum oksit
mm	: Milimetre

mm²	: Milimetrekaare
mm³	: Milimetrekyüp
MPa	: Mega Paskal
Na₂O	: Sodyum oksit
Na₂SO₄	: Sodyum sülfat
NaOH	: Sodyum hidroksit
NBR	: Acrylonitrile Butadiene Rubber
NMAS	: Nominal Maximum Size of Aggregate
No.	: Numara
NR	: Natural Rubber
Psi	: Pounds per square inch (inçkareye düşen pound)
R²	: Determinasyon katsayısı
RAP	: Reclaimed Asphalt Pavement
S/ç	: Su/çimento oranı
SBS	: Styrene Butadiene Styrene
SCM	: Supplementary Cementitious Materials
SEM	: Scanning Electron Microscope
SiO₂	: Silikon dioksit
sn	: Saniye
SO₃	: Kükürt trioksit
SSB	: Silindirle Sıkıştırılmış Beton
USACE	: United States Army Corps of Engineers
vb.	: Ve benzeri
W	: Watt
WR	: Waste Rubber
XRD	: X-Ray diffraction
ZnO	: Çinko oksit
ZnS	: Çinko sülfit
µsn	: Mikrosaniye
µm	: Mikrometre
%	: Yüzde
θ	: Teta
°	: Derece
°C	: Santigrat derece

GİRİŞ

Günümüzde araç sahipliğinde ve trafik yoğunluğunda önemli artışlar yaşanmaktadır. Bununla birlikte altyapı inşalarının gelişmesiyle hızlı, verimli, konforlu ve güvenli ulaşım olan talep de sürekli artmıştır. Bu artışlar, yolların ömrünü büyük ölçüde azaltmış, sürücüler için riskleri artırmış ve yolların bakım maliyetlerini de artırmıştır. Kaplamanın ömrünün uzatılması, maliyetinin azaltılması ve sürdürülebilir altyapı gelişimi, dünyada kaplama geliştirme üzerine önem ve öncelik kazanmıştır (Hasselwander *et al.* 2022; Romeo *et al.* 2014; Al-Qadi *et al.* 2003). Yeni malzemelerin ortaya çıkması, yol yapımı teknolojisindeki gelişmelerle küresel petrol fiyatlarındaki artış ve esnek kaplamalardaki bazı kusurların varlığıyla birlikte mevcut kaplamalar geliştirilmiş ya da çeşitli kaplama türleri ortaya çıkmıştır (Tavakoli *et al.* 2020). Birçok ülkede, esnek kaplamalara kıyasla daha yüksek yük taşıma kapasitesine, daha uzun hizmet ömrüne ve çevresel etkilere karşı daha yüksek dayanıklılığa sahip olduklarından dolayı, rijit kaplamalar giderek daha fazla benimsenmektedir (Pranav *et al.* 2023). Ayrıca, asfalt kaplamaların yüksek üretim maliyeti ve fazla miktarda çevreyi kirleten petrol ürünü içermesinden dolayı kaplamalarda alternatif teknolojilerin kullanımını zorunlu kılmıştır (Ashrafian *et al.* 2020). Geleneksel betonlar ve silindirle sıkıştırılmış betonlar (SSB) rijit kaplamalarda kullanılan beton çeşitleridir. SSB için en önemli mühendislik uygulamaları, SSB barajlar ve SSB yollardır. Silindirle sıkıştırılmış beton yol, daha düşük maliyeti ve hızlı inşası nedeniyle geleneksel derzli düz beton yollara göre bir sonraki seçenek olarak ortaya çıkmaktadır (Shao *et al.* 2022; Selvam *et al.* 2022; Luhr 2006).

SSB yol, geleneksel betonla aynı bileşenlerden (agregalar, çimento, su ve isteğe bağlı olarak katkı maddeleri) oluşmaktadır. SSB yol, sıfır çökmeye sahip olması (çok kuru beton), daha fazla miktarda agrega ve daha az miktarda çimento içermesi ile geleneksel betondan farklıdır. Ayrıca SSB yol, son işlem, dübel, bağlantı çubuğu veya çelik donatı gerektirmeyen, bir kaplama türüdür. SSB kaplamalar hızlı üretim tekniği, yüksek dayanıklılıkları ve normal betona göre düşük maliyetleri nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir (Meddah *et al.* 2014; Yildizal *et al.* 2018; Liu *et al.* 2014).

Nüfusun artmasıyla, insanların hareketlilik ihtiyaçlarında da artış gözlemlenmiştir. Böylece, erişilebilir, esnek ve sürdürülebilir ulaşım yöntemlerine yönelik ilgi de artmıştır. Günümüzde sürdürülebilir altyapı gelişimi giderek daha önemli hale gelmiştir. Özellikle yenilenemeyen kaynakların tüketiminin azaltılması yoluyla karayolu sektörüne sürdürülebilirlik getirilmesine yönelik artan bir ilgi vardır. Ayrıca son yıllarda, azalan

bütçelerden dolayı, artan trafik hacimleri ve yükleri nedeniyle kaplama sürdürülebilirliği ve korunmasına yönelik stratejilere de odaklanılmıştır. Altyapı sürdürülebilirliğine ulaşmaya yönelik yaklaşımlardan biri, çevresel etkileri azaltan ve doğal agrega tüketimini sınırlayan atık veya yan ürün malzemelerinin kullanılmasıdır (Çolak *et al.* 2023; Chan *et al.* 2011; Baş *et al.* 2022). Dünya çapında altyapı geliştirme faaliyetlerinin artması, betona olan talebi de önemli bir şekilde artırmıştır. Bu durum, beton hacminin yaklaşık %50-70'ini oluşturan kaba agreganın aşırı tüketimine ve beton üretimi için bu temel malzemenin yetersiz tedarikine yol açmıştır. Bu nedenle, endüstriyel yan ürünler ve atık malzemeler gibi doğal agregalara alternatif malzemelerin araştırılması zorunlu hale gelmiştir (Rashad 2022). Agregaların betonun yaklaşık yüzde 70'ini oluşturduğu göz önüne alındığında, bunların atık malzemelerle değiştirilmesi faydalı bir seçim olarak değerlendirilebilir (Tavakoli *et al.* 2020; Moradi *et al.* 2021). Atıkların beton bileşenlerine alternatif olarak kullanılması etkili bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu katı atıkların başında çevreyi kirleten ve her yıl yeterince bertaraf edilemeyen atık lastik gelmektedir (Bayraktar *et al.* 2021). Atık kauçuk malzemenin betonda agrega yerine kullanımının beton performansına etkisine ilişkin son yıllarda birçok çalışma rapor edilmiştir (Chen *et al.* 2023; Miah *et al.* 2023; Akın *et al.* 2022; Alsaiif *et al.* 2022; Sidhu *et al.* 2023). Betonda kullanılan lastikler, parçalanmış, kırıntı veya toz gibi farklı tiplerde olmak üzere agregaların yerini alabilmektedirler. Farklı yöntemlerle çeşitli boyutlarda oluşturulabilen bu lastiklerin betonlarda kullanımı, düşük yoğunluk, yüksek ses emilimi, darbe direnci ve sürdürülebilirlik açısından birçok avantaj sağlarken betonun mukavemetinde ciddi düşüslere sebep olabilmektedir.

Amaç ve Kapsam

Bu çalışmada atık lastiğin, SSB kaplamaların fiziksel, mekanik ve durabilite özellikleri üzerindeki etkisi incelenerek SSB kaplamalarda kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bununla birlikte SSB karışımların değişen dış çevre ortam sıcaklığı altındaki davranışlarındaki atık lastik içeriğinin etkisi, sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmesi amaçlanmıştır.

Daha önce yapılan çalışmalarda atık lastik, betonda ince veya kaba agrega yerine sadece parçalanmış, kırıntı veya toz şeklinde ayrı ayrı kullanılmıştır. Bu çalışmada, literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak atık lastik, parçalanmış, kırıntı ve toz gibi farklı tiplerde, hepsinin birlikte kullanıldığı bir kombin şeklinde kaba ve ince agrega yerine kullanılmıştır. Kaba ve ince agrega yerine ikame olarak hacimce altı farklı atık lastik oranıyla (%2,5, %5, %7,5, %10, %20 ve %30) birlikte SSB numuneler üretilmiştir. Atık lastiklerin bileşimi ile elde edilen SSB yol karışımların mekanik özelliklerini incelemek amacıyla basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımları ile birlikte UPV, birim ağırlık ve elastisite modülleri

belirlenmiş ve sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Atık lastik katkıli SSB yol karışımlarının durabilite özelliklerini belirlemek amacıyla ise numuneler yüksek sıcaklık, donma-çözünme ile birlikte asit ve sülfat etkisine maruz bırakılmıştır. Ayrıca çalışmada atık lastik katkıli SSB'nin fiziksel yapısını ve bunun beton özellikleri üzerindeki etkisini incelemek için mikroyapı analizi taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak ele alınmıştır. Bununla birlikte, dış ortam sıcaklık verileri kullanılarak, 3B yazılım paketi ANSYS programı ile modellemeler sonlu elemanlar analiziyle yapılmıştır. Yapılan bu modellemeler ile atık lastiklerin SSB yollarda sıcaklık değişiminden kaynaklı oluşan gerilmeler üzerine etkileri incelenmiştir.



KURAMSAL TEMELLER

Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Yol

Tanım ve tarihçe

Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB), kaplamalar ve diğer uygulamalar için kullanılan, çimento katkılı hidrolik olarak bağlanan bir malzemedir (Anonymous 2013a). Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) kaplamalar genellikle bitümlü sıcak karışım (BSK) asfalt kaplamalara benzer teknikler kullanılarak inşa edilen sıfır çökmeli beton karışımları olarak tanımlanır (Williams and McFarland 2013). Amerikan Beton Enstitüsünün (ACI-American Concrete Institute) tanımına göre SSB; “Taze durumda sıkıştırılırken silindirin ağırlığını taşıyabilen, silindir ile sıkıştırılan beton olarak adlandırılır (Anonymous 2000).”



Şekil 1. Silindirle sıkıştırılmış beton yol (Anonymous 2011).

Bir kaplama yüzeyi olarak silindirle sıkıştırılmış beton yol, belirli kaplama projelerinin gereksinimlerini geleneksel beton kaplamalara göre daha iyi karşılayabilecek bir beton kaplama alternatifi sunmaktadır (Zollinger 2016). Silindirle sıkıştırılmış beton, geleneksel betonla benzer dayanım özellikleri ve agrega gradasyonu ile birlikte bağlayıcı malzeme ve su gibi benzer malzeme içeriklerine sahip olmaktadır (Harrington *et al.* 2010). Fakat karışım oranları, agrega derecelendirmesi ve içeriğinin SSB'nin dökümden hemen sonra trafik yükünü taşıyabileceği şekilde olması gerektiğinden dolayı farklıdır (Anonymous 2013a). Silindirle sıkıştırılmış beton ile geleneksel beton arasındaki en büyük fark, daha iyi bir sıkıştırmayı sağlayan ince taneli agrega içeriğinin silindirle sıkıştırılmış betonda daha fazla olmasıdır. Ayrıca silindirle sıkıştırılmış betonun yoğunluğu, titreşimli silindirin altında sıkıştırma esnasında bozulmadan kalabilecek kadar katı, üretim, dağıtım ve serim aşamalarında

karışımın segregasyonuna izin vermeyecek kadar da su içeriğine sahip olmalıdır (Harrington *et al.* 2010).

Silindirle sıkıştırılmış beton kaplamaların ilk örneğine 1930'ların başında İsveç'te farklı bir çeşidi olarak rastlanmıştır. Bu yıllarda farklı alanlardaki sıkıştırma işlemleri silindir bulunmadığı için titreşim uygulanarak yapılmıştır. Tam anlamıyla silindirle sıkıştırılmış beton kaplamaların kullanımı, Amerika Birleşik Devletleri Ordusu Mühendisler Birliği (United States Army Corps of Engineers - USACE) tarafından 1942 yılında Yakima, Washington'da bir havaalanı pistinin inşa edilmesiyle ortaya çıkmıştır. SSB yol uygulamalarının ilk izleri 1930'lu ve 1940'lı yıllara kadar uzanmasına rağmen ilk uygulamalar düzensiz ve tutarsız olarak kayda geçmiştir (Harrington *et al.* 2010; Anonymous 2017a). SSB'nin bugün tanınabilecek bir formdaki başlangıcı, yapımı kolay, donmaya karşı dayanıklı ve aşınmaya karşı çok dayanıklı bir malzemeye ihtiyacına çözüm olarak 1970'lerde Kanada tomrukçuluk endüstrisinde kullanılmasıyla olmuştur (Harrington *et al.* 2010; Anonymous 2013b). Kanada'da uygulanan kaplama projesinin başarısıyla birlikte, daha fazla kaplama projeleri uygulanmış ve sonunda ABD Ordusu Mühendisler Birliği, SSB'nin kullanılabilirliğini daha fazla araştırmaya yönelik karar almıştır. Bu kapsamda ABD'de tasarlanıp inşa edilen ilk tam ölçekli SSB kaplama, USACE tarafından 1984 yılında yapılan Hood, Teksas'ta bir askeri tesis olmuştur (Williams and McFarland 2013). ABD Ordusu Mühendisler Birliği tarafından yapılan araştırmalar daha da ileri götürülerek, 1990'lı yıllarda SSB'nin limanlar ve konteyner dağıtım tesislerinde kullanılabilmesi için daha da geliştirilmiştir. Aradan geçen yıllarda bu uygulamalar için SSB'nin kullanımını daha da artırmıştır. SSB teknolojisi, esas olarak Kuzey Amerika ile dünyanın diğer bölgelerine doğru ilerlemiştir. Avustralya ve Yeni Zelanda, SSB'nin otoyollarda ve endüstriyel kaplamalarda kullanımına yönelik kılavuzlar ve şartnameler yayınlamıştır (Anonymous 2013b). 1980 yılından itibaren Fransa, Almanya, Norveç, İsveç, Finlandiya, Danimarka, Almanya, Avusturya, Arjantin ve Japonya gibi ülkelerde SSB yol, en az 100.000 m² inşa edilmek üzere uygulanmıştır. Şili, Uruguay, Meksika, Kolombiya, Ekvator ve Güney Afrika gibi ülkeleri de deneme yollarıyla SSB yol uygulamalarına başlamıştır. (Pittman *et al.* 2012; Anderson 1986).



Şekil 2. Silindirele sıkıştırılmış beton yol tarihçesi (Harrington *et al.* 2010).

Türkiye'de SSB yol 2009 yılından beri kullanılmaya başlanmıştır. Bu anlamda ilk pilot uygulama Antalya Büyükşehir Belediyesi tarafından yapılmıştır. Daha sonra 2011 yılında Denizli'de ilk büyük ölçekli SSB yol projesi uygulanmıştır. Daha sonra 2014 yılında Samsun ve Trabzon'da da SSB yol uygulanmıştır. SSB yol inşalarında kalıp, donatı ihtiyacı olmaması ve alternatif yol kaplamalarına göre daha ekonomik olmasından dolayı pek çok şehirimizde yaygın şekilde kullanılmaya başlanmıştır (Anonymous 2018; Anonymous 2019b). Şekil 3'de Türkiye'de SSB yol uygulanan şehirler sarı renkte gösterilmiştir.



Şekil 3. Türkiye'de silindirele sıkıştırılmış beton yol uygulanan iller (Anonymous 2018).

Silindirle sıkıştırılmış beton yolun avantajları ve dezavantajları

Silindirle sıkıştırılmış beton yolların avantajlarından dolayı son zamanlarda caddeler, otoyollar ve karayolu banketleri dahil olmak üzere karayolu uygulamalarında daha yaygın hale gelmiştir. SSB kullanmanın avantajları arasında inşa yöntemi açısından maliyet tasarrufu ve kaplamanın yerleştirme hızının artması yer alır. SSB kaplamalarda dübel, çelik takviye veya kalıp kullanılmadığından dolayı geleneksel olarak inşa edilmiş beton kaplamaların maliyetiyle karşılaştırıldığında önemli ölçüde tasarruf sağlanmaktadır (Anonymous 2001). Ayrıca esnek kaplamalarla kıyaslandığında da birçok avantajlara sahip olduğu bilinmektedir. SSB kaplamaların avantajları şu şekilde özetlenebilir (Harrington *et al.* 2010; Pittman 2012; Anonymous 2019b; Anonymous 2021);

- SSB kaplamalar, istenilen eğilme ve basınç dayanımlarında tasarlanabildikleri için deforme olmadan ağır ve tekrarlayan yüklere karşı daha iyi dayanım ve direnç gösterecek şekilde üretilmektedir.
- SSB kaplamanın en büyük avantajlarından biri, geleneksel beton veya diğer asfalt kaplamalara göre daha uygun maliyetli ve hızlı bir şekilde inşa edilebilmesidir. SSB, silindirlerle sorunsuz bir şekilde sıkıştırılan yüksek yoğunluklu ve asfalt tipi kaplama ekipmanıyla yerleştirilerek, son işlem ve şekillendirme ihtiyaçlarını azaltabilmektedir.
- SSB karışımlarda, yüksek fırın cürufu ve uçucu kül gibi ilave çimentolu malzemeler kullanılabilir, bu sayede çimento miktarı en aza indirilerek enerji tüketiminin düşmesine ve sürdürülebilirliğin artmasına katkı sağlamaktadır.
- Geleneksel betona kıyasla daha düşük çimento içeriğinden dolayı daha az büzülme sağlanmakta ve bundan dolayı ortaya çıkacak çatlakları azaltmaktadır.
- Sahip olduğu açık renginden dolayı çok daha fazla ışık yansıtma özelliği sağlayabilmekte bu sayede daha güvenli ve daha parlak çevre sağlamakla birlikte ve aydınlatma gereksinimlerini de azaltmaktadır.
- SSB, yüksek yoğunluk ve düşük emilim için tasarlanabilmektedir. Bu sayede, hava sürükleyici gibi katkı malzemeleri gerektirmeden donma-çözünme koşullarında çok iyi dayanıklılık sağlayabilmektedir.
- Geleneksel betona benzer şekilde SSB'nin hizmet ömrü boyunca çok az gerekli bakım ve onarım ihtiyacı vardır. Yeniden yüzey kaplama veya sızdırmazlık kaplamasına gereklilik duymamaktadır. Böylece silindirle sıkıştırılmış beton için bakım gereksinimleri minimum düzeydedir.

- SSB, kışın aşırı soğuğuna ve yazın sıcağına dayanma yeteneği ve yağ, solvent, yakıt ve diğer sıvılara karşı direnç de dahil olmak üzere geleneksel beton kaplamaların tüm dayanıklılık özelliklerine sahiptirler.
- SSB kaplamalar, asfalt kaplamalarda kullanım için uygun olmayan ince taneli agregaların kendi içerisinde kullanımına olanak sağlamaktadır.
- Geleneksel beton kaplamalar ile SSB de ağır trafik yükü ve yoğunluğu altında bile kaplama aşınmalarına karşı direnç göstermektedirler.
- SSB kaplamalar, karışımlara ve sericilere bağlı olarak tek kademedede yaklaşık olarak 25 cm'ye kadar döküm kalınlığında yerleştirilebilmektedir.

SSB kaplamalar, bütün bu sahip olduğu avantajların yanı sıra gerek geleneksel beton kaplamalar gerekse de asfalt kaplamalarla kıyaslandığında bazı dezavantaj oluşturacak durumlara sahip olmaktadır. Bu dezavantaj oluşturabilecek durumlar şu şekilde sıralanabilir (Harrington *et al.* 2010; Anonymous 2021a; Olak 2022);

- Çok kuru kıvama sahip olmalarından dolayı, geleneksel beton kaplamalarla kıyasla transmikser veya mikser kamyonlarında karıştırılan SSB miktarı, daha az olabilmektedir.
- Trafik seyir hızı arttığında SSB kaplamalarda oluşan ses araç içinde ve çevrede yüksek desibelere ulaşabilen ses kirliliğine sebep olabilmektedir.
- Yüksek hızlı trafikli SSB kaplamalar için istenilen düzgünlüğü elmas taşlama yapmadan elde etmek zor olmaktadır.
- Bazı durumlarda SSB kaplamalar, birden fazla katmanda dökülmesi gerekmektedir. Bu tabakalar arasında iyi bir bağlantı sağlanabilmesi için 1 saatten kısa süre içerisinde 2. tabakanın döküm işleminin tamamlanması gerekmektedir. Aynı şart yatay bitişik levhalarda da geçerli olmaktadır.
- SSB kaplamaların sahip olduğu düşük su içeriğinden dolayı sıcak havalarda döküm sürecince buharlaşmanın sebep olduğu hızlı su kayıplarını en aza indirmek çok önemli hale gelmektedir. Bu da kür işleminin dikkatli ve zamanında uygulanmasını elzem hale getirmektedir.
- Geleneksel beton yollara kıyasla çok daha düşük su içeriğine sahip olmalarından dolayı SSB kaplamalar daha fazla katkı madde dozajı kullanımına sebep olmaktadır.

Silindirle sıkıştırılmış beton yolun uygulama alanları

SSB kaplama uygulamaları, temel malzeme olarak kullanımdan yüzeyi olmayan, elmas zeminli otoyol kaplamasına kadar farklı uygulama alanlarında çeşitlilik gösterir. Uygulanış şekli, tasarım ve yapıdaki karmaşıklık seviyesini belirlemektedir. Geleneksel beton kaplamalarla kıyaslandığında birçok inşaat mühendisliği tesisi türü için daha uygun ekonomik bir alternatif sunmaktadır. ABD ve Kanada'da ilk kez kullanıldığı 1970'li yıllardan bu yana SSB, sert ve ılıman iklimlerdeki her türlü tekerlek yükü altındaki kaplama projelerinde kullanılmış ve ağır tekerlek yükleri ve zorlu çalışma koşulları altında üstün performans sağlamıştır. Son yıllarda birçok geleneksel otoyol ve cadde uygulaması için uygun maliyetli kaplamalar oluşturmak amacı, SSB'nin kullanımında bir artışa yol açmıştır (Anonymous 2013a; Harrington *et al.* 2010; Gáspár and Bencze 2020).

Aşağıda silindirle sıkıştırılmış beton yolların genel uygulama alanları sıralanmıştır;

- Yüksek hızlı kullanımlar için çok katmanlı kaplama sistemlerinde ince asfalt aşınma tabakaları ve geleneksel beton kaplama altında, mükemmel bir inşaat platformu sağlamak ve kaplamanın kalınlığının azaltmak amacıyla bir temel olarak kullanılmaktadırlar.
- Havaalanları pistlerinde ve hava araçları için park alanlarında kullanılabilirlerdir.
- Konteyner limanı ve liman depolama alanlarında ile birlikte yüklemeye rıhtımlarında kullanılabilirlerdir.



Şekil 4. SSB yolun havaalanları ve limanlarda uygulaması (Anonymous 2024a; Anonymous 2024b).

- Endüstriyel depolama, tesis erişim yolları ve park kaplamaları.
- Mevcut trafiğe yön vermek için hızlıca yapılması gereken kalıcı olmayan ulaşım yolları.
- Düşük hacimli, kentsel ve kırsal yollar ve zorlu yollar.
- İnşaat yapım hızının önemli olduğu askeri uygulamalar (harekat üsleri ve havaalanları gibi).

- Kerestecilik gibi ağır trafik yüklerinin mevcut olduğu tesislerin yol ve depolama alanları.
- Emniyet şeritleri ve servis yolları.



Şekil 5. SSB yolun tomruk tesisleri ve emniyet şeritlerinde uygulanması (Harrington *et al.* 2010).

Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yol Özellikleri ve Karışım Tasarımı

SSB yolun özellikleri geleneksel beton yol özelliklerine benzer olmakla birlikte farklı karışım oranları ve yapım teknikleri kullanılarak elde edilmektedirler (Harrington *et al.* 2010). Silindirle sıkıştırılmış beton yol, asfalt yolların yerleştirilmesinde ve sıkıştırılmasında kullanılan benzer ekipman kullanılarak sıfır çökmeli beton karışımının serilmesini ve sıkıştırılmasını içeren bir beton kaplama teknolojisini kullanmaktadır (Guyer 2023). SSB yollar, kalıp, derz, çelik takviye veya dübellere ihtiyaç olmadan inşa edilir ve düzleştirme gerektirmemektedir (Williams and McFarland 2013).

SSB yol karışımlarının üretilme prosedürleri, SSB'nin katı kıvamı ve yoğun dereceli agrega karışımlarının kullanılması nedeniyle geleneksel beton yolların üretilmesi için kullanılanlardan farklıdır. Geleneksel betonla karşılaştırıldığında SSB yol karışımlarının oranlarındaki ana farklar aşağıdaki gibi sıralanmaktadır (Anonymous 2006).

- SSB yolların su içeriği daha düşük olmaktadır.
- SSB yolların çimento hamuru içeriği daha düşük olmaktadır.
- SSB yollar genel olarak fiber katkıları içermemektedirler.
- SSB tipik olarak hava sürükleyicilere ihtiyaç duymamakla birlikte, SSB'de bazı katkıları kullanılabilir.
- SSB yollar daha fazla ince agrega içeriğine sahip olmaktadır.
- SSB yollarda kullanılan maksimum agrega tane boyutu daha küçük olmaktadır.

SSB yolların durabilitesi, bağlayıcı malzemenin miktarına, kullanılan agregaların özelliğine ve betonun sıkıştırma şiddetine bağlı olmaktadır. Genellikle SSB yollar, geleneksel

beton yollar ile kıyaslandığında basınç ve eğilme dayanımları gibi benzer mekanik özelliklere sahip olmaktadır. Ayrıca SSB yolların elastisite modülü değerleri de geleneksel betonunkilere benzer veya biraz daha yüksektir (Harrington *et al.* 2010).

SSB yollarda katmanların ara yüzündeki bağ mukavemeti kritik bir mühendislik özelliğidir. Bu bağ mukavemeti, birden fazla tabaka şeklinde inşa edilen SSB yolların tek tabaka olarak mı ya da kısmen bağlı veya bağlı olmayan tabakalar şeklinde mi davranacağını belirlemektedir. Kısmen bağlı veya bağlı olmayan katmanların yük taşıma kapasitesi, aynı toplam kalınlığa sahip bağlı katmanlardan çok daha düşüktür (Harrington *et al.* 2010).

Soğuk iklim bölgelerindeki SSB yollarda, donma-çözünme döngülerinden dolayı meydana gelen iç çatlaklara ve yüzey pullanmaları gibi hasarlar görülebilmektedir. Bu iki tür hasar aynı anda meydana gelse de birbirinden farklı ve bağımsız olgulardır. SSB yollarda, içerdiği nem miktarının artması sonucu, donma-çözünme döngüleri sonrası iç çatlaklar meydana gelebilmektedir. Bu durum da elastisite modülünün düşmesine neden olabilmektedir. Betonun önemli miktarda neme maruz kaldığı donma-çözünme döngüleri sırasında da yüzey pullanmaları meydana gelir (Marchand *et al.* 1997). Bundan dolayı SSB yol karışımları, donma-çözünme sonrası meydana gelen hasarlara karşı koyacak şekilde tasarlanmalıdır. Halihazırda SSB yolların performansı için yapılan saha çalışmaları, SSB'nin kötü hava şartlarında yeterli performans sergilediğini göstermiştir. SSB yollar, donma-çözünme direncinin çoğunu sürüklenmiş hava boşluklarına benzer boyutta hapsedilmiş hava boşluklarının varlığıyla elde etmektedir. SSB yollarda nadiren hava sürükleyiciler kullanılmaktadır. Yapılan araştırmalar, donma-çözünme hasarı potansiyeli olan koşullarda bile hava sürüklenmesinin normalde gerekli olmadığını göstermiştir. Bu genellemenin bazı istisnaları vardır. İlk olarak agregalar donma-çözünmeye dayanıklı olmalıdır. Daha sonra ise kapalı bir yapı sağlamak için yeterli ince malzeme bulunmalı ve SSB şartnamenin gerektirdiği şekilde sıkıştırılmalıdır, böylece potansiyel direnç uygulamada elde edilebilir (Anonymous 2013a; Harrington *et al.* 2010).

SSB yol kaplamalarının hacminde meydana gelen önemli değişiklikler, kuruma büzülmesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Bununla birlikte, SSB yollardaki kuruma büzülmesiyle ilişkili hacim değişikliği, daha düşük su içeriği nedeniyle geleneksel beton yol karışımlarından daha azdır. Bu yüzden, daha az çimento hamuru içermesi nedeniyle, SSB yol kaplamalarında daha az büzülme ve daha az çatlak görülmektedir. Termal genleşme ve büzülme davranışı açısından incelendiğinde SSB yollar, geleneksel beton yollar ile benzer özellik göstermektedir (Harrington *et al.* 2010).

Bazı endüstriyel kullanımlarda, SSB yolların yüksek aşınma direncine sahip olması gerekmektedir. Yüksek bir aşınma direnci elde etmek için genellikle yüksek bir basınç dayanımı sınıfı belirtilir. Belirtilen basınç dayanımı sınıfı en azından aşınma direnci için kullanım yerinde geçerli olan hükümlerde tavsiye edilene eşit olmalıdır (Anonymous 2013a).

SSB yollarda yüzey karakteristikleri incelendiğinde, yüzey kalitesinin tamamen SSB yolların karışım kalitesine bağlı olduğu anlaşılmaktadır. SSB yol uygulamaları elmas taşlama gibi müteakip yüzey işlemleri yapılmadığı sürece, sadece düşük hızlı trafiğe sahip park alanları ve yollarla sınırlandırılmalıdır (Anonymous 2013a). SSB yolların geçirgenliği büyük ölçüde harç matrisinin gözenekliliği ile birlikte sıkıştırılmış SSB yollardaki boşluklara bağlıdır ve bu yüzden karışım oranı, yerleştirme şekli ve sıkıştırma şiddeti ile kontrol edilmektedir. Sertleşmiş SSB yolların geçirgenliği geleneksel beton ile kıyaslanabilmektedir (Harrington *et al.* 2010).

SSB yol üretimi

SSB yollar, herhangi bir hazır beton tesisinde rahatlıkla üretilmektedirler. İdeal sabit tesis durumu, SSB'nin merkezi bir karıştırıcıda karıştırılarak ve doğrudan karıştırıcı özelliği olmayan taşıyıcı araçlara boşaltılması olarak özetlenebilir. SSB yol hacimleri büyük olabileceğinden, tesis ihtiyaç duyulan oranda tedarik için yeterli kapasiteye sahip olmalıdır. Ayrıca tesisin arızalanması durumunda yedek bir tesisin mevcut olması da iyi bir uygulama olarak gösterilmektedir (Anonymous 2013a).

Kaplama tasarımının gücü, dayanıklılık gereklilikleri ve amaçlanan uygulamanın tümü, SSB yol karışımlarında kullanılacak malzemelerin seçimini etkilemektedir. SSB üretmek için kullanılan temel malzemeler arasında, geleneksel betonla aynı temel malzemeler olan su, çimentolu malzemeler (çimento ve uçucu kül, silis dumanı vb.) ile ince ve kaba agregalar bulunmaktadır. Ancak geleneksel beton yollardan farklı olarak bu malzemeler farklı oranlarda kullanılmaktadır. Geleneksel beton yollar ile kıyaslandığında, SSB yol kaplamalarda kullanılması için seçilen malzemelerin maliyeti, geleneksel beton yollarda kullanılan malzemeler ile hemen hemen aynıdır. Ayrıca, geleneksel beton yollara benzer dayanımlar elde etmek için SSB yol kaplamalarında daha az bağlayıcı malzemeye ihtiyaç duyulduğundan dolayı malzeme tasarrufunu da mümkün kılınmaktadır. SSB yol üretiminde, döküm sahasına özel koşullara ve mevcut yerel malzemelerin kullanımına dikkat edildiğinde, maliyetlerin düşmesiyle birlikte SSB karışım niteliğinin artışı sağlanabilmektedir (Harrington *et al.* 2010; Anonymous 2001; Shin and Carboneau 2010).

Alt zemin ve temel tabakasının hazırlanması

Alt zemin ve temel tabakası, literatürde belirtilen gerekliliklere uygun olmalıdır. Alt zeminin, Şekil 5’de gösterildiği gibi ASTM D1557 (Anonymous 2021b) standardına uygun şekilde maksimum kuru yoğunluğun en az yüzde 95’ine denk gelecek seviyeye kadar düzgün bir şekilde sıkıştırılması gerekmektedir. SSB yollar için alt zemin, granüler alt temel ve temel tabakası, SSB kaplamasının sıkıştırılmasını destekleyebilmeli ve buna izin verecek kadar sert olmalıdır. SSB yolların donma-çözünme dayanıklılığına karşı iyi bir dirence sahip olması bilinmesine rağmen bu durum yine dikkat edilmesi gereken konulardan biridir. Bu yüzden mevsimsel donma-çözünme etkisinin mevcut olduğu bölgelerde kaplama veya taban tabakasından sızan suları uzaklaştıracak bir temel tabakasının elde edilmesine özen gösterilmelidir. Temel tabakası, sıkıştırma sonrasında SSB yolun tüm kalınlığı boyunca tam konsolidasyonuna izin verecek yeterli desteği sağlamalıdır (Harrington *et al.* 2010; Guyer 2023).



Şekil 6. SSB yolun yerleştirilmeden önce temel tabakasının hazırlanması (Harrington *et al.* 2010; Anonymous 2019c).

SSB yollar, yerleştirilmeden önce, doğal alt zemin, granüler alt temel ve işlenmiş temel tabakasının yüzeyi temiz olmalı ve yabancı maddelerden, göllenmiş sudan ve dondan arındırılmış olmalıdır. Alt zemin, alt temel ve temel tabakasının SSB’den nem çekmesini önlemeye yardımcı olmak için SSB, yerleştirme sırasında alt zemin, alt temel ve temel tabakası eşit derecede nemli olmalıdır. Belirli alanların yeniden nemlendirilmesi için su serpilmesi gerekiyorsa, çamur, durgun su havuzları veya su kamyonundan kaynaklanan izlerin oluşmasını önlemek için dikkatli olunmalıdır. SSB yolların yerleştirilmesinden önce, alt zemin veya temel tabakası yoğunluk açısından kontrol edilmeli ve düzeltme gereken yerler düzeltilmelidir (Harrington *et al.* 2010).

Karıştırma ve taşıma

SSB, sahip olduğu su içeriğini karışım boyunca eşit şekilde dağıtmak için güçlü bir karıştırma eylemine ihtiyaç duymaktadır. Güçlü bir karıştırmayı en iyi şekilde elde etmek için asfalt üretiminde kullanılan çift şafta sahip karıştırıcılar kullanılmaktadır. SSB yol karışımı elde etmek için sürekli veya kesikli plent tesisleri kullanılabilir. Kesikli plent tesisleri, SSB karışımının üstü kapalı taşıyıcılarla taşındığı küçük projeler için uygun tesis tipi olmaktadır. Mikserin her karıştırma işleminden sonra bir sonraki karışımı karıştırmadan önce tamamen boşaltılması ve temizlenmesi gerekmektedir. Sürekli plent tesisleri ise büyük projeler için aynı kalitede bağlayıcı malzeme-beton karışımı üretilmesini sağlamaktadır. SSB'nin üretilmesinde genellikle sürekli karıştırma tesisi için tavsiye edilmektedir. Çünkü saha nakliyesi daha kolay, kurulumu daha az zaman almakta ve kesikli karışım tesisine göre daha büyük bir çıktı kapasitesine sahip olmaktadır. Kesikli plent tesisleri, her döküm için karışımın malzeme oranlarını daha hassas ve doğru şekilde sağlamakla birlikte genellikle daha büyük projelerde döküm işlemleri için yeteri kadar üretim kapasitesine sahip değildir. Tesislerin verimi veya üretimleri, finişerlerin serme kapasitesinden veya silindirlerin sıkıştırma kapasitesinden fazla olmamalıdır. Üretim tesislerinin, kaplama alanına mümkün olduğu kadar yakın bir yere yerleştirilmesi gerekmektedir (Gáspár and Bencze 2020; Guyer 2023).

SSB, üretim tesislerinden döküm sahalarındaki finişerlere damperli kamyonlarla taşınmaktadır. SSB'nin nem içeriğinde meydana gelen değişiklikler yerleştirme, sıkıştırma ve sonrası hizmet için performansta sorunlara neden olabileceğinden dolayı aşırı nem kaybını (sıcak havalarda) veya aşırı nem girişini (şiddetli yağmur yağdığında) önlemek için taşıyıcı kamyonların branda veya diğer uygun kaplamalarla örtülmesi gerekmektedir (Anonymous 2013a; Anonymous 2017a; Guyer 2023). SSB'nin tam anlamıyla boşaltıldığından emin olmak taşıyıcı araçların kontrol edilmesi gerekmektedir. SSB kamyonunda bırakılırsa daha sonraki teslimatta boşalabilir ve kaplamada lokal bir soruna neden olabilmektedir.



Şekil 7. SSB yolun üretilmesi ve kaplama sahasına taşınması (Harrington *et al.* 2010; Anonymous 2017a).

Her SSB karışım kıvamının uygun olup olmadığının anlaşılabilmesi için basit bir kartopu testi uygulanabilir. Bu, çok kuru veya çok ıslak olan SSB karışımını tanımlamanın kolay bir yoludur. Eller arasında SSB karışımdan bir top yapılabilirse kıvamının hemen hemen uygun olduğu anlaşılmaktadır. Bir top oluşturulmıyorsa veya yalnızca kuru malzeme elde edilirse, SSB'nin çok kuru olduğu anlaşılır. Bir top oluşturulmıyorsa ve dengesiz bir ıslak malzemeye elde edilirse, SSB'nin çok ıslak kıvama sahip olduğu anlaşılır (Anonymous 2013a).

Yerleştirme

SSB yol yerleştirilmesi için Şekil 8'de gösterildiği gibi genellikle yüksek yoğunluklu asfalt serme makineleri (finaşer) kullanılmaktadır (Zollinger 2016). Asfalt serme makineleri, silindirle sıkıştırma işlemi olmadan kendi kapasitesiyle SSB yol karışımını kendi ıslak yoğunluğunun en az yüzde 80'ine kadar sıkıştırabilip yerleştirebilmelidir. Saha deneyimleri, finaşerlerin ve SSB yol karışımının tipine bağılı olarak, finaşerin yerleştirdiği SSB tabakasının kalınlığı ile çelik tambur ve lastik tekerlekli silindirlerle sıkıştırma sonrasındaki kalınlığı arasında yüzde 10 ila 25 oranında bir fark olduğunu göstermiştir. Finaşerler, mikserin nominal üretim kapasitesinin en az 1,5 katını yerleştirmeye yetecek kadar SSB serim kapasitesine sahip olmalıdır. SSB yerleştirme işlemleri yüzey düzgünlüğü ve tabaka kalınlığı gereksinimlerini karşılamalıdır (Harrington *et al.* 2010).



Şekil 8. SSB yolun yerleştirilmesi (Anonymous 2019b).

Kaplama üstünden altına kadar uygun sıkıştırmayı sağlamak için, SSB karışımı ve kaplama ekipmanıyla ilgili önceki deneyimler aksini kanıtlamadıkça, 15 cm veya daha az

kalınlığa sahip kaplamalar için geleneksel asfalt makineleri kullanılabilir. Yüksek kapasiteli finişerler, tabaka kalınlığı 25 cm'e kadar olan kaplamalarda başarılı bir şekilde kullanılabilmiştir (Harrington *et al.* 2010). Her ne kadar 25 cm kalınlığa kadar yerleştirmede başarı sağlanmış olursa da homojen bir yoğunluk elde edebilmek amacıyla tabaka kalınlıklarının 20 cm'yi geçmemesi tavsiye edilmektedir. SSB yol karışımı iki tabakada dökülmesi gerekiyorsa, bu tabakaların eşit iki tabaka şeklinde dökümü yapılmalıdır (Anonymous 2018). Katmanlar arasında yeterli bağlanmayı sağlamak için üst kaplama alt kaplamadan karışıma ve çevre koşullarına bağlı olarak değişmekle birlikte 60 dakika içerisinde yerleştirilmelidir (Harrington *et al.* 2010). SSB'nin döküm hızı, finişerin kapasitesi, tabaka kalınlığı, taşıma mesafesi gibi etkenler göz önünde bulundurulacak şekilde planlanmalıdır.

Döküm işlemi tamamlanmış SSB yol kaplamasında gerekli olan yoğunluk ve düzgünlüğü sağlamak için, yol şeritlerinin döküm ve sıkıştırılmasının zamanlaması çok önemli hale gelmektedir. SSB henüz priz almamış ve işlenebilir bir durumdayken, genellikle üretimin ardından 60 dakikalık bir süre içerisinde dökülür ve sıkıştırılır. SSB'nin sıkıştırılmasına yönelik bu süre kısıtlaması, birden fazla yapışık şeritlerin yerleştirilmesi arasında geçen süre için de geçerli olmaktadır. Çünkü arada oluşan derz alanı genellikle şeridin silindir ile sıkıştırılacak son kısım olmaktadır. Bu sürenin uygunluğunun ayarlanabilmesi için şerit genişliği ve uzunluğunu en iyi duruma getirmek gerekmektedir. Birden fazla bitişik şerit arasındaki süre aralığını azaltmak için birden fazla sericilerin aşamalı bir şekilde kullanılması önerilmektedir. Bu gibi durumlarda SSB üretimi her iki finişerin ihtiyacını karşılamaya yeterli olmalıdır (Harrington *et al.* 2010).

SSB yolun yerleştirme aşamasında segregasyonu engellemek amacıyla serim sırasında asfalt sericiler tam olarak boşaltılmamalı ve yayma vidaları beton karışımla sürekli bir şekilde kapatılmalıdır. Yüzey düzgünlüğünü önlemek amacıyla serimin sürekliliğini sağlayacak şekilde finişer hızı seçilmelidir (Gáspár and Bencze 2020). SSB yol, sulu zemin üzerine veya yoğun yağış sırasında yerleştirilmemelidir. Erken yaşta donma nedeniyle hasar riskini en aza indirmek için, ortam sıcaklığının 5°C'nin altında olduğu zamanlarda SSB yol yerleştirilmemelidir (Anonymous 2013a). SSB yol kaplamasının serim sonrası bütün yüzeyleri son prizini alana kadar nemli şekilde tutulmalıdır. Sis püskürtme ve buharlaşma geciktiriciler, ince taneleri ve macunu yüzeyden yıkamadan nemi korumak için ekonomik ve etkili tekniklerdir. Birden fazla tabakaya sahip SSB kaplamalar için, sadece kaplama yüzeyi değil ayrıca bütün tabakaların kenarları da diğer SSB kaplamalarıyla kaplanana kadar veya kür işlemi bitene kadar nemli şekilde muhafaza edilmelidir (Harrington *et al.* 2010).

Sıkıştırma

SSB yol karışımının sıkıştırılma aşaması, kaplamanın yoğunluğu, dayanımı, geçirimsizliği dolayısıyla dayanıklılığı ve yüzey düzgünlüğü açısından oldukça önemlidir. İlk sıkıştırma işlemi genellikle yerleştirmeden hemen sonra 10 tonluk çift tamburlu titreşimli silindirlerle sağlanmaktadır. İlk sıkıştırmanın ardından, sıkıştırma sonucu meydana gelen kusurlar, 20-30 ton ağırlık kapasiteli lastik tekerlekli silindirlerin geçişi yardımıyla giderilmektedir. 15-25 cm kalınlıktaki tabakalara sahip SSB karışımların yoğunluğu 10 tonluk çift tamburlu titreşimli çelik silindirlerin 4-6 geçiş işlemiyle istenilen yoğunluğa ulaşılması sağlanmıştır. Gerektiğinden fazla yapılan sıkıştırma işlemi özellikle tabakaların üst kısmında yoğunluğun düşmesine sebep olduğundan dolayı bu durumdan kaçınılmalıdır. Sıkıştırma işlemi, serim işleminden sonra 15 dakika içinde başlatılmalı ve tesiste SSB karışımı üretiminden itibaren 45 dakikayı geçmeyecek şekilde tamamlanmalıdır. Sıcaklığın fazla olduğu durumlarda ise, karıştırma sonu ile sıkıştırma sonu arasındaki süre 35 dakikayı geçmemelidir (Anonymous 2013a).

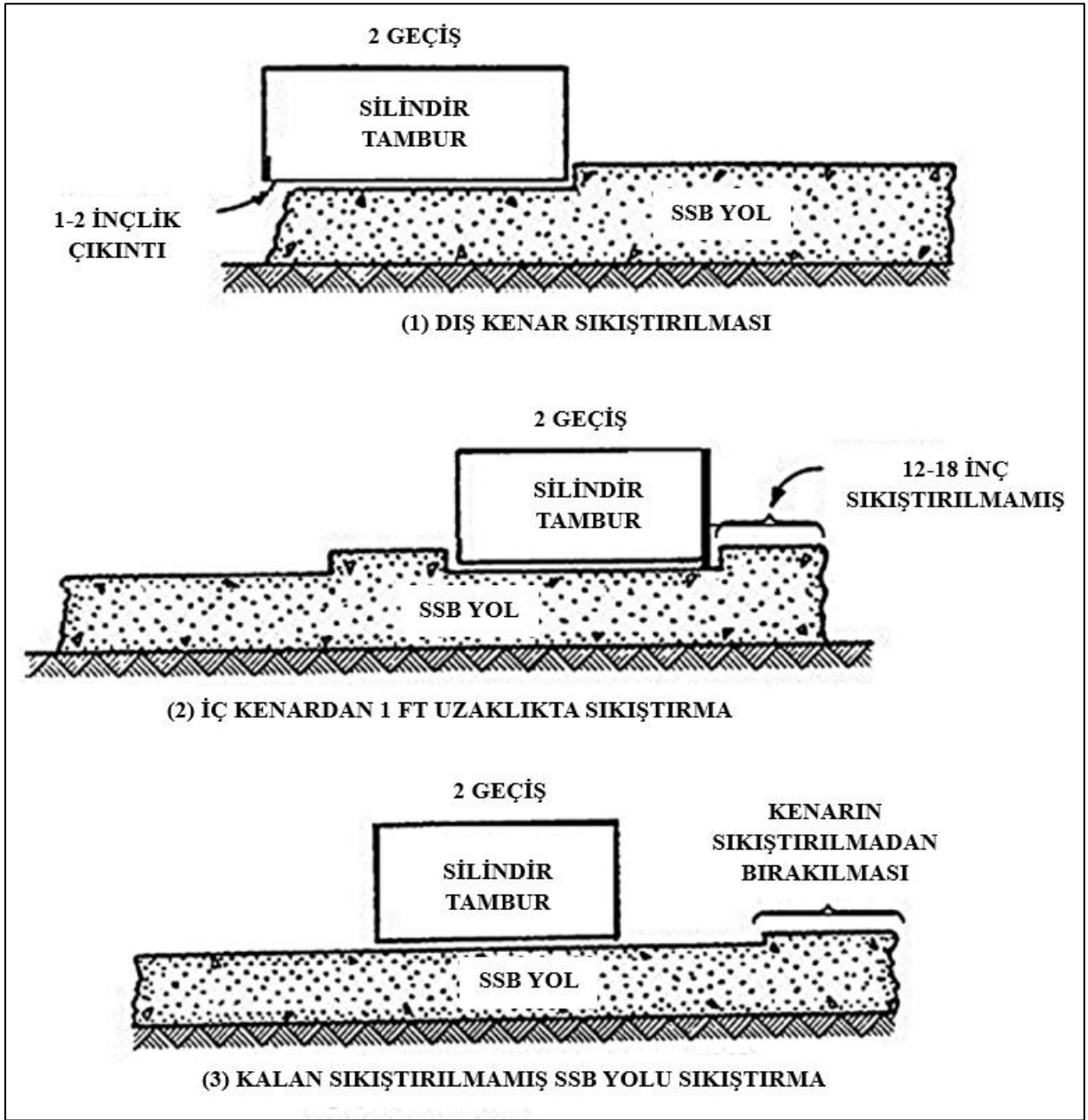


Şekil 9. SSB yolların sıkıştırılması (Harrington *et al.* 2010).

SSB yol kaplamalarının yüzeyinde biriken sızıntı suları olmadığından dolayı, SSB'nin sıkıştırma işlemine hazır olup olmadığını anlamanın yöntemlerinden biri, silindir geçişleri sırasında taze SSB'nin nasıl davrandığını gözlemlemektir. Sıkıştırma işlemi için istenen kıvamda olan SSB, silindir geçişleri sırasında eşit şekilde yayılım göstermektedir. SSB yol

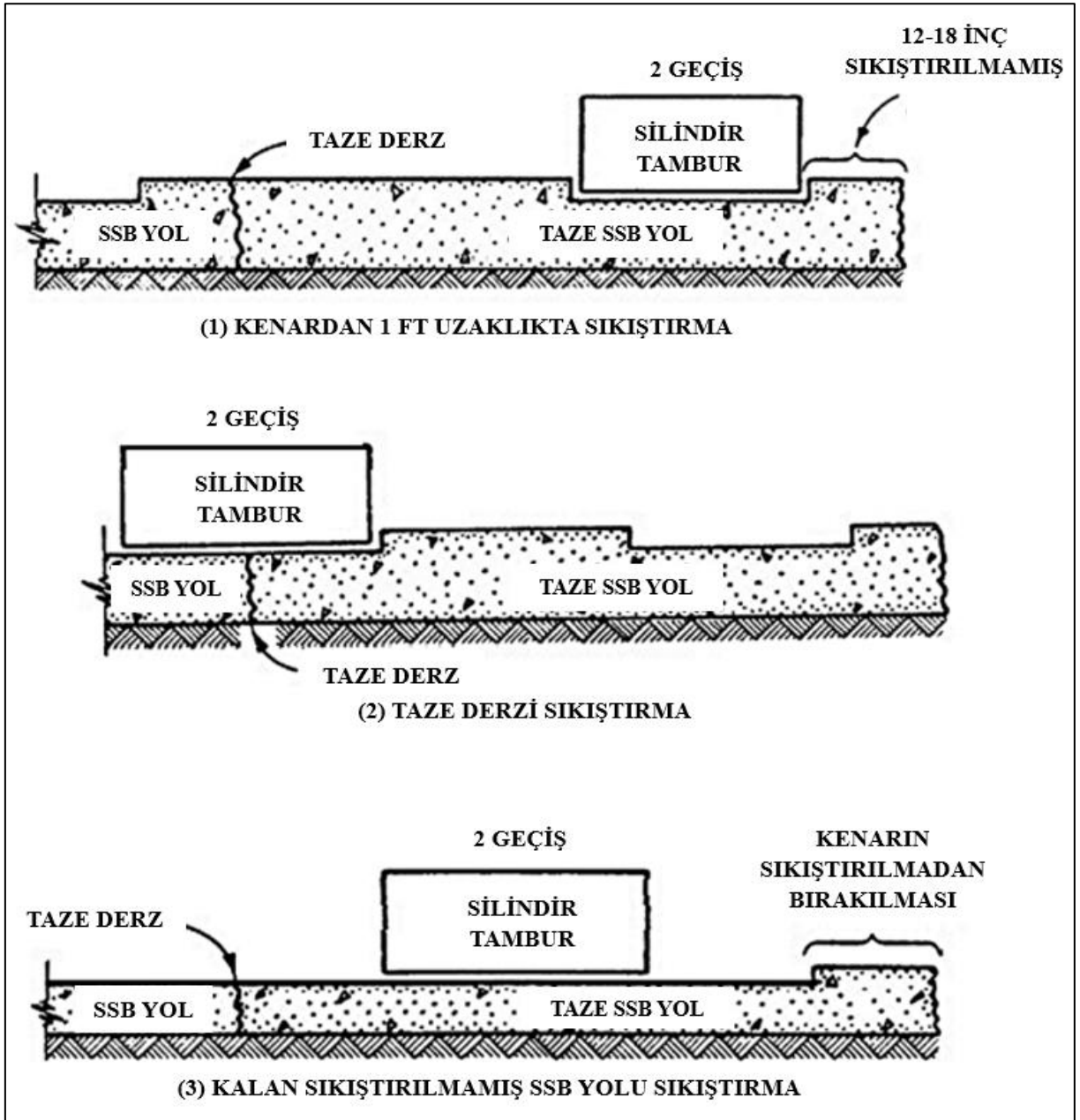
kaplaması uygun sıkıştırma işlemi için çok ıslak bir yapıya sahipse, yüzey kısmı parlak ve macunsu görüntüye sahip olacak ve silindir geçişleri sırasında fişkırmaya davranışı sergileyecektir. Tam tersi durumda SSB yol kaplaması çok kuru bir kıvama sahipse, kaplama yüzeyi tozlu ve pütürlü gibi görünecek, hatta yatayda kesilmeler meydana gelebilecektir. Ek olarak, özellikle tabaka alt kısmında agrega ayrışmasının meydana gelmesi muhtemeldir ve yeterli yoğunluğun elde edilmesi zor olacaktır. Genellikle, SSB'nin nem içeriğindeki değişikliklerden meydana gelen karışım sorunlarının ortadan kaldırılması için, küçük ayarlamaların yapılması gerekli olmaktadır. Su içeriğinin ayarlanması başarılı olmazsa agrega derecelendirmesinin veya tesis kalibrasyonunun kontrol edilmesi gerekli olabilir (Harrington *et al.* 2010).

Statik geçişler yapıldıktan sonra, titreşimli silindir Şekil 10'daki gibi SSB yolun üzerinde dört titreşimli geçiş yapmalıdır: ilk serim şeridinin dış kenarından (park alanının çevresi veya bir yolun kenarı) iki geçiş, böylece yuvarlanan tekerlek kaplamanın kenarından 1 ila 2 inç uzanır (daha fazla yuvarlanma üzerine şeridin aşırı yanal yer değiştirmesini önlemeye yardımcı olmak için SSB yolu "sınırlamak" için yapılır), ardından iç kenarın 12 ila 18 inç içinde iki geçiş yapılmaktadır. Bu işlem, yan yana olan şeritlerin döşeme yüksekliğini ayarlamak için silindirle sıkıştırılmamış bir kenar bırakarak yeni oluşturulan derzin her iki şeridinin aynı zamanda sıkıştırılmasını sağlayacaktır. Şeridin ortasında kalan sıkıştırılmamış malzeme silindirini iki geçişle sıkıştırılmalıdır. Bu işlem, kaplama üzerinde toplam dört geçiş yapacak şekilde en az bir kez, istenilen karışım yoğunluğu elde edilemezse birden fazla kez tekrarlanmalıdır (Guyer 2023).



Şekil 10. İlk serim şeridinin sıkıştırılması (Guyer 2023).

İç kenar soğuk derz oluşturmak için kullanılacaksa, derzde düz bir yüzey sağlamaya ve kenarı yuvarlamamaya dikkat ederek dış kenarın yuvarlandığı gibi yuvarlanmalıdır. Bitişik şerit yerleştirildiğinde, Şekil 11'deki gibi şeridin dış kenarından yaklaşık 12 ila 18 inç mesafede iki geçiş yapılmalı (yine betonu sınırlamak için) ve ardından taze derz üzerinde iki geçiş yapılmalıdır. Şerit tamamlanmış kaplamanın dış kenarını oluşturacaksa, ilk iki geçiş bu bitişik şeridin dış kenarının 1 ila 2 inç üzerine uzanmalıdır. Şeritte kalan sıkıştırılmamış malzeme silindirin iki geçişiyle yuvarlanmalıdır. Bu işlem, kaplama üzerinde toplam dört geçiş yapacak şekilde tekrarlanmalıdır. Derz boyunca pürüzsüzlük ve istenilen yoğunluğu sağlamak adına yeni ilave geçişler gerekebilmektedir (Guyer 2023).



Şekil 11. İç serim şeritlerinin sıkıştırılması (Guyer 2023).

Sıkıştırma işlemi sırasında yolun sonuna gelindiğinde, silindir yolun uç kısmından yuvarlanarak işlem bitirilmelidir. İşlem sonunda yuvarlatılmış uç, kaplama boyunca enine yönde dikey bir düz yüzey elde edilecek şekilde greyder, kürek veya testere ile kesilmelidir. Dikey bir düz yüzey elde etmenin diğer bir yöntemi ise sıkıştırılacak yol sonuna temel tabakasına sabitlenmiş bir engel eklenip bu sayede sıkıştırmadan sonra yol sonunda dikey bir düz yüzey oluşturmaktır. SSB yol kaplamalarının havayla temas eden bütün yüzeylerinin silindirle sıkıştırma işleminin ardında kür işlemi uygulanana kadar yüzeye zarar vermeyecek şekilde hafif bir şekilde sprey yardımlarıyla ıslak tutulması çok önemli olmaktadır (Guyer 2023).

Derzler

SSB yol kaplamalardaki en önemli kısımlar gerekli olan düzgünlük ve yoğunluğu sağlayan derz alanlarıdır. Boyuna ve enine olmak üzere iki şekilde oluşturulan derzlerden boyuna derzler, döküm yönünde yan yana olan kaplama şeritleri arasında, enine derzler ise döküm yönüne dik kaplama uçlarında oluşturulur (Anonymous 2001).

Bitişik kaplama şeritleri arasında kaldırım yönünde boyuna derzler oluşturulur. SSB yol kaplama şeritlerinin serim ve sıkıştırma işlemleri arasında geçen süre, şeritlerin bütün bir bağlantı meydana getirecek şekilde beraber sıkıştırılmasına olanak sağlayacak kadar kısa olduğunda, artarda gelen yol şeritleri arasında yeni bir derz meydana getirilir. Bu süre, priz geciktirici kimyasal katkıları kullanılmadığında, SSB karışımı ve çevre şartlarına bağlı olarak genellikle 1 saat olarak dikkate alınır. Boyuna derzler, silindirle sıkıştırma sırasında serim şeridinin 12 ila 18 inç ölçülerinde (30 ila 45 cm) dış kısmının silindirle sıkıştırılmadan öylece bırakılmasıyla elde edilir. Elde edilen bu sıkıştırılmamış kısım daha sonra diğer bitişik şeridin serilmesi için asfalt serici tablasının kotunu ayarlamada kullanılmaktadır. Diğer bitişik şeridi seriminden sonra, silindirin oluşturulan derzi ortalamak üzere iki şeridi aynı anda sıkıştırılmasıyla derz sıkıştırılma işlemi de tamamlanır. Bağlantının devam ettiği yol boyunca, istenilen yoğunluğu ve düzgünlüğü elde etmek için derz kısmının sıkıştırılmasında daha fazla geçişe ihtiyaç duyulabilmektedir (Harrington *et al.* 2010).



Şekil 12. SSB yollarda boyuna taze derz yapımı (Harrington *et al.* 2010).

Boyuna oluşturulan inşaat soğuk derzleri, bir şeridin yerleştirilmesinden sonra bitişik olacak diğer şeridin 60 dakikadan fazla bir sũre sonrası yerleştirilmesiyle elde edilir. Genellikle bu soğuk derzler 6nceden bir plan doğrultusunda oluşturulur ve tũm yol boyunca silindirle sıkışılmaktadır. Inşaat derzleri genellikle asfaltlama şeridinin sıkıştırılmamış dış kenarının Şekil 13'teki gibi beton testeresi ile kesilmesi ve ortaya 7ıkan temiz dikey kenara karşı kaplama yapılmasıyla oluşturulur (Harrington *et al.* 2010).



Şekil 13. SSB yollarda boyuna soğuk derzlerin oluşturtulması (Harrington *et al.* 2010).

SSB yolların kenar kısmını dũzletmek i7i kullanılan diğer bir y6ntem ise asfalt sericilere Şekil 14'te g6sterildiği gibi bir serim pabucu monte etmektir. Takılan asfalt pabucu kayar şeklinde işlevi sayesinde serim sırasında dikey eksenle 15 ila 30 derece a7ı yapan bir dũzgũn yũzey oluşturur. Kaplamanın kenar kısmı serim pabucu sayesinde sabit tutularak, yũzey ve kenar doğrultusunda sıkıştırılır. Bu uygulama, kesme işleminin zamanını ve masrafını ortadan kaldırır; ancak, muhtemelen alt ve ũst kaldırıcılar arasında meydana gelen kısmi bağlanmadan dolayı, Şekil 14'teki gibi bitişik şerit ũst katmanında zaman zaman yansımalı 7atlamalar meydana gelmiştir (Harrington *et al.* 2010).



Şekil 14. İkinci tabakada kullanılan serme pabucu ve birinci tabaka bağlantısından bitişik ikinci şeritten yansıyan boyuna çatlak (Harrington *et al.* 2010).

SSB yol kaplama şeritlerinin döküm yönüne dik şekilde uç kısımlarında inşaat derzleri oluşturulur. SSB kaplamalarda enine inşaat yeni derzleri genellikle mevcut değildir çünkü inşaat belirli bir şerit uzunluğu inşa edildikten sonra durur. Enine oluşturulan inşaat derzlerinin birçoğu soğuk derz şeklindedir ve yuvarlatılmış uç eğimlerinin testere yardımıyla kesilmesiyle elde edilir. Kenar kısmı temiz ve dik şekilde olmalı, hiçbir ayrışma veya çözülme belirtisi göstermemelidir. Serim işlemine sürdürüldüğünde, taze SSB karışımı enine derzin tam karşısına gelecek şekilde yerleştirilir. Eski sertleştirilmiş şerit inşaat derzinin üzerine üst üste binen malzeme bırakıldığında, daha sonraki yaşlarda inşaat derzinde istenmeyen sökülme ve dökülmeler meydana gelebilir. Bu yüzden, enine derz sıkıştırılmadan önce, varsa üst üste binen karışım malzemesi her zaman kaldırılmalıdır.

SSB yol kaplamalarında derz alanlarının beton testeresi ile kesilmesinin ana amacı meydana gelebilecek rastgele çatlamları minimuma indirmek veya önlemektir. Testere ile kesme, derz aralığının azalmasını sağlayarak çatlak açıklıklarını en aza indirip derzdeki agrega kenetlenme miktarını artırmaktadır. Artırılan agrega kenetlenmesi, derz alanları boyunca üzerine gelen yük transferlerini artırmakla birlikte derz verimliliği ölçütü olarak değerlendirilir. Enine testerele derzler, tipik olarak 8 inçten (20,3 cm) daha az kalınlıktaki kaplamalar için 20 ft (6,1 m) aralıklarla, 8 inç (20,3 cm) veya daha kalın kaplamalar için kaplama kalınlığının (ft cinsinden) 3 ila 4 katı (inç cinsinden) aralıklarla yerleştirilir. SSB yolun kesim işlemine, beton testerenin sebep olabileceği dökülme hasarına karşı koyacak kadar sertleştirmede başlanmalıdır. SSB kaplamaların boyuna yüklemesi enine yüklemeden farklı olduğundan ve daha çok bir mafsal hareketine neden olduğundan, boyuna derzlerin aralığı tipik olarak enine derzlerin aralığından daha küçüktür. Sanayi siteleri gibi büyük yüzey alanlarına sahip yerler için kare şeklinde birleştirme modeli kullanılmaktadır. Derz aralıkları, tabaka kalınlığı 8 inçten (20,3 cm) daha az olan kaplamalar için 15 ila 20 ft (4,6 ila 6,1 m),

tabaka kalınlığı 8 inç veya daha fazla olan kaplamalar için tabaka kalınlığının 2,5 katı olmaktadır (Harrington *et al.* 2010).



Şekil 15. SSB yollarda enine ve boyuna kesilmiş derzler (Harrington *et al.* 2010).

Kür

Kür işlemi, SSB yolun nihai dayanım ve dayanıklılıkla birlikte sağlam bir üst tabaka sağlanmasında son derece önemli bir faktördür. Kürlenme, SSB'nin tasarım mukavemetini geliştirmesine izin vererek ve sertleşmiş yüzeyin pullanmasını, tozlanmasını ve sökülmesini önleyerek kaplamaya fayda sağlamaktadır (Anonymous 2017a). SSB'nin su içeriği çok düşük olduğundan ve buharlaşma ile hidrasyon ısı hızla su içeriğini daha da azalttığından dolayı büzülme (rötre) çatlakları, sığ mikro çatlaklara ve/veya mukavemet kaybına neden olabilmektedir. Karışım suyunun buharlaşmasını önlemek amacıyla kürlenme işlemi son sıkıştırmadan sonra mümkün olan en kısa sürede gerçekleştirilmeli ve kür bileşiği yüzey kurumadan önce uygulanmalıdır (Gáspár and Bencze 2020). Açık yüzey dokusunun derecesine ve yüzeyin emiciliğine bağlı olarak kür bileşiğinin miktarı geleneksel betona göre uygulama oranının 1,5 ila 2 katı kadar olabilmektedir (Anonymous 2013a). SSB kaplamanın yüzeyi 7 gün boyunca veya onaylı bir kürlenme yöntemi uygulanana kadar sürekli olarak nemli tutulmalıdır. Kürlenme için aşağıdaki yöntemler kullanılabilir.

Su kürü: Su kürü, sisleme püskürtme uçları, ıslatma hortumları, yağmurlama sistemi veya SSB yola eşit bir nem durumu sağlayacak diğer araçlarla donatılmış su kamyonları tarafından Şekil 16'daki gibi uygulanmaktadır. Bu nemin uygulanması, bitmiş SSB kaplamanın yüzeyini aşındırmayacak veya zarar vermeyecek şekilde yapılmalıdır (Anonymous 2004).



Şekil 16. SSB yollara uygulanan su kürü (Anonymous 2024c).

Kür kimyasalı: Çoğu SSB yol projelerinde, ASTM C309'a (Anonymous 2019d) uygun Şekil 17'deki gibi beyaz bir beton kür bileşiği kullanılır. SSB nispeten düşük su içeriğine sahip olduğundan ve kuma suyu göstermediğinden, yüzeyin erken kurumasını önlemek için kürlenme bileşiği son sıkıştırmadan hemen sonra uygulanmalıdır. Bu yüzden, yol yüzeyini sızdırmaz hale getirerek buharlaşmayı minimuma indirmek için yeterli miktarda kür kimyasalı kullanmak çok önemlidir. Uygulama, tüm SSB kaplama yüzeyi boyunca düzgün bir boşluksuz kaplamanın var olmasını sağlayacak şekilde olmalıdır (Harrington *et al.* 2010).



Şekil 17. SSB yollara kür kimyasalının uygulanması (Anonymous 2024d).

Kaplama malzemeleri: SSB yolları kürlenmek için kür membranı, plastik ve diğer levha malzemeler ASTM C171'e (Anonymous 2020) uygun olmalıdır. Kaplama malzemelerini, kür

işlemi süresince SSB yol ile temasını devam ettirmek için yerinde sabit tutulmalı ve üzerlerine ağırlıklar eklenerek uzaklaşmaları engellenmelidir. Bitişik kaplama kenarları üst üste getirilmeli ve kum torbaları, tahtalar, basınçlı yapışkan bantlar veya başka yöntemlerle yerinde sabit tutulmalıdır (Anonymous 2004).



Şekil 18. Beton yollarda membran kürünün uygulanması (Anonymous 2007).

SSB yollarda kullanılan malzemeler

Kaliteli SSB yol karışımlarının üretimi için doğru malzeme seçimi önemli olmaktadır. SSB karışımının tasarım ve performans hedeflerini karşılamasını sağlamak için, karışım bileşenlerinin bilgisi, inşaat gereklilikleri ve amaçlanan projeye ilişkin spesifikasyonlar önemlidir (Guyer 2023).

Genel olarak SSB yol karışımlarında kullanılan malzemeler, geleneksel beton karışımlarında kullanılan malzemelerle (kaba ve ince agregalar, çimentolu malzemeler (çimento, uçucu kül, silis dumanı vb.), su ve uygun olduğunda kimyasal katkıları) aynı olmakla birlikte farklı oranlarda kullanılmaktadır. SSB yol karışımlarını oluşturan bileşenler ile geleneksel beton yol karışımı oluşturan bileşenler arasında farklılıklar mevcuttur (Williams and McFarland 2013);

- SSB karışımlar genellikle havayla sürüklenmez
- SSB'nin su içeriği daha düşüktür
- SSB'lerde çimento hamuru içeriği daha düşüktür
- SSB yollar, uygun sıkıştırmayı sağlamak için daha fazla ince agrega gerektirmektedir.

- SSB yollarda kullanılan agregaların boyutları 3/4 inç olan nominal maksimum agrega boyutunu geçmemelidir.

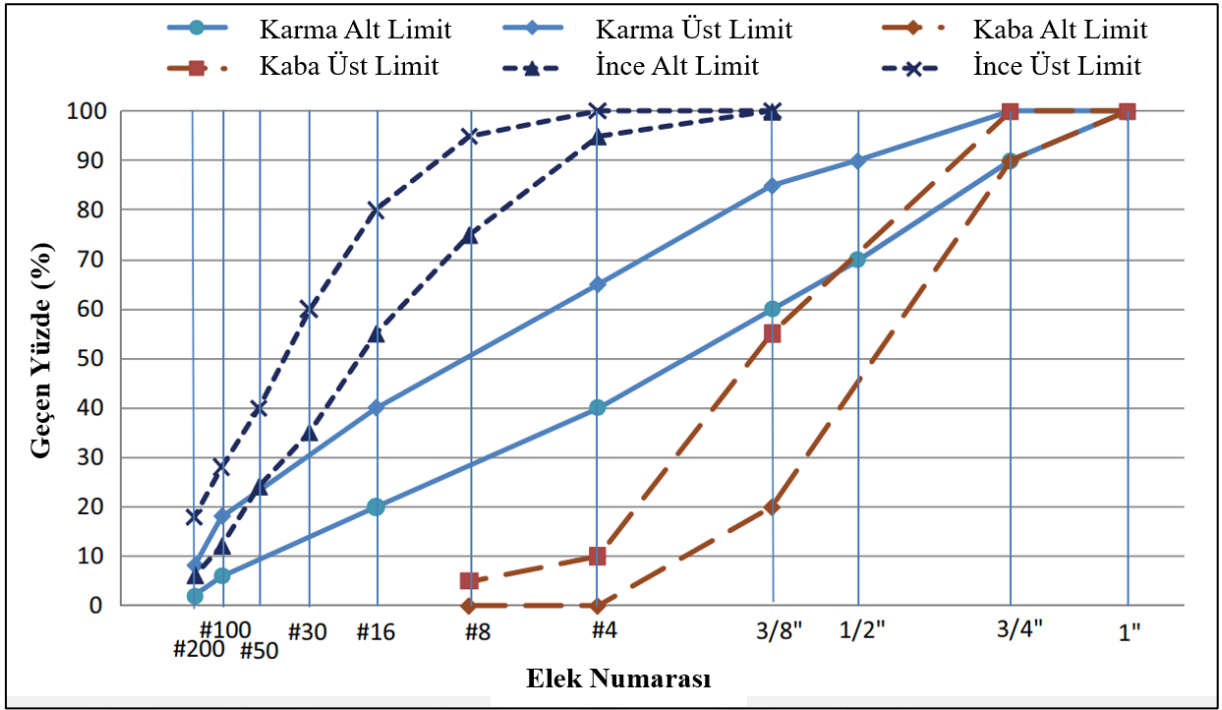
SSB yol üretiminde karışımlarında kullanılan genel malzemeler ve özellikleri aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

Agregalar

SSB için uygun agrega kaynağının seçimi, kalite ve ekonomik açılarından değerlendirildiğinde en önemli faktör haline gelmektedir. Bu durum, geleneksel beton yol kaplamaları kadar SSB yol kaplamaları için de geçerlidir (Guyer 2023). SSB yol karışımının hacminin %90'nını ince ve kaba agregalar oluşturduğundan dolayı, agregaların doğru seçimi ve sınıflandırılması başarılı bir karışım tasarımının elde etmede daha da önemli hale gelmektedir (Anonymous 2017a). SSB karışımlarında kullanılacak olan agregalar, SSB'nin işlenebilirliği, istenilen yoğunluğun, dayanımların, termal özelliklerin ve dayanıklılığın üzerinde önemli bir etkiye sahiptirler (Harrington *et al.* 2010).

SSB karışımlarının agrega sınıflandırması geleneksel betonlardan farklıdır, çünkü SSB karışımı finişer, çelik ve pnömatik lastik silindirler altında daha yoğun olacaktır. Beton karışımının toplam doygunluğu için ince agrega dağılım oranının artırılması gerekmektedir (Gáspár and Bencze 2020). Ayrıca, SSB'nin yüzey kalitesi, işlenebilirlik ve sıkıştırılabilirliğini yeterli bir şekilde sağlamak için ince ve kaba agrega derecelendirmesi çok iyi seçilmelidir (Harrington *et al.* 2010).

SSB karışımlarında öncelikle mevcudiyet durumuna bağlı olarak kırılmış veya kırılmamış agregalar veya karma agregalar kullanılabilir. Karışım tercihi, yoğun ve iyi derecelendirilmiş bir agrega karışımından yana olmalıdır. Her ne kadar agrega üretim yerleri istenen gradasyonu sağlayan bir karışım tedarik etse de, çoğu kez ince ve kaba agregalar en iyi gradasyonu sağlamak için ayrı ayrı harmanlanmaktadır. Şekil 19'da ince ve kaba agrega için önerilen karma agrega eğrilerinin yanı sıra derecelendirme eğrilerini de göstermektedir. İnce ve kaba eğrileri içine giren ürünler, istenilen birleşik gradasyonun elde edilmesi için uygun oranlarda oluşturulabilmektedir (Harrington *et al.* 2010).



Şekil 19. SSB yollar için önerilen karma agrega gradasyonu ile ince ve kaba agrega gradasyon eğrileri (Harrington *et al.* 2010).

SSB yol kaplama karışımlarında kullanılan agregalar, ince ve kaba dağılımlardan oluşmaktadır. Kaba agregalar kırılmış veya kırılmamış taş ve çakıllardan veya bunların karmasından elde edilirken, ince agregalar ise doğal, işlenmiş veya bu ikisinin birleşiminden elde edilmektedir. Yüksek kaliteli SSB için hem kaba hem de ince agrega dağılımları sert, dayanıklı parçacıklardan oluşmalı ve her birinin kalitesi istenen standart fiziksel özellikleri karşılamalıdır (Anonymous 2001). SSB karışımları için ASTM C33 (Anonymous 2023a) standartlarını karşılayan iri agregalar tavsiye edilmektedir. SSB kullanılan iri agregaların boyutları segregasyonun önlenmesi için 3/4 inç olan nominal maksimum agrega boyutunu geçmemelidir. Tipik nominal maksimum agregası boyutu 5/8 ila 3/4 inç (16 ila 19 mm) arasında değişmektedir. 3/4 inçten (19 mm) daha büyük tane boyutuna sahip agregalar (38 mm'ye kadar) kullanılabilir ve eğer uygun şekilde oranlanırsa (yeterli ince tanelerle) iyi kalitede bir son kat elde edilebilmektedir. Daha büyük nominal maksimum agregası boyutları tipik olarak yüzey görünümünün çok önemli olmadığı aşınmayan tabaka veya ikincil uygulamalar için kullanılır. 3/4 inçten (19 mm) daha küçük (13 mm kadar küçük) agregalar, ayrışmayı azaltmak, yapışmayı arttırmak ve sürüş kalitesini iyileştirmek için kullanılabilir. Ancak daha düşük boyutta maksimum agrega boyutunun seçilmesi, karışım için kullanılan bağlayıcı malzeme miktarını artırabilir ve kaplamanın dayanımını düşürebilir. SSB karışımlarda kullanılan ince agregaların da dayanıklılıkları ASTM C33 (Anonymous 2023a) standardını karşılamalıdır. No. 200 (75 µm) elekten daha ince agrega dağılımı kullanılması, SSB karışımlarındaki ince agrega boşluklarının azaltılmasına yardımcı

olmaktadır. SSB yol karışımlarının çimento içeriğini, sıkıştırılabilirliğini, yüzey düzgünlüğünü ve dayanıklılığını belirlemede büyük rol oynadığı için karışımlarda kullanılacak ince agrega seçimi çok önemli hale gelmektedir. Ayrıca betonda büzülmeyi artıran ve dayanımı düşüren silt ve killerin bulunduğu agregalar da SSB’de kullanılmamalıdır (Harrington *et al.* 2010). Tablo 1’de şartnamelerde belirtilen maksimum agrega tane boyutuna göre karma agrega gradasyon aralıkları verilmiştir.

Tablo 1. SSB Yollar İçin Karma Agrega Gradasyon Aralıkları (Anonymous 2014).

Elek Çapı	Alt ve üst Şartname Sınırları 1/2 inç (12,5 mm)		Alt ve üst Şartname Sınırları 3/4 inç (19 mm)		Alt ve üst Şartname Sınırları 1 inç (25 mm)	
1,5 inç (37,5 mm)					100	100
1 inç (25 mm)			100	100	82	100
3/4 inç (19 mm)	100	100	95	100	72	95
1/2 inç (12,5 mm)	81	100	70	95	61	81
3/8 inç (9,5 mm)	71	91	60	85	50	71
No. 4 (4,75 mm)	49	70	40	60	36	55
No. 8 (2,36 mm)	33	54	30	50	25	43
No. 16 (1,18 mm)	24	40	20	40	15	32
No. 30 (600 µm)	15	30	15	30	10	26
No. 50 (300 µm)	10	25	10	25	5	19
No. 100 (150 µm)	2	16	2	16	2	16
No. 200 (75 µm)	0	8	0	8	0	8

Bağlayıcı malzemeler

SSB karışımlarında, temel hidrolik çimento türlerinden herhangi biri, katkı çimentolar veya hidrolik çimento ve puzolan kombinasyonu kullanılabilir. SSB yol karışımlarında kullanılan bileşenler, geleneksel beton yollardaki gibi sülfat saldırısı, alkali reaktivitesi ve aşınmaya karşı gösterdikleri direnç durumuna göre tercih edilmelidir. Bağlayıcı olarak kullanılan çimentonun türü, SSB karışımların hidrasyon hızı ve dayanımı üzerinde etkili olmakla birlikte erken dayanım üzerinde de önemli bir faktördür (Harrington *et al.* 2010). Karışımın su içeriği düşük olduğundan ve uygun hidrasyon için yeterli suya ihtiyaç

duyulduğundan, sınırlı hidrasyon ısısına sahip çimento türlerinin kullanılması tavsiye edilmektedir (Gáspár and Bencze 2020).

SSB yol kaplamalarında yaygın kullanılan çimentolar, Tip I ve tip II çimento tipleridir. Tip III çimento türü de erken dayanım özelliği göstermesi istenen SSB karışımlarında kullanılabilir. Bir diğer çimento türü olan tip V ise özel zemin koşullarının mevcut olduğu alanlarda kullanılabilir (Harrington et al. 2010). Geleneksel beton yollarda olduğu gibi SSB yollarda kullanılan çimentolar, ASTM C150 (Anonymous 2012) veya ASTM C1157'nin (Anonymous 2010a) standartlarında belirtilen özelliklere sahip olmalıdır. Karışımlarda kullanılacak olan çimento tipinin seçimi, önceden tasarlanan dayanıma ve istenen dayanımın hangi sürede sağlanacağına bağlıdır (Anonymous 2001).

Çimentoyla birlikte kullanılan tamamlayıcı bağlayıcı malzemeler (Supplementary cementitious materials - SCM), özellikle standart gradasyona sahip beton karışımlarda, ince agregaya ek olarak incelik katmak ve sıkıştırılabilirliği artırmak için de kullanılmaktadır. Tamamlayıcı çimentolu malzemeler kullanıldığında işlenebilirliği artırabilir, alkali agreg reaksiyonu ve alkali-silika reaktivitesi potansiyelini azaltabilir, sıkıştırma süresini uzatabilir ve donma-çözünme koşullarında yardımcı olabilir (Harrington et al. 2010).

ASTM C618 standardına uygun olarak SSB karışımlarında kullanılan uçucu küller (yaygın olarak Tip F ve C), tipik olarak toplam çimentolu malzeme hacminin yüzde 15 ila 20'sini oluşturur (Williams and McFarland 2013). SSB yol yüzeyinin kireçlenmesini önlemek için karışımlarda kullanılan uçucu kül, karışımın toplam hacminin yüzde 25'ni geçmeyecek şekilde sınırlandırılmıştır. ASTM C989 (Anonymous 2022a) standardına uygun olan öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu ve ASTM C1240 (Anonymous 2020b) standardına uygun olan silis dumanı da bağlayıcı malzeme olarak SSB karışımlarında kullanılabilir. Silis dumanı da diğer bağlayıcı malzemeler gibi SSB'nin dayanım ve dayanıklılığını artırırken, SSB'nin sıkıştırılması için gereken güç miktarını da artırmaktadır (Harrington et al. 2010).

Su

SSB yollar için hidrasyon için ihtiyaç duyulan su, kısmen agreganın su içeriğinden, kısmen de karıştırma tesisinde eklenen sudan sağlanmaktadır (Gáspár and Bencze 2020). SSB yollar için su kalitesi, geleneksel betonla aynı gereksinimleri gerektirir (Anonymous 2001). Su kalitesi genellikle ASTM C1602 (Anonymous 2022b) gerekliliklerini karşılayacak şekilde olmalıdır. Su temiz, berrak olacak ve betonun kalitesine zarar verebilecek asit, tuz, alkali veya organik maddelerden arındırılmış olmalıdır (Anonymous 2004).

Su içeriği, SSB karışımının maksimum sıkıştırma yoğunluğuna ve projenin inşaat gereksinimlerine bağlı olmaktadır. Su içeriği, aynı zamanda kimyasal katkıların kullanımına da bağlı olmaktadır (Anonymous 2006).

Kimyasal katkılar

Geleneksel beton yol karışımları için kullanılan kimyasal katkılar (akışkanlaştırıcılar, priz geciktiriciler, hızlandırıcılar, hava sürükleyiciler vb.) SSB yol karışımlarında da kullanılabilir. Ancak, SSB’de kullanılan sınırlı su miktarı nedeniyle, çeşitli kimyasal katkıların dozajları daha fazla olabilmektedir (Gáspár and Bencze 2020). Kullanılan kimyasal katkılar ASTM C94 (Anonymous 2022c) standardındaki özelliklere uygun olmalıdır.

Su azaltıcı ve priz geciktirici katkılar, SSB karışımlarda bağlayıcılığı artırabilir, sıkıştırmaya yardımcı olabilir ve SSB'nin işlenebilirliğini 45 dakika ila 1 saate kadar uzatabilmektedir. Su azaltıcı bir katkının SSB karışımı için su gereksinimlerini azaltma veya ilave sıkıştırılabilirlik sağlama yeteneği, No. 200 (75 µm) elekten daha ince agrega miktarına ve türüne bağlı gibi görünmektedir. Bazı üreticiler, su azaltıcı katkıları kullanmak yerine çimento içeriğini arttırmanın daha ekonomik olduğunu belirlemişlerdir. Ancak ekonomik açıdan tercih edilebilecek bu durum, SSB karışımların daha fazla büzülmesi gibi diğer sorunlara neden olabilmektedir. Priz geciktirici katkıları ise SSB hidrasyonunun başlamasını geciktirebilir veya yavaşlatabilir, böylece sıkıştırma süresinin artmasına ve bitişik şeritler veya ardışık katmanlar arasındaki bağın iyileştirilmesine yardımcı olabilmektedir (Harrington *et al.* 2010).

Geleneksel beton yol karışımlarında, soğuk iklime sahip bölgelerde donma-çözünmeye karşı dayanıklılığı arttırmak için kullanılan hava sürükleyici kimyasal katkıların SSB yol karışımlarında kullanımı çok yaygın değildir. Çünkü çoğu SSB karışımı, karışımın düşük su-çimento oranına sahip olmasını sağlayarak donma endişelerini giderir, bu da macunun geçirgenliğini azaltır. Böylece hava sürükleyici kullanmadan kabul edilebilir donma-çözünme dayanıklılığı elde edilebilir. Kaplama düzgün bir şekilde sıkıştırıldığında, hapsolmuş hava boşluklarının miktarı azalır ve mukavemet artar, böylece donma direnci artar (Williams and McFarland 2013).

Süper akışkanlaştırıcılar bazen kuru harmanlı tesis üretiminde karıştırma ve boşaltma sürelerini azaltmak için kullanılmaktadır. Polikarboksilat türü süper akışkanlaştırıcılar, kuru harmanlı tesis üretiminde SSB karışımların işlenebilirliğini arttırmada ve karıştırma sürelerini düşürmede kullanılmaktadır. Bu da SSB üretim hızının önemli ölçüde artmasına neden olmaktadır. Priz hızlandırıcı katkıları, SSB’nin priz süresini hızlandırmak amacıyla, örneğin

bir projenin trafiğe erken açılması durumunda da kullanılabilir (Harrington *et al.* 2010).

SSB yolların karışım ve yapısal tasarımları

SSB karışımlarını oranlamak için kullanılan iki temel yaklaşım vardır. Birincisi, toprak sıkıştırma (Modifiye Proktor) testleri kullanılarak oranlamadır, ikincisi ise tutarlılık testleri yoluyla orantılamayı kullanan tutarlılık veya işlenebilirlik yaklaşımıdır. SSB karışımı tasarım yöntemleri arasında en yaygın olarak kullanılanı Proktor yöntemidir. Bu yöntemde, agrega ve çimento içeriği seçildikten sonra farklı nem içeriğine sahip karışımların sıkıştırılmasıyla Proktor eğrisi geliştirilmektedir. Karışımın nem içeriği ve elde edilen yoğunluğun birbirleriyle olan parabolik ilişkisine dayanarak, maksimum yoğunluk noktasına denk gelen değer nem içeriği olarak elde edilmektedir. Bu yöntem AASHTO T 180 (Anonymous 2020c) veya ASTM D1557'ye (Anonymous 2021b) standartlarına uygun olarak yapılmaktadır. Karışımın optimum nem içeriği elde edildikten sonra agrega ve bağlayıcı malzeme oranları da belirlenerek SSB karışımları üretilir. Tasarım için istenilen basınç dayanımını oluşturabilecek minimum çimento içeriği seçilir (Williams and McFarland 2013).

SSB kaplamalar geleneksel beton kaplamalara benzer mühendislik özelliklerine sahiptir. En dikkate değer fark, SSB karışımlarının nispeten daha düşük su ve çimento içerikleri nedeniyle SSB kaplamalarının büzülmenin azalmasıdır. SSB kaplamalar düz, dübelsiz ve takviyesiz kaplamalar olarak inşa edilir. Geleneksel beton yol kaplamalarının yapısal davranışları ile SSB yol kaplamaların yapısal davranışları benzer özellik göstermektedir. SSB yol kaplamalarda kalınlık tasarımı, geleneksel betonla aynı temele dayanmaktadır. Burada amaç, SSB kaplamanın eğilme gerilimini ve tekerlek yüklerinden kaynaklanan yorulma hasarını izin verilen sınırlar içinde tutmayı sağlamaktır. Beton kaplamaların yapısal tasarımında belirlenen tabaka kalınlığı, yük, dayanım ve zemin özelliklerinin bir fonksiyonu olarak değerlendirilmektedir. Bir SSB kaplamanın minimum kalınlığı, tipik olarak 4 inçtir (10 cm), tek tabakada maksimum kalınlığı ise 10 inçtir (25,4 cm) (Harrington *et al.* 2010).

SSB'deki kritik gerilmeler eğilmeye ilişkin olduğundan, kalınlık tasarımı için eğilme gerilmesinden kaynaklanan yorulma kullanılır. Yorulma ilişkilerinde kullanılan gerilme oranı, eğilme gerilmesinin eğilme dayanımına oranıdır;

$$\text{Gerilme Oranı} = \frac{\text{Kritik Uygulanan Eğilme Gerilmesi}}{\text{Eğilme Dayanımı}}$$

Kritik Uygulanan Eğilme Gerilmesi, beton kaplama tabakasının altındaki maksimum çekme gerilmesi, Eğilme Dayanımı ise ASTM C78'e (Anonymous 2010b) göre uygulanan üç noktalı kiriş eğilme testi kullanılarak elde edilen eğilme dayanımıdır. SSB yol kaplama kalınlık tasarımında, yeterli yorulma performansını sağlamak amacıyla ya gerilme oranını istenen seviyeye indirene kadar tabaka kalınlığı artırılır ya da dayanım artırılır (Harrington *et al.* 2010).

Beton Yollarda Atık Kullanımı

Son yıllarda karayolu altyapısında yaşanan hızlı gelişmeler, geleneksel yol yapım malzemelerinin aşırı kullanımı nedeniyle git gide tükenmesine yol açmaktadır. Yolların inşası büyük miktarda malzeme gerektirdiğinden dolayı toplum tarafından üretilen, atık ve yan ürün malzemelerinin hacmi ve bertaraf maliyeti artmaya devam ettikçe karayolu kurumlarında bu malzemelerin geri kazanılması ve geri dönüştürülmesine yönelik çalışmalar da artmaktadır. Bu atık veya yan ürün malzemeler beton yollarda, bağlayıcı malzeme olan çimento yerine tamamlayıcı çimentolu malzemeler olarak veya ince ve kaba agrega yerine kullanılabilirlerdir.

Katı atık malzemeler, sadece günlük yaşamdan elde edilen değil aynı zamanda endüstriyel veya evsel atık yollarıyla elde edilen atıkları ifade etmektedir. Farklı yollardan çok çeşitli ve fazla miktarda atık malzemeler üretilmesine rağmen bunlardan çok azından yol kaplamaları için faydalanılmaktadır. Çalışmalar sonucunda yol kaplamalarında kullanılan en popüler altı katı atık malzeme; geri dönüştürülmüş beton agregaları, geri kazanılmış asfalt kaplama, uçucu kül, taban külü, atık lastik ve atık plastik olarak belirlenmiştir. Daha fazla katı atık malzemeleri mevcut olmasına rağmen hem kitlesel olarak üretilmemeleri hem de doğrudan yol yapılarında kullanılabilirlikleri olağan olmadığından dolayı uygulanabilirlikleri olmamaktadır (Zhao *et al.* 2020).

Atık lastik

Sanayileşme ve sosyal modernleşmedeki hızlı gelişme ekonomiyi ileriye taşımakla birlikte küresel sanayileşme ve teknolojik yenilikler nedeniyle her yıl milyonlarca farklı türde katı atık üretilmiştir. Endüstriyel ve evsel atıklar da büyük miktarlarda artmış, çevrenin korunmasını insanlar için önemli bir zorluk haline getirmiştir. Birçoğu depolama veya yakma yoluyla ortadan kaldırılmaya çalışılan bu atıkların çevresel kaygılar yarattığı bilinmektedir. Bu atıkların en başında yeterince ortadan kaldırılamayan dolayısıyla da çevre kirliliğine neden olan atık lastikler gelmektedir (Shao *et al.* 2023; Bayraktar *et al.* 2021). Günümüze kadar, üretilen doğal veya sentetik lastiğin miktarı dünya genelinde yaklaşık olarak 25 milyon

tondur. Bunun hemen hemen %60'ı taşıt lastiklerinin üretiminde kullanılmıştır (Anonymous 2019a). Atık lastiklerin toplam stoğunun yaklaşık 100 milyon ton olduğunu ve bunun yalnızca %10'unun geri kazanılabileceği tahmin edilmektedir (Araujo-Morera *et al.* 2021). Atık lastikler çok dayanıklı olduklarından ve neredeyse bozulmaz özelliğine sahip olduklarından dolayı özel atık kategorisine girmektedirler, bu nedenle büyük bir çevre sorunu olarak görülmektedirler (Derakhshan *et al.* 2017; Herrera-Sosa *et al.* 2015). Motorlu taşıt üretiminin artmasıyla birlikte, atılan veya atık lastiklerin (Waste Rubber - WR) miktarları da her geçen gün artmaktadır. Bazı tahminlere göre dünya çapında lastiklerden kaynaklanan atık miktarı 1,5 milyar ton/yıl olup, 2025 yılı sonu itibarıyla bu rakamın 2,5 milyar tonun üzerine çıkması beklenmektedir (Kaur *et al.* 2021; Symeonides *et al.* 2019).

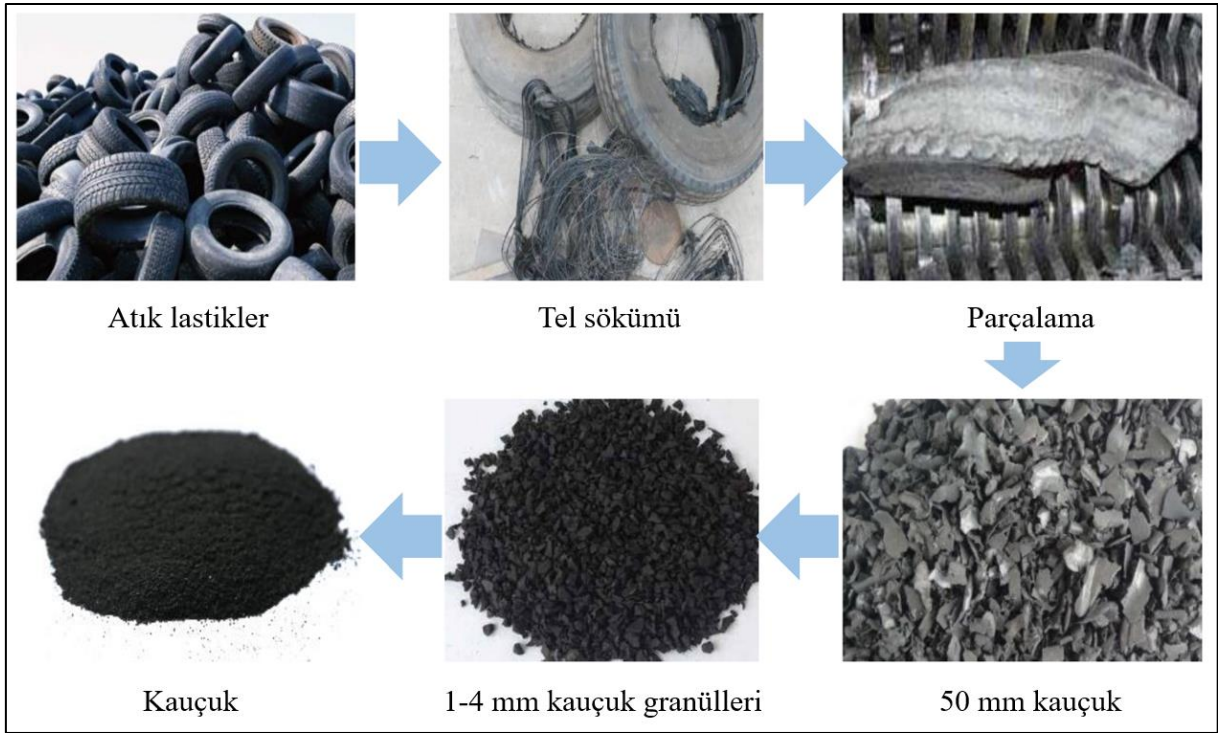


Şekil 20. Depolanan atık lastikler (Fakhri and Saberi 2016).

Atık lastiklerin sınıflandırılması

Atık lastiklerin geri dönüştürülmesinde en çok kullanılan yöntemlerden biri, öğütülerek çeşitli alanlarda kullanılmasıdır. Asfalt veya beton yol karışımlarında kullanılan kırıntı kauçuk boyutları 0,0075 - 4,75 mm arasında değişmektedir. Kırıntı kauçuğunu elde etmek için sırasıyla parçalama ayırma, çelik ve tekstil kısımlarının ayrılması ve sınıflandırma aşamaları uygulanmaktadır. Parçalama ayırma işleminde, atık lastikler önce büyük parçalara kesilip daha sonra küçük parçalara bölünmektedir. Parçalama ayırma işleminden sonra çelik tel ve tekstil parçaları ayrıştırılacaktır. Sınıflandırma işlemi için ise mekanik öğütme, farklı ortam sıcaklık ve şartlarında gerçekleştirebilmektedir (Thomas and Gupta 2016).

Ortam sıcaklığında öğütmede atık lastik parçacıkları, ortam sıcaklığında değirmenlerde veya granulatörlerde öğütülecektir. Islak ortamda öğütme işleminde ise kauçukları olumsuz etkileyen sıcaklığı düşürmek için su püskürtme yapılmaktadır. 130 °C'ye varan sıcaklık şartlarındaki öğütme işlemi sonunda, 1-6 mm aralığında boyutlara sahip kauçuk granülleri elde edilmektedir. Öğütme işleminin yüksek sıcaklıkta yapılmasının olumsuz yan kırıntı kauçuğun viskoelastik yapıya ve düşük ısı iletkenliğine sahip olmasıdır. Atık lastik kauçuğunun sınıflandırılması için ortam öğütme ve kriyojenik öğütme yaygın olarak kullanılan yöntemlerindendir (Karger-Kocsis et al. 2013).



Şekil 21. Farklı boyutlarda lastik üretim süreci (Wang *et al.* 2013).

Ganjian *et al.* (2009) atılan lastik kauçuğunu parçalanmış, kırıntı ve öğütülmüş kauçuk olarak sınıflandırmıştır.

(1) İri agregaların yerine kullanılan parçalanmış veya yontulmuş kauçuk: Lastikler iki aşamada parçalanır. İlk aşamadan sonra 300–430 mm uzunluğa ve 100–230 mm genişliğine sahip kauçuk parçaları elde edilmektedir. İkinci parçalama aşamasında parça boyutları 100-150 mm ve 13-76 mm' ye kadar düşürülmektedir. Elde edilen bu parçalar, karışımlarda iri agregaların yerine kullanılabilen 'parçalanmış parçacıklar' olarak adlandırılır.

(2) İnce agregaların yerine kullanılan kırıntı kauçuğu: Lastik kauçuğunun özel öğütücülerde 0,425–4,75 mm arasında değişen boyutlara düşürülmesiyle elde edilir. Değirmen tipine ve üretilen sıcaklığa bağlı olarak farklı boyutlarda kauçuk parçacıkları üretilmektedir.

(3) Kısmen çimentonun yerine kullanılan öğütölmüş kauçuk: Mikro öğütme işleminin tercih edilmesi halinde kauçuk parçacıkları 0,075-0,475 mm'ye kadar üretilebilir. Öğütölmüş kauçuğun yapımı sürecinde kauçuklar, iki aşamalı bir manyetik ayırma ve eleme işlemine tabi tutulmaktadır.

Silindirle sıkıştırılmış beton yollarda atık lastik kullanımı

Beton üretiminde kaba ve ince agreganın kısmen yerine atık lastiğin kullanılması üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Son yıllarda atık lastiğin SSB yollarda ince veya kaba agrega yerine kullanımıyla alakalı çalışmaların da yapıldığı gözlemlenmiştir.

Atık lastik agregası, uygun derecelendirmeyi oluşturmak için SSB yollarda çeşitli boyutlarda kullanılabilir. Parçalanmış kauçuk genellikle kaba agregaların yerine kullanılırken, düzensiz şekilli kırıntı kauçuk ise ince agrega yerine kullanılmaktadır. Toz kauçuk, beton karışımlarında dolgu maddesi, bağlayıcı malzeme veya ince agrega olarak kullanılabilir (Thomas and Gupta 2016).

Atık lastikler, SSB kaplamalarda bir veya daha fazla özelliği iyileştirmek ve çevresel sürdürülebilirliği arttırmak için kullanılabilir. Çok sayıda çalışma, kırıntı kauçuğun SSB'ye ince agrega olarak dahil edilmesinin, daha iyi tokluk ve enerji emilimi, daha az kırılma, daha iyi yorulma ömrü, daha yüksek ısı iletkenliği, daha iyi ses emilimi ve eğilme ve çekme yüklemesi altında çatlakların yayılma hızında önemli bir azalma gibi bir dizi avantaja sahip olduğunu göstermiştir (Adamu *et al.* 2018; Adamu *et al.* 2017).

Literatür Özeti

Meddah *et al.* (2014), çalışmalarında parçalanmış lastiğin SSB kaplamalarda kullanılma olasılığını deneysel olarak araştırmayı amaçlamışlardır. Kauçuk parçacıkları, doğal kırılmış agregaların bazı kısımlarının hacimsel olarak kısmi ikamesi olarak karışımlara eklenmiştir. Karışımın kauçuk içeriği arttıkça birim ağırlığı, mekanik özellikleri ve su emme özelliği azalırken, karışımın sünekliği ve çatlama direnci artmıştır.

Zhang *et al.* (2018), lastik parçacıkları ve çelik lif katkılı SSB'lerin donmaya karşı direnci üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, donma-çözünme döngülerinde ortam olarak ağırlıkça %25 potasyum asetat çözeltisi kullanılmıştır. Kütle kaybı, bağıl dinamik elastik modül, mikro yapılar ve gözenek yapıları gibi özelliklerin incelendiği araştırmadaki sonuçlar, lastik parçacıkları ve çelik liflerin aynı anda eklendiği SSB karışımlardaki kütle kayıplarının en yüksek düzeyde olduğunu göstermiştir. Ayrıca lastik parçacıkları ve çelik liflerin SSB karışımlarına eklenmesinin, donma-çözünme döngüsünün neden olduğu çatlakları ve gözeneklilik artışını da etkili bir şekilde azaltmadığı belirlenmiştir.

Fakhri and Saberi (2016), “Atık lastik parçacıkları ve silis dumanın silindirle sıkıştırılmış beton kaplamanın mekanik özelliklerine etkisi” adlı çalışmada, geri dönüştürülmüş lastik kauçukların SSB kaplamada hem performansını artırmak hem de çevresel etkilerini azaltmak amacıyla potansiyel kullanımını tartışılmıştır. Bu kapsamda, kum yerine farklı oranlarda (%0, %5, %10... %35) atık lastik ve çimento yerine silis dumanı içeren SSB karışımların mekanik özellikleri başta olmak üzere su emme ve birim ağırlık gibi özellikleri incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlarda, silis dumanı eklenmeyen %5 ve %10 oranlarında atık lastik içeren ve silis dumanı eklenen %5, %10, %15 ve %20 oranlarında atık lastik içeren SSB karışımların basınç dayanımlarında artış gözlemlendiği elde edilmiştir. Bununla birlikte, silis dumanı içeren ve içermeyen %5 atık lastik içeren karışımların eğilme dayanımlarında artış olmuştur. Ayrıca, karışımlarda atık lastik parçacıklarının kum yerine kullanımının su emilimini azalttığı belirlenmiştir.

Mohammed *et al.* (2018), kırıntı kauçuğu ve nano silikanın yüksek hacimli uçucu kül içeren silindirle sıkıştırılmış beton kaplamanın özellikleri üzerindeki etkisini tahribatsız teknikler kullanılarak değerlendirilmiştir. Çalışmada kırıntı kauçuğu, yüksek hacimli uçucu kül içeren SSB karışımlarda ince agrega yerine ikame olarak hacimce %0, %10, %20 ve %30 oranlarında kullanılmıştır. Bununla birlikte kırıntı kauçuğun eklenmesinden kaynaklanan mukavemet kaybını azaltmak için çimentolu malzemelerin ağırlığına göre %0, %1, %2 ve %3 oranında nano silika eklenmiştir. Kırıntı kauçuğu ve nano silikanın SSB karışımların performansı üzerindeki etkisini değerlendirmek için tahribatsız teknik yöntemlerinden olan geri tepme çekiç testi ve ultrasonik darbe hızı (UPV) testleri yapılmıştır. Sonuçlar, kırıntı kauçuk içeriğinin artmasıyla, karışımların birim ağırlığı, basınç dayanımı, geri tepme sayısını, UPV ve dinamik elastiklik modülünü azalttığını, nano silika eklenmesiyle bu değerlerin arttığını göstermiştir.

Adamu *et al.* (2018) yaptıkları çalışmada, SSB’de sırasıyla çimento ve ince agreganın yerine ikame olarak yüksek hacimli uçucu kül ve kırıntı kauçuğu ile birlikte ayrıca çimentolu malzemelere katkı maddesi olarak nano silika kullanmışlardır. İnce agrega yerine kullanılan kırıntı kauçuğun artmasıyla vebe süresi, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, elastiklik modülü, aşınma direnci ve darbe direncinin düşürdüğü saptanmıştır. Öte yandan nano-silika, çimento matrisi ile kırıntı kauçuğu arasındaki ara yüzey geçiş bölgesini yoğunlaştırma ve sertleşmiş çimento matrisindeki gözenekleri doldurma özelliği sayesinde kırıntı kauçuk içeren SSB kaplamanın mekanik özelliklerini ve performansını arttırmıştır.

Mohammed and Adamu (2018), “Kırıntı kauçuk ve nano silika içeren silindirle sıkıştırılmış beton kaplamanın mekanik performansı” çalışmalarında hacimce dört düzeyde

kırıntı kauçuk (%0, %10, %20 ve %30) ile ince agreganın yer değiştirdiği ve çimento malzemesi olarak ağırlıkça dört düzeyde nano silika (%0, %1, %2 ve %3) eklenmiş karışımlar hazırlanmış ve test etmişlerdir. Bulgular kırıntı kauçuğun SSB'nin kıvamını arttırdığını göstermektedir. SSB' nin basınç dayanımı ve aşınma direnci %10 kauçuk içeriği ile artarken, %20'ye kadar kauçuk içeriği ile eğilme dayanımı da artmıştır. Değişken olarak kırıntı kauçuk ve nano silika kullanımıyla mukavemeti ve su emilimini tahmin etmek için Yanıt Yüzey Yöntemi (Response Surface Methodology) kullanılarak geliştirilen matematiksel modeller, yüksek derecede korelasyon ve öngörülebilirlik göstermiştir. Çok amaçlı optimizasyonun sonuçları, yol uygulamaları için yüksek mukavemetli, dayanıklı ve sünek bir SSB'ye sahip olmak için ince agrega yerine hacimce %10 kırıntı kauçuk ve çimentolu malzemelere ağırlıkça %1,13 nano silika ilavesi ile optimum bir karışım elde edilebileceği gösterilmiştir.

Fakhri and Amoosoltani (2017), SSB kaplamaya geri dönüştürülmüş asfalt kaplama ve kırıntı kauçuk ekleyerek bunların SSB üzerindeki mekanik özelliklere etkisini araştırmışlardır. %5, %10 ve %25 kırıntı kauçuk ile %25, %50 ve %100 oranlarında geri dönüştürülmüş asfalt kaplama (reclaimed asphalt pavement – RAP) agrega eklenerek karışımlar oluşturulmuştur. Oluşturulan karışımlara basınç ve eğilme dayanım testleri uygulanmıştır. Sonuçlar, SSB numunelerinin basınç ve eğilme mukavemetlerinin, %5 kauçuk içeriği kullanıldığında %5 civarında iyileştirildiğini ortaya koymuştur. Buna karşılık, RAP içeriği arttıkça numunelerin basınç ve eğilme mukavemetinde yüksek bir azalma gözlemlenmiştir. Atık malzeme kombinasyonuna sahip SSB numuneleri için karışımların emilen enerjisini ve tokluğunu ölçmek için ikincil bir test yapılmıştır. Sonuçlar, atıkla birleştirilmiş numunelerin dayanıklılığında ve enerji emiciliğinde artan bir eğilim olduğunu göstermiştir. Daha sonra varyans analizi (Analysis of Variance - ANOVA) ve regresyon analizi kullanılarak çeşitli ilişkiler geliştirilerek enerji soğurma kavramı vurgulanmıştır. Regresyon sonuçları, %10' a kadar kauçuk ve %50' ye kadar geri dönüştürülmüş asfalt kaplama eklenmesinin, karışımların dayanıklılığını ve enerji emiciliğini artırarak kaplamanın ömrünü uzatmak açısından uygun maliyetli ve faydalı olabileceğini göstermiştir.

Fakhri *et al.* (2017), geri kazanılmış asfalt kaplama ve kırıntı kauçuk içeren silindirle sıkıştırılmış beton karışımlarının çatlak davranışı analiz etmişlerdir. Araştırmada SSB özelliklerinin hem mod I hem de mod II' deki kırılma davranışları üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Kırılma modu I ve II' de agrega gradasyonunun, çimento içeriğinin, geri kazanılmış asfalt kaplama ve kauçuk içeriğinin kritik gerilim yoğunluğu faktörleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Kauçuk katkılı karışımlar, geri kazanılmış asfalt kaplama içeren karışımlara göre daha yüksek kırılma tokluğu değerleri göstermiştir.

Al-Khuzai et al. (2020), kırıntı kauçuk içeren beton yolların mekanik özelliklerini değerlendirmişlerdir. Çalışmada betonun mekanik özellikleri, agreganın toplam ağırlığının %2, %4, %6, %8 ve %10'u olacak şekilde 5 farklı oranda lastik parçacıkları ilave edildikten sonra değerlendirilmiştir. Araştırma, iyileştirilmemiş kırıntı kauçuk ile farklı yöntemlerle iyileştirilmiş kırıntı kauçuğun kullanımına odaklanmıştır. Çalışmada ayrıca kauçuklu beton yolların mekanik özellikleri üzerinde lastik parçacık boyutlarının etkisi de araştırılmıştır. Sonuçlar, kırıntı kauçuklarla referans karışımın özelliklerine yakın özelliklere sahip kauçuklu beton kaplama üretebildiğini göstermiştir. %2 ve %4'lük oranlarda kırıntı kauçukların agrega yerine kullanılması, karayolu inşaatında kullanılacak üstyapının yeterli özelliklerini verirken, %6 oranında kullanılması ise kabul edilebilir sınırlar içinde yer almıştır. Daha iri parçacıklar, daha küçük parçacıklarla karşılaştırıldığında (kum yerine) mekanik özellikler açısından daha iyi performans göstermiştir. Sodyum hidroksit (NaOH) ile kimyasal işleme iyileştirilen kırıntı kauçuk kullanımı, sırasıyla 2%, 4% ve 6% kırıntı kauçuk içeren betonun basınç dayanımında yalnızca %7,6, %15 ve %28 oranında azalmaya neden olurken, suda ıslatma yöntemi ile iyileştirilen kırıntı kauçuk kullanımı ise %52,5, %55,1 ve %65,8'e kadar ulaşan daha fazla bir azalmaya neden olmuştur.

Turki et al. (2017), çalışmalarında uyarlanabilir nöro bulanık çıkarım sistemleri (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System - ANFIS) kullanılarak, parçalanmış aşınmış lastiklerden elde edilen kauçuk agregaları ve filler içeren harç ve SSB gibi çimentolu karışımların basınç dayanımı modellemesine odaklanmıştır. Karışımlarda kauçuk agregalar, agrega yerine hacimce %0, %10, %20, %50 oranlarında, filler malzemesi ise %5 olmak üzere sabit oranda kullanılmıştır. Sonuçlar lastik parçalarının, SSB ve harçların özellikle basınç dayanımı olmak üzere mekanik özelliklerini önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir. Filler malzemesinin eklenmesi ise numunelerinin basınç dayanımını bir miktar artırmıştır.

Adamu et al. (2020), çalışmalarında kırıntı kauçuk ve nano silika içeren yüksek hacimli uçucu küllü silindirle sıkıştırılmış beton kaplamanın bazı durabilite özelliklerini incelemiştir. Çalışma kapsamında kırıntı kauçuğu, ince agrega yerine %0, %10, %20 ve %30 oranlarında, nano silika ise çimento yerine %0, %1, %2 ve %3 oranlarında kullanılmıştır. Sonuç bulguları, yüksek hacimli uçucu kül ve kırıntı kauçuk SSB kaplamanın kıvamını, su emme oranını ve gözenekliliğini artırdığını, nano silikanın ise bu özellikleri azalttığını göstermiştir.

Adamu et al. (2017), "Nano silika modifiyeli silindirle sıkıştırılmış kauçuk betonun eğilme performansı" adlı çalışmada, silindirle sıkıştırılmış kauçuk beton üretmek için ince agregayı farklı yüzdelerde (%0, %10, %20 ve %30) kısmen değiştirmek için kırıntı kauçuk

kullanmış ve kırıntı kauçuğun neden olduğu mukavemet kaybını azaltmak için çimentolu malzemelerin ağırlığına göre %0, %1, %2 ve %3 oranlarında nano silika eklemiştir. Sonuçlar, kırıntı kauçuğun içeriğinin artmasıyla SSB'nin hem eğilme tokluğunun hem de süneklik indeksinin arttığını göstermiştir. Benzer şekilde eğilme mukavemeti de ince agreganın %20'ye kadar kırıntı kauçuk ile değiştirilmesi durumunda artmıştır. SSB'nin eğilme dayanımı nano silikanın eklenmesiyle artmış ancak tokluk ve süneklik indeksini azaltmıştır.

Meddah *et al.* (2017), mekanik ve kimyasal olarak iyileştirilmiş kauçuğun, SSB kaplamanın performansı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışmada, kauçuk parçacıkları, agregaların toplam hacminin bir kısmı yerine farklı oranlarda (%5, 10, 15, 20, 25, 30) karışıma ilave edilmiştir. Sonuçlar, kauçuğun SSB karışımlarının davranışını etkilediğini göstermiştir. Kauçuğun varlığında SSB kaplama daha sünek hale gelmiştir. Ancak kauçuğun eklenmesi, SSB'nin mekanik özelliklerindeki azalma gibi dezavantajı ortaya çıkarmıştır. Bu sorunu çözmek için kauçuk parçacıkları farklı işlemlere tabi tutulmuş ve karışıma silis dumanı eklenmiştir. Kauçuk parçacıkları, ilk yöntemde sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisiyle kimyasal olarak işlenmiş, diğer bir yöntemde ise kauçuk parçacıkları reçine ile kaplanmış ve sertleştirici ilave edilmiştir. SSB performansının, kauçuk parçacıklarının yüzey pürüzlülüğünün değiştirilmesiyle geliştirilebileceğini sonucuna varılmıştır.

Jingfu *et al.* (2009), lastik katkıli SSB'lerin mukavemet ve büzülme davranışlarını incelemiştir. Çalışma kapsamında bütün numunelerin basınç dayanımları 40 MPa düzeyinde tutularak silindirle sıkıştırılmış betonun lastik-kauçuk katkısı kullanılarak dayanım ve büzülme davranışları deneysel olarak incelenmiştir. Karışımlarda 50, 80, 100 ve 120 kg/m³ olmak üzere dört farklı kauçuk içeriği kullanılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, basınç dayanımı yaklaşık 40 MPa seviyesinde tutulduğunda, SSB'nin yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımını artırmıştır ve SSB'nin çatlamaya karşı direnç davranışı, kauçuğunun eklenmesiyle iyileşmiştir. Ayrıca lastik kauçuğunun eklenmesi kuruma büzülmesinin azaltılmasına yardımcı olmamış, aksine SSB'de kontrol betonuna göre daha fazla kuruma büzülmesi meydana getirmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Çalışmada kullanılan malzemeler, bunların miktarları ve özellikleri bu bölümde detaylı olarak açıklanmıştır.

Agrega

SSB karışımların hacminin yaklaşık %70'ini agregalar oluşturur. Bu nedenle iyi bir SSB karışımı üretmek için agrega seçimi önemli hale gelmektedir. Bu çalışmada, ASTM C33 (Anonymous 2023a) standardına uygun, maksimum 19 mm tane çapına sahip kırılmış kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Şekil 23'de gösterilen agregaların tane boyutu aralıkları 0–5 mm, 5-12 mm ve 12-19 mm olarak seçilmiş olup, elek analizi deneyi ile agregaların tane dağılımı belirlenmiştir. Agregaların fiziksel özellikleri ASTM C127 (Anonymous 2024e) ve ASTM C128 (Anonymous 2023b) standartlarına göre Şekil 22'de gösterildiği gibi belirlenmiş olup değerler Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 22. Çalışmada kullanılan agregaların fiziksel özelliklerin belirlenmesi.

Tablo 2. Agregaların Fiziksel Özellikleri

Fiziksel Özellikler	İnce Agregası (0-5 mm)	Kaba Agregası (5-12 mm)	Kaba Agregası (12-19 mm)
Maksimum Agregası Boyutu (mm)	5 mm	12 mm	19 mm
Özgül Ağırlık, kg/dm ³	2,48	2,65	2,68
DYK Özgül Ağırlık, kg/dm ³	2,57	2,67	2,68
Görünür Özgül Ağırlık, kg/dm ³	2,71	2,69	2,70
Su Emme, %	3,51	0,59	0,34
Başlangıç Nem İçeriği, %	0,08	0,06	0,03

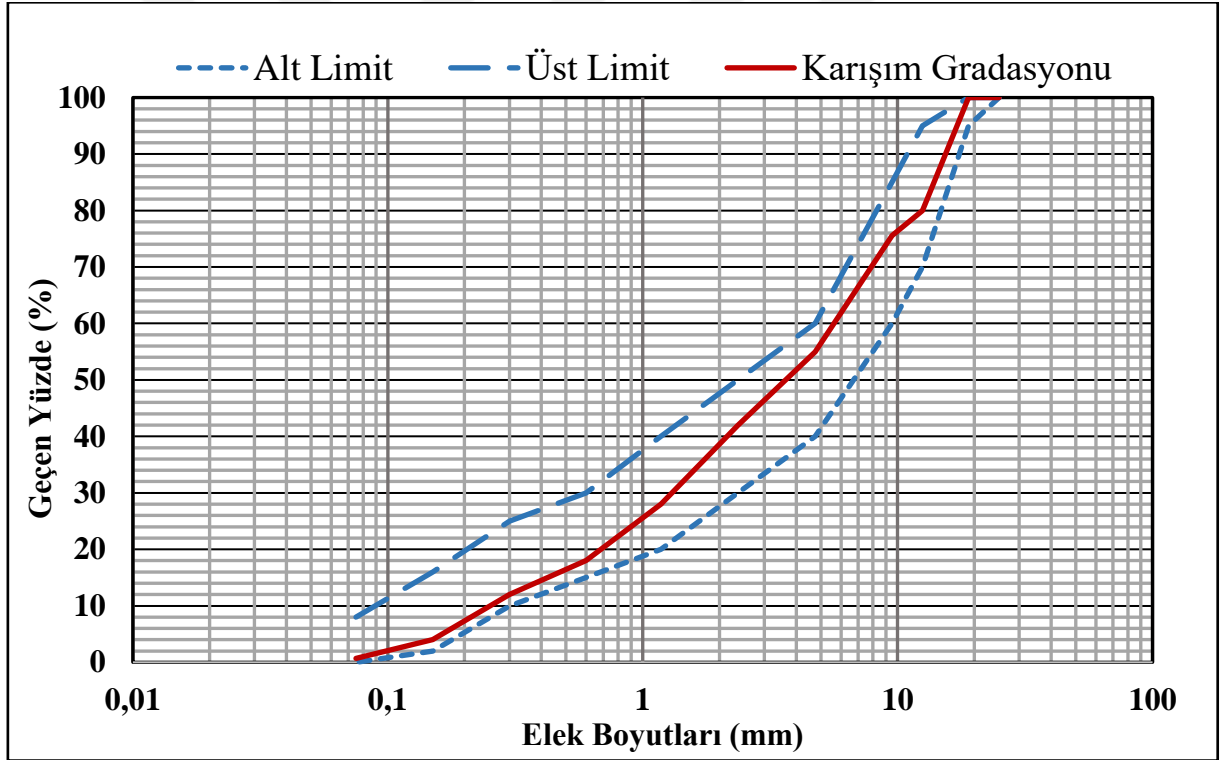


Şekil 23. Çalışmada kullanılan agregalar.

Çalışmada kullanılan agreganın elek analizi sonuçları Tablo 3'te, karışımının gradasyon eğrisi Şekil 24'de verilmiştir. Karışımın agregası gradasyon eğrisi Amerikan Beton Kaplama Birliği (American Concrete Pavement Association - ACPA) tarafından belirlenen sınırlar dahilinde oluşturulmuştur (Harrington et al. 2010).

Tablo 3. SSB Karışımlarda Kullanılan Agreganın Elek Analiz Sonucu

Elek Açıklığı (mm)	Geçen %				Standart Aralık
	0-5 mm	5-12 mm	12-19 mm	Karışım	
25,000	100	100	100	100	100-100
19,000	100	100	100	100	95-100
12,500	100	100	0	80	70-95
9,500	100	83	0	76	60-85
4,750	100	0	0	55	40-60
2,360	76	0	0	42	30-50
1,180	51	0	0	28	20-40
0,600	33	0	0	18	15-30
0,300	21	0	0	12	10-25
0,150	7	0	0	4	2-16
0,075	2	0	0	1	0-8

**Şekil 24.** SSB karışımının agrega granülometri eğrisi.

Çimento ve Su

Çalışmada Artova Çimento Fabrikası (Tokat, Türkiye) tarafından ASTM C150 standardına (Anonymous 2012) uygun olarak üretilen Tip 1 Portland çimento tipi kullanılmıştır. Çimentonun özgül ağırlığı $3,1 \text{ gr/cm}^3$ ve özgül yüzey alanı $3420 \text{ cm}^2/\text{gr}$ olup kimyasal özellikleri de Tablo 4'de verilmektedir. Karışımlarda ASTM C1602 (Anonymous 2022b) standardının gerekliliklerini sağladığından dolayı şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

Tablo 4. Çimentonun Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

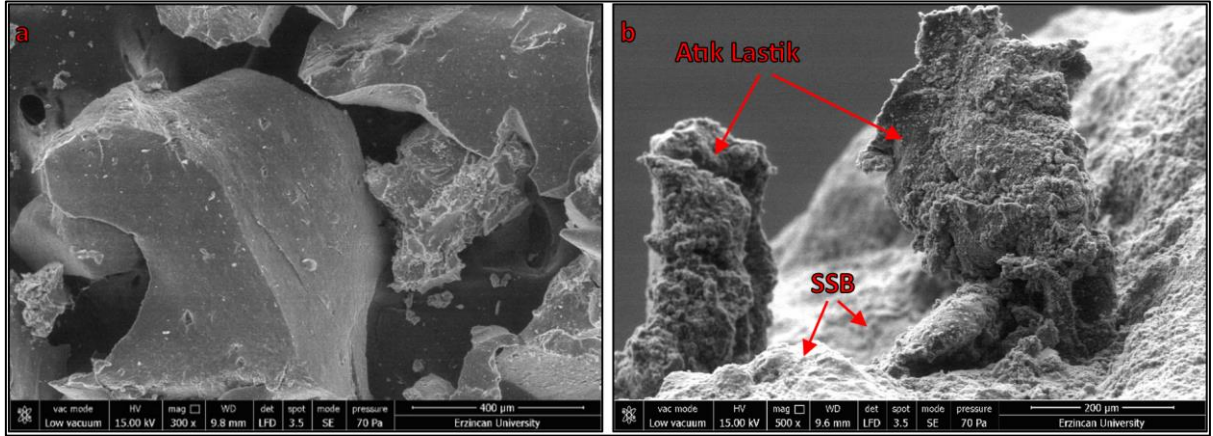
Bileşen	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Cl
Miktar (%)	18,5	4,5	3,6	63,3	1,2	2,9	0,3	0,7	0,014
Başlangıç Priz Süresi (dk)				145					
Son Priz Süresi (dk)				215					
Basınç Dayanımı (28 gün) (MPa)				45,82					

Atık Lastik

Çalışmada kullanılan atık lastikler, çoğunluğu kullanılmış otomobil ve kamyon lastikleri olan ürünlerin yerel bir tesiste geri dönüştürülmesi sonucu elde edilmiştir. Kaba ve ince agrega yerine hacimce ikame olarak Şekil 25’de gösterilen atık lastiğin parçalanmış, kırıntı ve toz olmak üzere üç farklı oluşumu kullanılmıştır. Atık lastikler, lastiklerin mekanik olarak öğütülmesiyle elde edilmişlerdir ve tane boyutları 0-1 mm, 1-5 mm, 5-12 mm ve 12-19 mm olarak seçilmiştir. Farklı boyutlardaki atık lastiklerin fiziksel özellikleri ASTM C127 (Anonymous 2024e) ve ASTM C128 (Anonymous 2023b) standartlarına göre belirlenmiş olup değerler Tablo 5’de verilmiştir. Atık lastik parçacıklarının Taramalı Elektron Mikroskopu (Scanning Electron Microscope - SEM) görüntüleri ve X Işını Difraksiyonu (X-Ray Diffraction - XRD) spektrumu Şekil 26 ve Şekil 27’de verilmiştir.

**Şekil 25.** Parçalanmış, kırıntı ve toz atık lastik.**Tablo 5.** Atık Lastiklerin Fiziksel Özellikleri

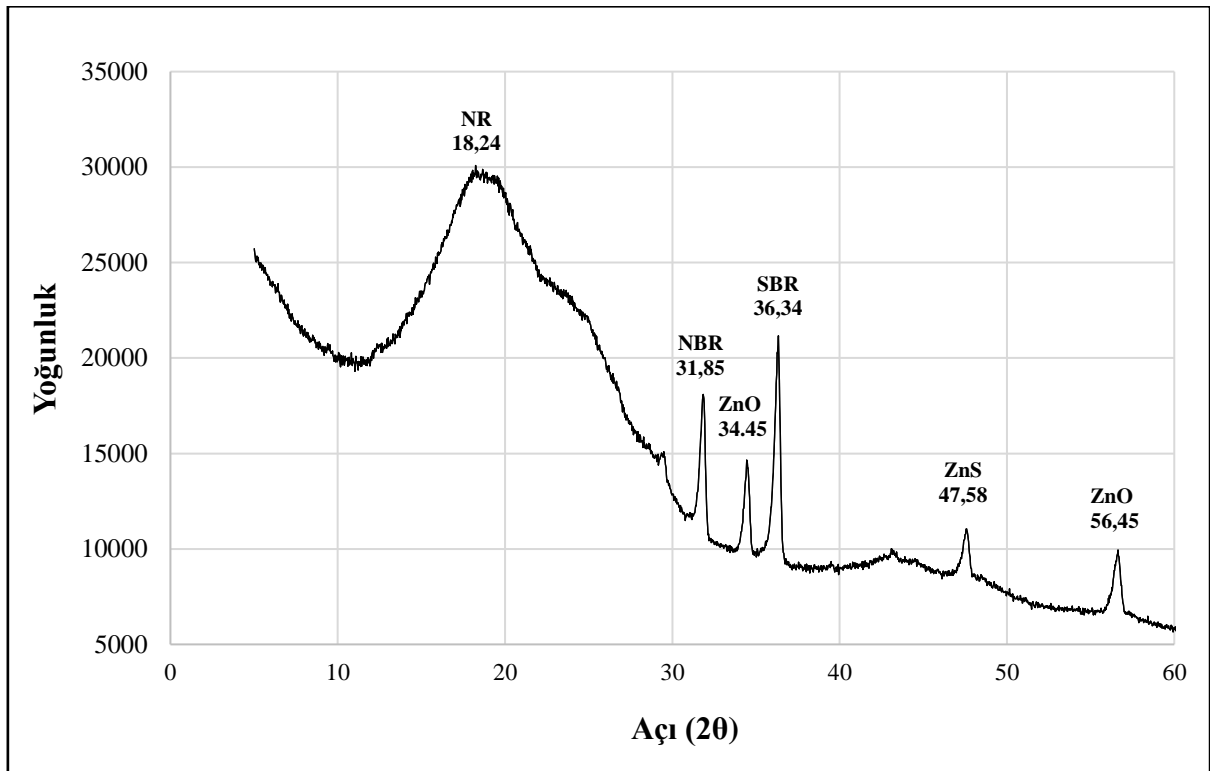
Fiziksel Özellikler	Atık Lastik (0-5 mm)	Atık Lastik (5-12 mm)	Atık Lastik (12-19 mm)
Maksimum Agrega Boyutu (mm)	5 mm	12 mm	19 mm
Özgül Ağırlık, kg/dm ³	1,03	1,11	1,13
DYK Özgül Ağırlık, kg/dm ³	1,12	1,14	1,16
Görünür Özgül Ağırlık, kg/dm ³	1,12	1,14	1,16
Su Emme, %	2,09	2,00	1,86



Şekil 26. SEM görüntüleri; atık lastik (0-1 mm) (a) ve SSB’de atık lastik (b).

Atık lastik numunelerin morfolojik özellikleri SEM kullanılarak araştırılmıştır. Şekilden anlaşılacağı üzere atık lastiklerin yüzeyleri pürüzsüzdür, belirgin kenarları ve köşeleri olmakla birlikte yüzeyde bazı mikro gözeneklere sahiptir. Bu durum atık lastiklerin üretim aşamasında bıçaklar yardımıyla düzgün şekilde kesilmesinden kaynaklanabilmektedir.

Atık lastik parçacıklarının kristallik değerlendirmesi yapılmış ve altı tepe noktası elde edilmiştir. Atık lastiğin XRD profili, genellikle lastiklerde bulunan elastomerlere (doğal ve sentetik kauçuk, karbon siyahı) karşılık gelen, ancak aynı zamanda çeşitli kristal tepe noktaları da sergileyen tipik amorf bileşenleri gösterir (Bom *et al.* 2019). Tepe noktası en yüksek olan ve en yoğun olan yer $2\theta=18.24^\circ$ açısına karşılık gelen doğal lastiktir (natural rubber - NR). Doğal lastiği sırasıyla $2\theta=31,85^\circ$ ve $2\theta=36.34^\circ$ açılara karşılık gelen akrilonitril bütadien kauçuk (acrilonitrile butadiene rubber - NBR) ve stiren bütadien stiren (styrene butadiene styrene - SBS) takip etmektedir. $2\theta=34.45^\circ$ ve 56.45° deki zirveler çinko okside (ZnO) karşılık gelirken, $2\theta = 47.58^\circ$ deki zirve çinko sülfid (ZnS) karşılık gelmektedir.



Şekil 27. Atık lastik parçacıklarının XRD spektrumu.

Yöntem

Çalışmada atık lastiğin silindire sıkıştırılmış beton yollarda agrega yerine kullanımının araştırılması amacıyla yapılan yöntemler bu bölümde açıklanmıştır. Bu kapsamda yukarıda detaylı olarak açıklanan malzemelerin kullanım şekilleri, oranları ve uygulamalarının nasıl yapıldığı ile birlikte yapılan deney, ölçüm ve analiz gibi yöntemlerin standartları ve yapılaş şekilleri detaylı bir şekilde ele alınmıştır.

Su içeriğinin ve karışım oranlarının belirlenmesi

Geleneksel betondan farklı olarak SSB çok kuru kıvama sahiptir. Bu yüzden maksimum yoğunluğu sağlamak için karışımın sıkıştırılabilirliği çok önemlidir. SSB'nin sıkıştırılabilirliğini etkileyen parametreler arasında en önemlisi, karışımın sahip olduğu su içeriğidir. Karışımların su içeriği ile yoğunluk arasındaki ilişkiyi elde edebilmek için sıkıştırma yöntemi olarak iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Bunlar; Modifiye Proktor Deneyi (ASTM D1557) (Anonymous 2021b) ve Sarsma Tablası Kullanılarak SSB'nin Yoğunluk ve Kıvamının Belirlenmesi için Standart Test Metodu (ASTM C1170) (Anonymous 2017b) yöntemleridir.

Çalışma kapsamında SSB karışımların optimum su muhtevası belirlenirken Modifiye Proktor Deneyi (ASTM D1557) (Anonymous 2021b) Şekil 28'deki gibi uygulanmıştır.

Biri kontrol olmak üzere altı farklı oranda (%2,5, %5, %7,5, %10, %20 ve %30) atık lastik içeren toplam yedi SSB karışımının optimum su muhtevası belirlenmiştir. 15,25 cm çap ve 12,80 cm yüksekliğe sahip modifiye proktor kalıbı kullanılan deneyde, SSB karışımlar üzerine 5 tabakada, 4,5 kg ağırlığa sahip tokmak ile her tabakaya 56 defa vurmak suretiyle sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir Modifiye Proktor deneyinde önceden belirlenen su içeriği miktarı ile başlanır ve karışımlardaki su içeriği belirli oranlarda artırılıp deney devam ettirilir.



Şekil 28. SSB karışımlar için modifiye proktor deneyinin yapıışı.

Modifiye proktor deneyi sonunda karışımların su muhtevalarını belirlemek için sıkıştırılmış SSB numunelerinden 2000 gr örnek alınarak Şekil 29’da gösterildiği gibi 110 ± 5 °C sıcaklığa sahip etüvde sabit ağırlığa gelinceye kadar kurutulmuş ve karışımların kuru birim hacim ağırlıkları belirlenmiştir. Deneye önceden belirlenen su muhtevasına sahip bir karışım ile başlanmış ve belirli oranda su muhtevası artırılarak her bir karışım için 6 farklı su/çimento oranına sahip numune elde edilerek deneye devam edilmiştir



Şekil 29. Numunelerin ağırlıklarının belirlenmesi ve etüvde kurutulması.

Her bir karışıma ait su içeriği ve kuru birim ağırlık değerleri aşağıdaki bağıntılar ile hesaplanmış ve karışımların su içeriği ile kuru birim ağırlığı arasındaki ilişkiler Şekil 30'da ve Tablo 6'da gösterilmiştir. Elde edilen ilişkiye göre grafikte maksimum kuru birim ağırlığa karşılık gelen değer, optimum su muhtevası olarak elde edilmiştir.

SSB karışımların yaş birim ağırlıkları her numune için aşağıdaki gibi elde edilmiştir;

$$p_m = \frac{M_1 - M_2}{V} \quad (2.1)$$

p_m : Sıkıştırılmış numunenin yaş birim ağırlığı, kg/m^3

M_1 : Yaş numune ve kalıbın ağırlığı, kg

M_2 : Kalıbın ağırlığı, kg

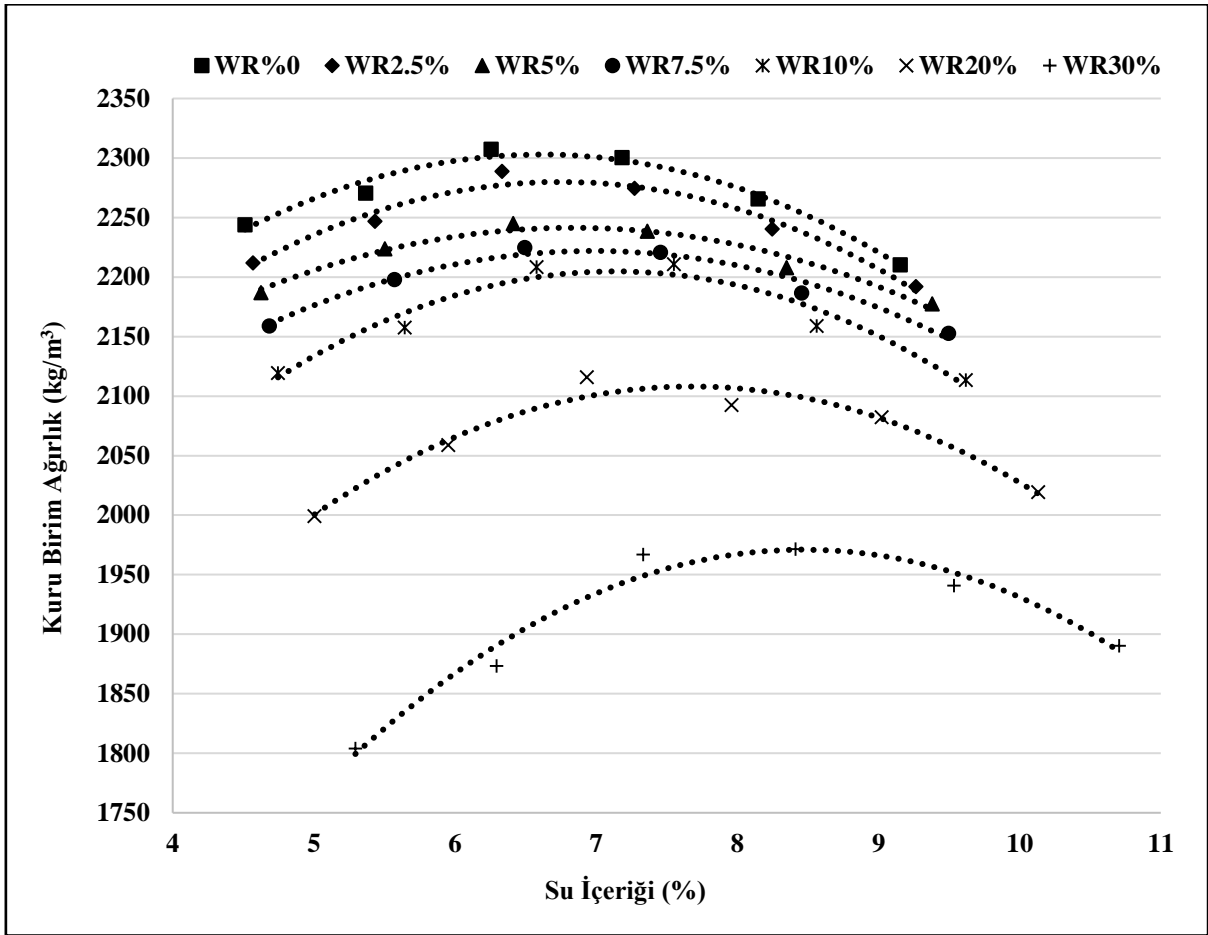
V : Kalıbın hacmi, m^3

SSB karışımların kuru birim ağırlığı her numune için aşağıdaki gibi elde edilmiştir;

$$p_d = \frac{p_m}{1 + w} \quad (2.2)$$

p_d : Sıkıştırılmış numunenin kuru birim ağırlığı, kg/m^3

w : Su muhtevası, %



Şekil 30. SSB karışımların su içeriği – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi.

Tablo 6. SSB Karışımların Su İçeriği – Maksimum Kuru Birim Ağırlık İlişkisi

Karışım	Kuru birim ağırlık (γ) - su içeriği (w) ilişkisi	R ²	Optimum su içeriği (%)	Maksimum kuru birim ağırlık (kg/m ³)
C	$\gamma = -14,333w^2 + 189,39w + 1677,3$	0,97	6,61	2303
WR2,5	$\gamma = -14,476w^2 + 195,51w + 1619,7$	0,96	6,75	2280
WR5	$\gamma = -10,591w^2 + 144,83w + 1746,2$	0,96	6,84	2241
WR7,5	$\gamma = -11,646w^2 + 162,57w + 1654,5$	0,97	6,98	2222
WR10	$\gamma = -15,587w^2 + 222,46w + 1410,9$	0,94	7,14	2205
WR20	$\gamma = -15,009w^2 + 230,57w + 1222,6$	0,95	7,68	2108
WR30	$\gamma = -17,025w^2 + 288,37w + 749,87$	0,96	8,47	1971

SSB karışım hesabı ve kodlama

Elde edilen bağıntılar yardımıyla karışımların optimum su muhtevaları belirlenmiştir. Tablo 3’den anlaşıldığı gibi SSB karışımlara eklenen atık lastik miktarı arttıkça optimum su içeriğinin de arttığı gözlemlenmiştir. Belirlenen optimum su muhtevalarına göre her bir karışımının su/çimento oranı belirlenerek 1 m³ SSB karışımları için kullanılan malzeme miktarları elde edilmiştir. Örnek olarak atık lastik kullanılmayan kontrol karışımların 1 m³

için beton karışım hesabı aşağıdaki gibi elde edilmiş ve Tablo 7’de SSB karışımların karışım oranları gösterilmiştir.

$$S/\Ç = 0,42 \quad \text{Çimento} = 350 \text{ kg} \rightarrow \quad Su = 147 \text{ kg}$$

$$\gamma_{\text{çimento}} = 3100 \text{ kg/m}^3 \quad \rightarrow \quad V_{\text{çimento}} = 350/3100 = 0,113 \text{ m}^3$$

$$\gamma_{su} = 1000 \text{ kg/m}^3 \quad \rightarrow \quad V_{su} = 147/1000 = 0,147 \text{ m}^3$$

$$V_{hava} = \%1 = 0,01 \text{ m}^3$$

$$V_{agrega} = 1 - (0,113 - 0,147 - 0,01) = 0,730 \text{ m}^3$$

Agrega dağılımı;

%55 → 0-5 mm,

%25 → 5-12 mm,

%20 → 12-19 mm

$$V_{0-5} = 0,55 * 0,730 = 0,40 \text{ m}^3$$

$$W_{0-5} = 0,40 * 2478 = 995 \text{ kg}$$

$$V_{5-12} = 0,25 * 0,730 = 0,18 \text{ m}^3$$

$$W_{5-12} = 0,018 * 2651 = 484 \text{ kg}$$

$$V_{12-19} = 0,20 * 0,730 = 0,15$$

$$W_{12-19} = 0,115 * 2675 = 391 \text{ kg}$$

S : Karışımdaki Su miktarı

Ç : Karışımdaki Çimento miktarı

γ : Özgül Ağırlık

V : Hacim

W : Ağırlık

Tablodaki SSB karışım kodları harf ve rakamlarla tanımlanmıştır. C kontrol numunelerini ifade ederken WRX ise yüzdece X oranda atık lastik katkılı SSB karışımları ifade etmektedir.

Tablo 7. SSB Karışımların Karışım Oranları

Karışım kodu	Çimento (kg)	Agrega (kg)			Atık lastik içeriği (%)	Atık lastik (kg)				S/Ç
		İnce Agregası (0-5 mm)	Kaba Agregası (5-12 mm)	Kaba Agregası (12-19 mm)		Toz AL (0-1 mm)	İnce AL (1-5 mm)	Kaba AL (5-12 mm)	Kaba AL (12-19 mm)	
C	350	995	484	391	0	-	-	-	-	0,42
WR2,5	350	970	472	381	2,5	1,56	8,86	5,09	4,14	0,42
WR5	350	945	460	371	5,0	3,13	17,71	10,18	8,28	0,42
WR7,5	350	916	445	360	7,5	4,67	26,44	15,19	12,36	0,43
WR10	350	891	433	350	10,0	6,22	35,26	20,25	16,48	0,43
WR20	350	788	383	309	20,0	12,38	70,18	40,31	32,80	0,44
WR30	350	687	334	269	30,0	18,49	104,76	60,18	48,96	0,45

Numunelerin üretimi ve kür

SSB üretimi için ilk adım olarak karışımlarda kullanılan malzemeler (agrega, çimento ve atık lastik) kuru halde homojen bir karışım elde edilene kadar laboratuvar mikserinde iyice karıştırılmıştır. Daha sonra karışıma karma suyu ilave edilerek karışımın karıştırma işlemine, tekrar homojen durumuna gelene kadar devam edilmiştir.

Çok kuru kıvama sahip olan SSB karışımların üretilmesi için geleneksel betondan farklı olarak ayrı bir sıkıştırma işlemi gerekmektedir. Bu işlemi gerçekleştirmek için ASTM C1435 (Anonymous 2017c) standardında belirtilen Şekil 31’de gösterilen titreşimli tokmak ve sıkıştırma plakaları kullanılmıştır. Sıkıştırma işleminde küp, silindir ve kiriş numuneler üretmek için kare, daire ve dikdörtgen kesitlere sahip plakalar kullanılmıştır. Ayrıca SSB plakalarının üretiminde sıkıştırma işleminin gerçekleştirilmesi için el kompaktörü kullanılmıştır.



Şekil 31. SSB numunelerin üretilmesinde kullanılan titreşimli tokmak ve el kompaktörü.

Şekil 32’deki gibi üretilen SSB karışımlar, kalıplara dökülerek istenilen numuneler elde edilmiştir. Sıkıştırma işlemi kalıpların üçte birine denk gelecek şekilde, üç tabaka halinde gerçekleştirilmiştir. Sıkıştırma işlemi, maksimum 20 saniyeyi geçmeyerek, sıkıştırma plakasının etrafında halka biçiminde harç oluştuğunda sıkıştırma işlemi durdurulacak şekilde

tamamlanmış ve diğer tabakalara geçilmiştir. Numuneler dökümden 24 saat sonra kalıptan çıkarılmış ve test zamanına kadar standart koşullardaki kür havuzunda bekletilmiştir.



Şekil 32. SSB numunelerin üretimi ve kür.

Farklı laboratuvar deneylerinde kullanılmak üzere çeşitli şekillerde ve boyutlarda SSB numuneler üretilmiştir. Tek eksenli basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı tayini ile birlikte elastisite modülü belirlemek için 150 x 300 mm boyutlarında silindir SSB numuneler üretilmiştir. Eğilme dayanımı belirlemek amacıyla 100 x 100 x 400 mm boyutlarında kiriş numuneler üretilmiştir. Kılcal su emme, tek eksenli basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımını belirlemek amacıyla 100 x 200 mm boyutlarında silindir numuneler üretilmiştir. Birim ağırlık ve tek eksenli basınç dayanımı belirlemek amacıyla da 100 x 100 x 100 mm boyutlarında küp numuneler üretilmiştir.

Ayrıca dış ortam sıcaklığının atık lastik katkılı SSB üzerindeki etkisini incelemek amacıyla 200 x 1000 x 1000 mm boyutlarında plak numuneler üretilmiştir. Plak numunelerin üretimi kapsamında SSB dökümü yapılacak ve temel görevi görecektir toprak tabakası, Şekil 33'te gösterildiği gibi el kompaktörü ile sıkıştırılarak SSB plakların dökümü için hazır hale getirilmiştir. Ahşap kalıplar yardımıyla yukarıda belirtilen boyutlardaki plaklar, Şekil 34'teki gibi 3 tabakada olacak şekilde sıkıştırılarak üretilmiştir. Üretilen SSB plaklara 7 gün boyunca çuval bezi kullanılarak kür işlemi uygulandıktan sonra 1 yıl boyunca çevre şartlarında bekletilerek plak kalınlığı boyunca yaz ve kış aylarında sıcaklık ölçümleri alınmıştır.



Şekil 33. SSB plakların dökümü öncesi zeminin kompaktörle sıkıştırılması



Şekil 34. SSB plakların üretimi.

Yapılan Deneyler, Ölçümler ve Analizler

Bu çalışma kapsamında üretilen SSB numunelere, taze halde ve sertleşmiş durumlarda uygulanan deneyler ve ölçümler, standart ve yapıları ile birlikte aşağıda verilmiştir. Karışımların mikroyapısal analizi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ayrıca SSB plaklardan elde edilen verilerle 3B yazılım paketi ANSYS kullanılarak sonlu elmanlar yöntemiyle modellemeler yapılmıştır.

Taze beton birim ağırlık deneyi

Üretimi yapılan SSB numunelerin taze birim ağırlıkları ASTM C138 (Anonymous 2023c) standardına göre 150 x 150 x 150 mm boyutlarında küp numuneler üretilerek

belirlenmiştir. Üretilen küp numuneler 0,1 gr hassasiyete sahip hassas terazi ile Şekil 35'teki gibi tartılarak ağırlıkları elde edilmiştir. Numunelerin ağırlıkları, küp kalıpların hacmine bölünmesiyle birim ağırlıkları belirlenmiştir.



Şekil 35. Taze beton birim ağırlık deneyi.

Basınç dayanımı deneyi

SSB karışımların basınç dayanımlarını belirlemek amacıyla 150 x 150 x 150 mm boyutlarında küp, 100 x 200 mm ve 150 x 300 mm boyutlarında silindir numunelere ASTM C39 (Anonymous 2023d) standardına uygun olarak Şekil 36'da gösterildiği gibi tek eksenli basınç dayanımı testi uygulanmıştır. Deney, Şekil 34'te gösterilen 3000 kN yük kapasiteli cihazla gerçekleştirilmiş olup, numunelerin basınç dayanım değerleri cihaz ekranından okunarak kaydedilmiştir. Her bir parametre için 3'er adet numune üretilerek teste tabi tutulmuştur. Yüzeylerindeki düzensizliklerine sahip silindir numunelerde, deney yükünü uniform yaymak amacıyla kırım sürecinde ASTM C1231 (Anonymous 2023e) standardına uygun olarak tutucu plakalar ve neopren basınç yastıkları kullanılmıştır.

Basınç dayanım deneyi, atık lastik katkılı SSB numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmasının yanı sıra, yüksek sıcaklık etkisi öncesi ve sonrası, donma-

çözünme etkisi öncesi ve sonrası ve asit ve sülfat etkisi öncesi ve sonrasında da mekanik özellikleri belirlemek amacıyla uygulanmıştır.



Şekil 36. Tek eksenli basınç deneyi cihazı ve deneyin yapılışı.

Elastisite modülü deneyi

Elastisite modülü, beton yapıların kullanılabilirliğini ve performansını etkilemekte ve betonun deformasyon davranışını tanımlamaktadır (Gupta *et al.* 2016). Elastisite modülü, elastik deformasyon bölgesindeki gerilim-gerinim eğrisinin eğimiyle elde edilmektedir. Bilimsel literatüre göre iki şekilde elastisite modülü ölçülebilir; eğrinin belirli bir noktasındaki teğet tarafından verilen tanjant modülü ve koordinat sisteminin orijini ile eğrinin belirli bir noktası arasındaki düz bir çizginin eğimi ile verilen sekant modülü (Galobardes *et al.* 2014).

Bu çalışmada atık lastik katkılı SSB'nin deformasyon kapasitesindeki davranış değişikliğini incelemek için yük ve deformasyon verileri ASTM C469 (Anonymous 2022d) standardına uygun olarak Şekil 37'deki deney seti kullanımıyla elde edilip, sekant elastisite modülü hesaplanmıştır. Bu kapsamda 150 x 300 mm boyutlara sahip 28 günlük SSB silindir numuneler üretilmiş ve deneye tabi tutulmuştur. Her bir parametre için 3'er adet numune üretilerek teste tabi tutulmuştur.



Şekil 37. Elastisite modülü deney düzeneği ve deneyin yapılışı.

Yarmada çekme dayanımı deneyi

SSB karışımların yarmada çekme dayanımlarını belirlemek amacıyla 150 x 300 mm ve 100 x 200 mm boyutlarında silindir numunelere ASTM C496 (Anonymous 2017d) standardına uygun olarak Şekil 38’de gösterildiği gibi yarmada çekme dayanım testi uygulanmıştır. Her bir parametre için 3’er adet numune üretilerek teste tabi tutulmuştur. Deney, Şekil 36’da gösterilen 3000 kN yük kapasiteli cihazla gerçekleştirilmiş olup, numunelerin yarmada çekme dayanım değerleri cihaz ekranından okunarak kaydedilmiştir.

Yarmada çekme deneyi, atık lastik katkılı SSB numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmasının yanı sıra, yüksek sıcaklık etkisi öncesi ve sonrası ile donma - özünme etkisi öncesi ve sonrasında da mekanik özellikleri belirlemek amacıyla uygulanmıştır.



Şekil 38. Yarmada çekme deney düzeneği ve deneyin yapılışı.

Eğilme dayanımı deneyi

SSB karışımların eğilme dayanımlarını belirlemek amacıyla 100 x 100 x 400 mm boyutlarında kiriş numunelere ASTM C78 (Anonymous 2010b) standardına uygun olarak Şekil 39’da gösterildiği gibi dört nokta yüklemeli eğilme dayanım testi uygulanmıştır. Her bir parametre için 3’er adet numune üretilerek teste tabi tutulmuştur. Deney, Şekil 36’da gösterilen 1000 kN yük kapasiteli cihazla gerçekleştirilmiş olup, numunelerin eğilme dayanım değerleri cihaz ekranından okunan yük verileri ile aşağıdaki bağıntı kullanılarak elde edilmiştir.

$$\sigma = \frac{3}{4} \frac{FL}{bd^2}$$

Burada; σ eğilme dayanımı (MPa), F kırılma anındaki maksimum yük, L mesnetler arası mesafe (mm), b numunenin genişliğini (mm), d ise numunenin yüksekliğini (mm) ifade etmektedir.

Eğilme deneyi, atık lastik katkılı SSB numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde kullanılmasının yanı sıra, yüksek sıcaklık etkisi öncesi ve sonrasında da mekanik özellikleri belirlemek amacıyla uygulanmıştır.

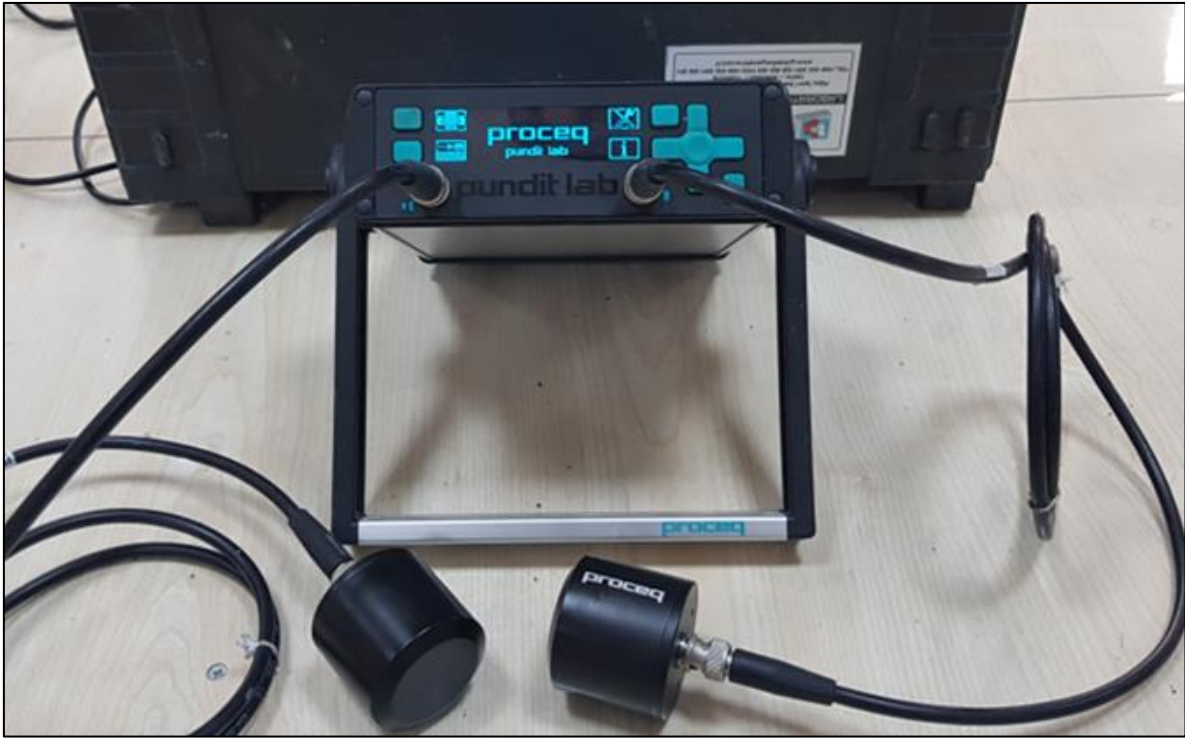


Şekil 39. Eğilme deneyi cihazı ve deneyin yapılışı.

Ultrases geçiş hızı deneyi

Ultrases geçiş hızı deneyi, beton numunelerinin üniformluluğunu değerlendirmek için içinden geçen ultrasonik darbenin hızının (UPV) ölçümünü kullanan, tahribatsız deney

yöntemidir (Khelil *et al.* 2023). Basınç ve eğilme dayanım testleri öncesi Şekil 40'ta gösterilen "Proceq Pundit lab" UPV test cihazı kullanılarak ASTM C597 (Anonymous 2023f) standardına göre farklı boyutlara sahip SSB numunelerin UPV değerleri belirlenmiştir.



Şekil 40. Ultrases geçiş hızı deney cihazı.

Ultrases geçiş hızı deneyi, Şekil 41'de gösterildiği gibi cihazın beton numunelere verici bir prob yardımıyla ses dalgaları gönderip, bu ses dalgalarını alıcı bir prob tarafından algılaması prensibine dayanmaktadır. Prob takımının betonun pürüzlü yüzeylerine düzgün temasını sağlamak amacıyla ultrasonik jel kullanılır. Ses dalgaların vericiden alıcıya geçiş süreleri ölçülerek aşağıdaki bağlantı yardımıyla SSB numunelerin ultrases geçiş hızları belirlenmiştir.

$$V = \frac{L}{t}$$

V : Ultrases geçiş hızı (km/sn)

L : Problar arası mesafe (km)

t : Ultrases geçiş süresi (sn)

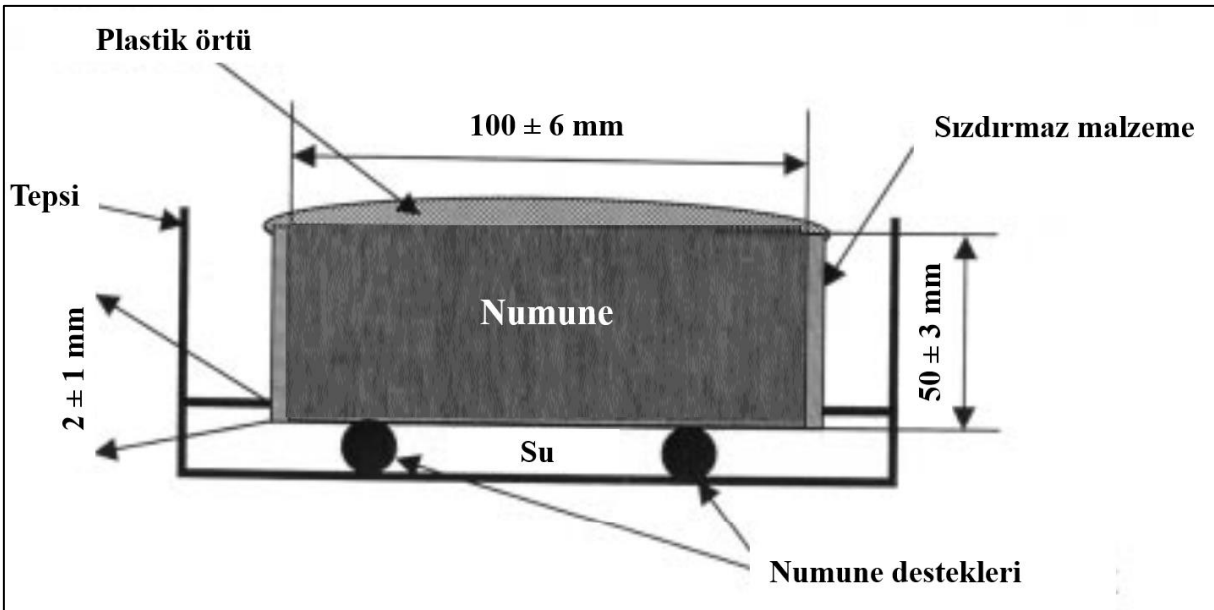


Şekil 41. Ultrases geçiş hızı deneyinin yapılışı.

Ultrases geçiş hızı deneyi, atık lastik katkılı SSB numunelerin UPV değerlerinin belirlenmesinde kullanılmasının yanı sıra, yüksek sıcaklık etkisi öncesi ve sonrası, donma-çözünme etkisi öncesi ve sonrası ve asit ve sülfat etkisi öncesi ve sonrasında da UPV değerlerini belirlemek amacıyla uygulanmıştır.

Kılcal su emme deneyi

SSB numunelerin su emme oranlarını belirlemek amacıyla, 100 x 200 mm boyutlarındaki silindir numunelerin 50 mm kalınlığında elmas testere ile kesilmesiyle elde edilen disklere, ASTM C1585 (Anonymous 2020d) standardına uygun olarak kılcal su emme testi Şekil 42'deki gibi uygulanmıştır. 100 x 50 mm boyutlarında disk haline getirilen numuneler, Şekil 43'te gösterildiği gibi sabit bir ağırlığa gelene kadar etüvde kurutulmuştur.



Şekil 42. Kılcal su emme test prosedürü (Anonymous 2020d).



Şekil 43. SSB disklerin etüvde kurutulması.

Etüvde kurutulan diskler soğuduktan sonra yan yüzeyi standartta belirtilen sızdırmaz vinil elektrikçi bantla kapatılmıştır. Disk numuneler, üst yüzeyleri gevşek bir şekilde tutturulmuş plastik bir örtü kullanılarak elastik bir bantla sabitlenip Şekil 42'deki deney öncesi hazır hale getirilmiştir. Hazır hale getirilen numunelerin başlangıç ağırlıkları 0,1 gr hassasiyete sahip hassas terazi ile belirlenmiştir. Daha sonra numune destek çubukları tepsi içesine yerleştirilerek su seviyesi 1-3 mm olana kadar tepsi su ile doldurulmuştur. Test sürecince su seviyesi, numunenin tabanından 1-3 mm yukarıda tutulmuştur. Numuneler suyla temas ettikten sonra, gravimetrik ölçümler 1 dk, 5 dk, 10 dk, 20 dk, 30 dk, 1 saat, 2 saat, 3 saat, 4 saat, 5 saat ve 6 saat süre zarfları sonunda gerçekleştirmiştir. Her ölçümde numune hızlı bir şekilde çıkarılmış, yüzeydeki ve kenarlardaki serbest suyun uzaklaştırılması için kuru bir havluyla silinmiş ve teraziye yerleştirilerek Şekil 44'teki gibi tartım tamamlanmıştır. Numuneler her tartım işleminden sonra teste devam etmek için su dolu tepsiye hemen geri konulmuştur.



Şekil 44. Kılcal su emme testi için hazırlanan SSB diskler ve testin yapılışı.

Her beton grubu için üç numune test edilmiş ve ortalama değer deneysel sonuç olarak kullanılmıştır. Numunelerin su emme değerleri, kütledeki değişimin test numunesinin kesit alanı ile suyun yoğunluğunun çarpımına bölünmesiyle aşağıdaki bağıntıdaki gibi elde edilmiştir.

$$I = \frac{m_t}{a/d}$$

I : Su emme

m_t : Numunenin t zamandaki kütle değişimi (gr)

a : Numunenin açıkta kalan yüzey alanı (mm²)

d : Suyun yoğunluğu (gr/mm³)

Numunelerin su emme oranı (kılcal geçirimlilik katsayısı), zamanın kareköküne karşı su emme değerleriyle çizilen grafiğin eğimi olarak tanımlanmaktadır. Bu eğim, su emme ile zamanın karekökü grafiğinde doğrusal regresyon analizi kullanarak elde edilmiştir.

Yüksek sıcaklık etkisi

SSB karışımların yüksek sıcaklık etkisine karşılık davranışlarını belirlemek amacıyla 150 x 150 x 150 mm boyutlarında küp, 100 x 200 mm boyutlarında silindir ve 100 x 100 x 400 mm boyutlarında kiriş numuneler Şekil 45'te gösterilen 1200 °C'ye kadar yakma kapasiteli fırında yüksek sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. SSB numuneler 200, 400 ve 600 °C olmak üzere üç farklı sıcaklıkta yakılmıştır. Kontrol SSB numuneleri ise 23 °C sıcaklıkta saklanmıştır. SSB numunelerin yüksek sıcaklığa maruz kalmadan önce ve sonrasında basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları ile birlikte UPV değerleri ve kütle değişimleri belirlenmiştir. Şekil 46'da yüksek sıcaklığa maruz kalmış SSB numunelere uygulanan bazı deneyler gösterilmiştir.



Şekil 45. Yüksek sıcaklık fırını ve numunelerin fırına yerleştirilmesi.



Şekil 46. Yakım sonrası SSB numunelere uygulanan deneyler.

Yüksek sıcaklık sonrası SSB numunelerin kalan özelliklerini belirlemek amacıyla 28 günlük kür süresinden sonra numuneler, sabit ağırlığa gelene kadar etüvde kurtulmuştur. Tamamen nemden arındırılan SSB numunelerin yüksek sıcaklık sonrası kütle değişimlerini belirlemek için başlangıç ağırlıkları 0,1 gr hassasiyetine sahip terazi kullanılarak kaydedilmiştir. Ayrıca yakım öncesi SSB numunelerin UPV değerleri de belirlenmiştir. Başlangıç ağırlıkları belirlenen numuneler, 5 °C/dk ısıtma hızına sahip fırınlarda istenilen hedef sıcaklıklara ulaştıktan sonra gerçek bir yangının ısıtma süresini simüle etmek ve numunenin homojen bir şekilde yanmasını sağlamak için 1 saat boyunca hedef sıcaklıkta sabit tutulmuştur. Sıcaklık ve zamana bağlı yakım prosedürü şematik olarak Şekil 47’de gösterilmiştir. Numunelerin mekanik özelliklerini etkileyebilecek herhangi bir termal şoku önlenmek için güç kapatılmış ve numuneler oda sıcaklığına ulaşınca kadar fırında kapalı

tutulmuştur. Numunelerin oda sıcaklığına kadar soğuması için zaman tanımak üzere fırın kapağı yavaşça açılır. Numuneler daha sonra fırından çıkarılmış ve deney zamanına kadar oda koşullarında saklanmıştır. Her beton grubu için 3'er adet numune test edilmiş ve ortalama değer deneysel sonuç olarak kullanılmıştır.

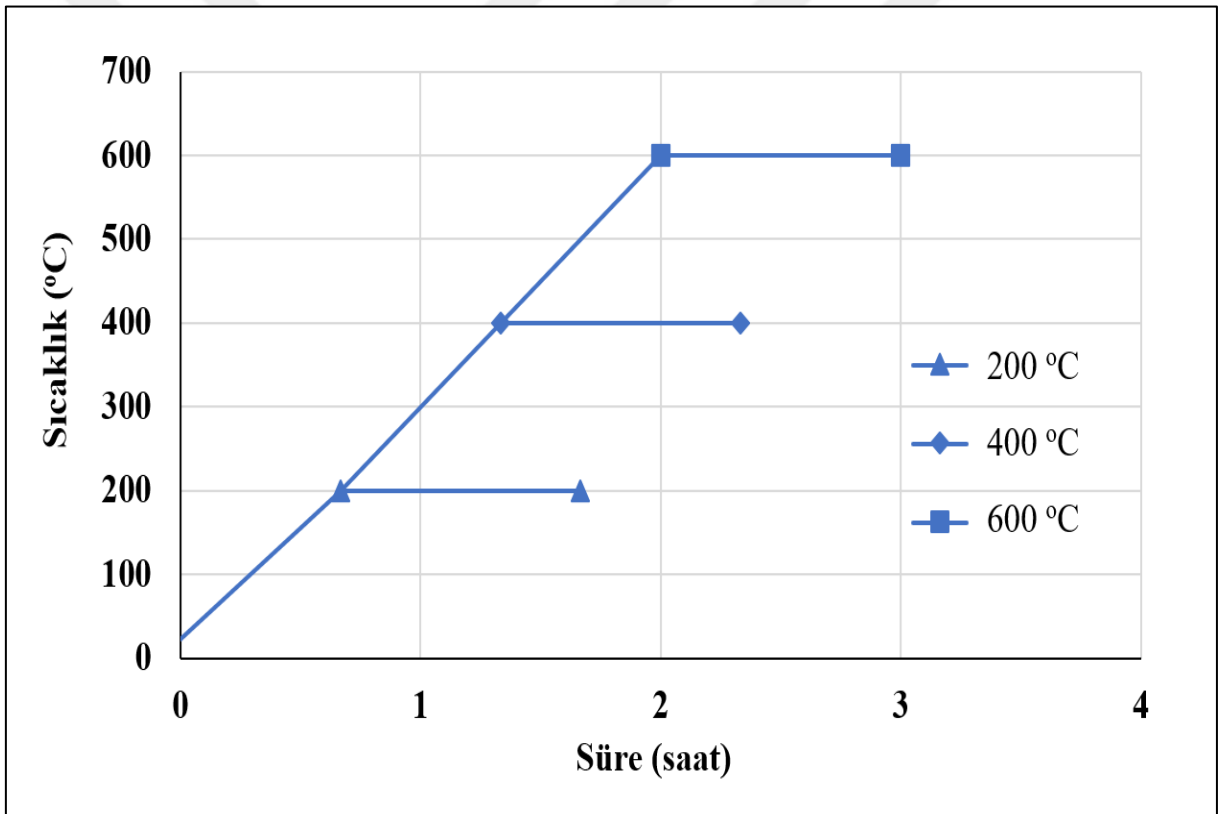
SSB numunelerde yüksek sıcaklık sonrası oluşacak kütle kaybını belirlemek için aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$K_s = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100$$

K_s : Kütle kaybı oranı

m_0 : Numunenin yüksek sıcaklık öncesi ağırlığı

m_1 : Numunenin yüksek sıcaklık sonrası ağırlığı



Şekil 47. Yakım prosedürünün şematik gösterimi.

Donma-çözünme etkisi

SSB karışımların donma-çözünme etkisine karşılık davranışlarını belirlemek amacıyla 100 x 200 mm boyutlarında silindir numuneler, 28 gün kür sonunda ASTM C 666 (Anonymous 2017e) standardına uygun olarak Şekil 48'de gösterilen donma-çözünme kabiniinde teste tabi tutulmuştur. Bu test için havada donma, suda çözünme olacak şekilde hızlı yöntem uygulanmıştır. Test kapsamında numuneler, tek bir döngü için önce -18 ± 2

°C’de 4 saat donduruldu sonrasında ise 4 ± 2 °C’deki suda 1 saat çözülmüştür. Her bir beton grubu için 300 donma-çözünme döngüsüne kadar 50 döngüde bir kütle değişimi ve UPV değerleri ölçülmüştür. Ayrıca her 50 döngünün sonunda numunelerin yüzeylerdeki değişimleri görsel olarak değerlendirilmiştir. Bununla birlikte SSB numunelerin 300 döngülük donma-çözünme öncesi ve sonrasında basınç ve yarmada çekme dayanımları ile birlikte UPV değerleri ve kütle değişimleri belirlenmiştir.



Şekil 48. Donma-çözünme kabini.

SSB numunelerin donma-çözünme sonrası kütle değişimlerini belirlemek için başlangıç ve sonrasındaki ağırlıkları 0,1 gr hassasiyetine sahip terazi kullanılarak kaydedilmiştir. Her beton grubu için üç numune test edilmiş ve ortalama değer deneysel sonuç olarak kullanılmıştır.

SSB numunelerde donma-çözünme sonrası oluşacak kütle kaybını belirlemek için aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$K_d = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100$$

K_d : Kütle kaybı oranı

m_0 : Numunenin donma-çözünme öncesi ağırlığı

m_1 : Numunenin donma-çözünme sonrası ağırlığı

Asit ve sülfat etkisi

SSB karışımların asit ve sülfat etkisine karşılık davranışlarını belirlemek amacıyla 150 x 150 x 150 mm boyutlarında küp numuneler Şekil 49'daki gibi gösterilen sülfirik asit ve sodyum sülfat çözeltilerine daldırılmış ve kapalı şekilde asit ve sülfat çözeltilerinde bekletilmiştir. SSB numunelerin asit ve sülfat etkisine maruz kalmadan önce ve sonrasında basınç dayanımları ile birlikte UPV değerleri ve kütle değişimleri belirlenmiştir. Şekil 50'de asit ve sülfat etkisine maruz kalmış SSB numunelere uygulanan bazı deneyler gösterilmiştir.



Şekil 49. Numunelerin sülfirik asit ve sodyum sülfat çözeltilerine daldırılması ve kapalı şekilde bekletilmesi.



Şekil 50. Asit ve sülfat etkisi sonrası SSB numunelere uygulanan deneyler.

Asit ve sülfat etkisi sonrası SSB numunelerin kalan özelliklerini belirlemek amacıyla 28 günlük kür süresinden sonra numuneler, sabit ağırlığa gelene kadar etüvde kurtulmuştur. Tamamen nemden arındırılan SSB numunelerin asit ve sülfat etkisi sonrası kütle değişimlerini belirlemek için yüzey temizlik işlemleri yapılmış ve başlangıç ağırlıkları 0,1 gr hassasiyetine sahip terazi kullanılarak kaydedilmiştir. Asit ve sülfat çözeltilerine daldırmadan önce ve sonrasında yapılan işlemler Şekil 51’de gösterilmiştir. Ayrıca çözeltilere daldırmadan önce SSB numunelerin UPV değerleri de belirlenmiştir. Başlangıç ağırlıkları belirlenen numuneler, ağırlıkça %5 sülfürik asit (H_2SO_4) ve ağırlıkça %5 sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltilerinde 28, 90 ve 180 gün boyunca 23 ± 2 °C ortam şartlarında kapalı kutularda bekletilmiştir. Numuneler daha sonra asit ve sülfat çözeltilerinden çıkarılmış ve sabit ağırlığa gelene kadar etüvde kurtulmuştur. Her beton grubu için 3’er adet numune test edilmiş ve ortalama değer deneysel sonuç olarak kullanılmıştır.

SSB numunelerde asit ve sülfat etkisi sonrası oluşacak kütle kaybını belirlemek için aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$K_k = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100$$

K_k : Kütle kaybı oranı

m_0 : Numunenin asit ve sülfat etkisi öncesi ağırlığı

m_1 : Numunenin asit ve sülfat etkisi sonrası ağırlığı



Şekil 51. Numunelerin asit ve sülfat çözeltilerine daldırılmadan önce ve sonra temizlenmesi, etüvde kurutulması ve tartılması.

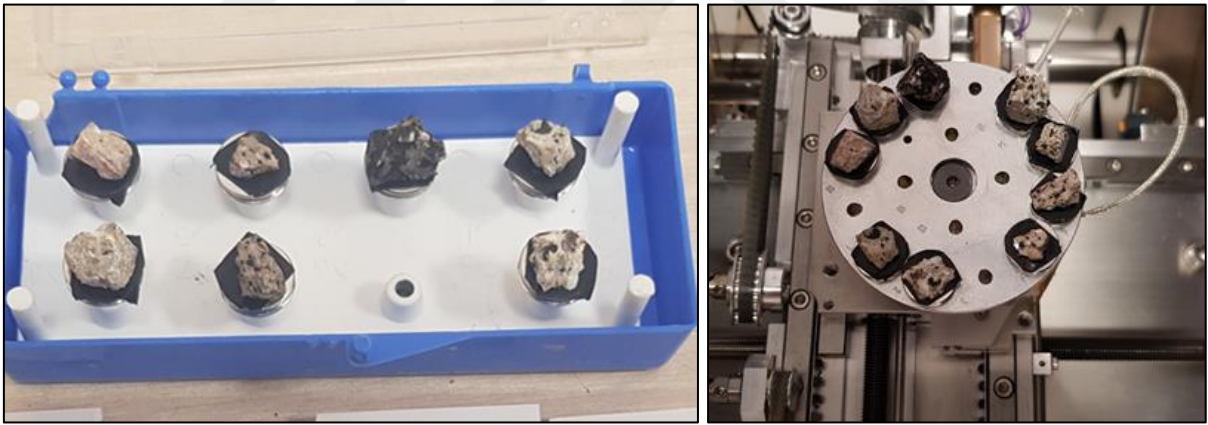
Mikroyapı analizi

SEM, elektronik olarak iletken numunelerin yüksek kaliteli görüntülerini oluşturarak çimentolu malzemenin mikro yapısını araştırmak için en güçlü tekniklerden biridir (Bangaru *et al.* 2022). Atık lastik katkılı SSB karışımların fiziksel yapısını ve bunun beton özellikleri üzerindeki etkisi incelemek amacıyla Şekil 52’de gösterilen alan emisyon taramalı “QUANTA FEG 450” taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak mikroyapı analizi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 52. Mikroyapı analizi için kullanılan taramalı elektron mikroskobu.

SEM testi için maksimum numune boyutu 10 mm'yi aşmayacak şekilde hazırlanan numuneler, Şekil 53'teki gibi cihaza yerleştirilmiştir. Atık lastik katkıli beton grubundaki numunelerin yüzeyleri, lastik ile matris arasındaki geçiş bölgesinin hasarsız kalmasını sağlarken atık lastiklerin varlığını göstermelidir.



Şekil 53. SEM numuneleri ve numunelerin cihaza yerleştirilmesi.

Mikroyapı analizi ile atık lastik katkıli SSB numunelerin beton matrisini, agrega ve matris arasındaki arayüzü ve atık lastik ve matris arasındaki arayüz incelenmiştir. Ayrıca yüksek sıcaklığa ve donma-çözünmeye maruz kalmış atık lastik katkıli SSB karışımların mikroyapı analizi taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak ele alınmıştır.

Sıcaklık dağılımı ve sonlu elemanlar analizi

Atık lastik katkıli SSB karışımların değişen dış çevre ortam sıcaklığı altındaki davranışlarını incelemek amacıyla üretilen 200 x 1000 x 1000 mm boyutlarında plak numunelerden yaz ve kış mevsimlerinin sıcaklık değerlerinin pik olduğu temmuz-ağustos ve

ocak-şubat aylarında Şekil 54'te gösterildiği gibi sıcaklık dağılım verileri veri kaydedici vasıtasıyla toplanmıştır.



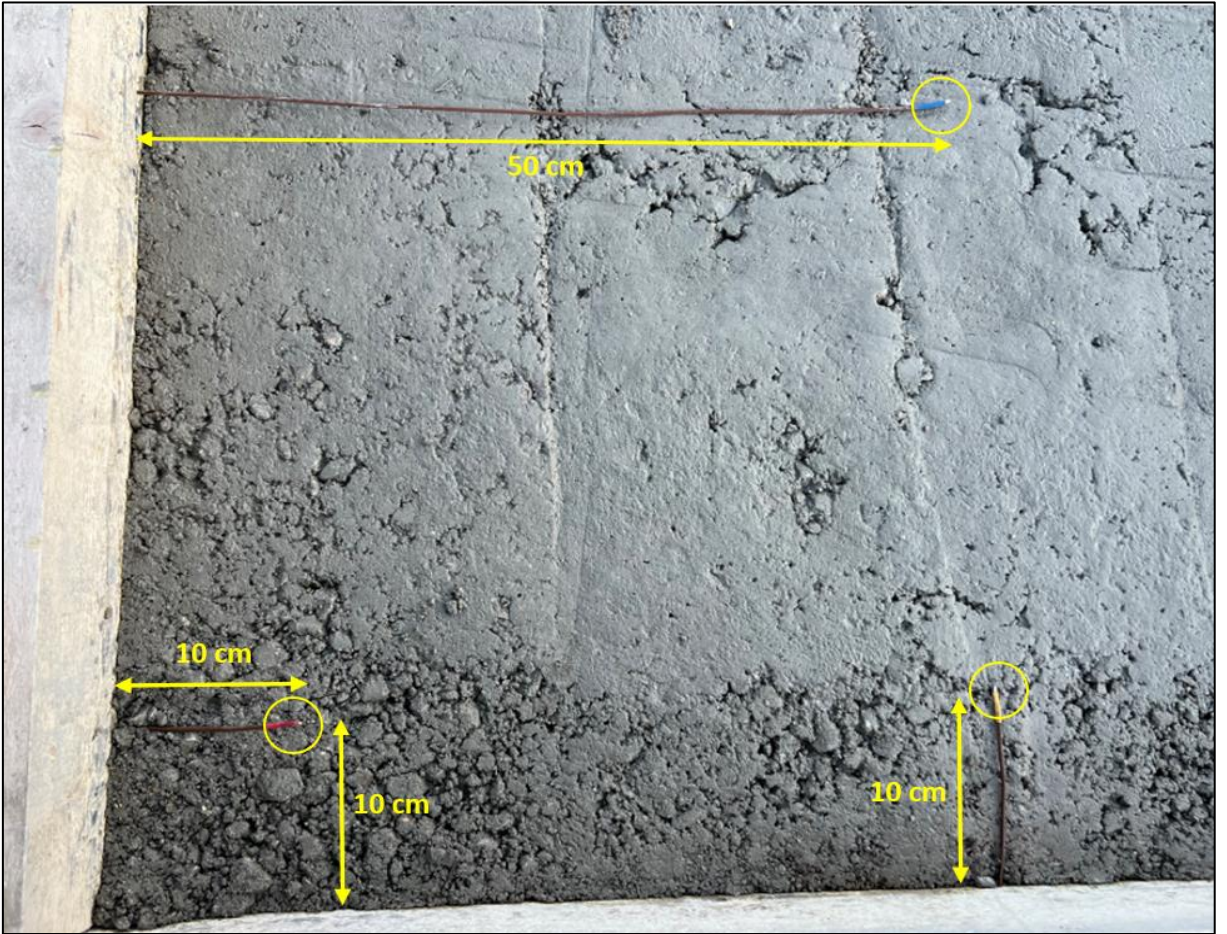
Şekil 54. SSB plaklardan yaz ve kış aylarında sıcaklık verilerinin toplanması.

Sıcaklık değerlerini ölçmek ve kaydetmek amacıyla -30 ile 300 °C aralığında ölçüm yapabilen, teflon kaplamalı farklı uzunluklarda T tipi termokupllar ve Şekil 55'te gösterilen 60 kanal kapasiteli “Graphtec GL840 M” çoklu girişli izole giriş çok kanallı sıcaklık veri kaydedicisi kullanılmıştır. Termokupllara, SSB içerisine yerleştirilmeden önce doğru değerlerin elde edilmesi için belirli sabit sıcaklık aralıklarına sahip su havuzu içerisinde Şekil 55'te gibi kalibrasyon işlemi uygulanmıştır.



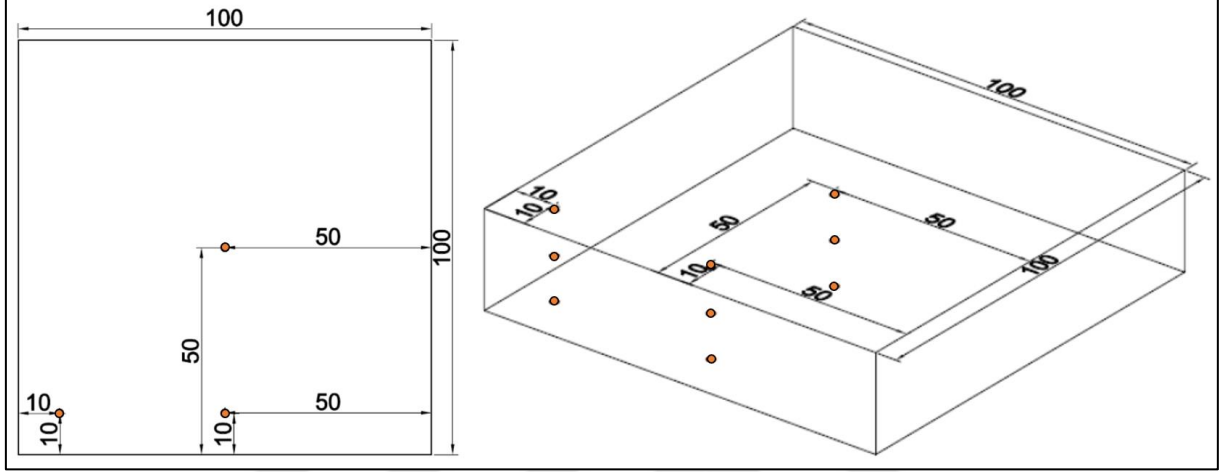
Şekil 55. Sıcaklık veri kaydedicisi ve termokuplların kalibrasyonu.

Termokupllar, sıcaklık dağılımının etkisini incelemek amacıyla üretilen plakların köşe, kenar ve orta noktalarına Şekil 56'daki gibi üretim aşamasında sıcaklık değerlerini ölçmek için yerleştirilmiştir. SSB plakların köşe ve kenar noktalarına yerleştirilen termokupllar kenardan 10 cm içeri, orta noktaya konan termokupllar ise kenardan 50 cm içeri konumlandırılmıştır.




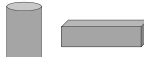













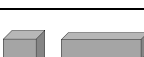

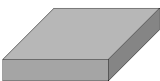



Şekil 56. Termokuplların SSB karışımlara yerleştirilmesi.

Termokupllar, ölçüm alınacak noktalarda (köşe, kenar ve orta) taban, orta ve üst olmak üzere 3 tabakada yerleştirilmiştir. Termokuplların SSB karışımları içerisinde yerleşimi detaylı şekilde Şekil 57’de gösterilmiştir. Sıcaklık ölçümleri temmuz-ağustos ve ocak-şubat aylarında her gün her 10 dakikada bir olacak şekilde kaydedilmiştir. Elde edilen yaz ve kış aylarındaki sıcaklık verileri kullanılarak, 3B yazılım paketi ANSYS programı ile modellemeler yapılmıştır. Yapılan bu modellemeler ile atık lastiklerin SSB yollarda sıcaklık değişiminden kaynaklı oluşan gerilmeler üzerine etkileri incelenmiştir.



Şekil 57. Termokuplların SSB plaklar içerisinde konumlandırıldığı yerler.

	Deneyin Adı	Deney Standartı	Numune Şekli	Numune Boyutları	Herbir Parametre için Hazırlanan Numune Sayısı	Gün parametresi	Karışım Oranı*	Toplam Numune Sayısı
Fiziksel ve Mekanik Özellikler	Basınç Dayanımı	ASTM C39		150x300 mm	3	7, 28 ve 90 gün	7 adet	63 adet
	Eğilme Deneyi	ASTM C78		100x100x400 mm	3	7, 28 ve 90 gün	7 adet	63 adet
	Yarmada Çekme Deneyi	ASTM C 496		150x300 mm	3	7, 28 ve 90 gün	7 adet	63 adet
	UPV	ASTM C597		150x300 mm 100x100x400 mm	3	7, 28 ve 90 gün	7 adet	63 adet
	Elastite Modülü	ASTM C469		150x300 mm	3	28 gün	7 adet	21 adet
	Kılcılık	ASTM C1585		100x50 mm	3	28 ve 90 gün	7 adet	42 adet
	Taze Birim Ağırlık	ASTM C138		150x150x150 mm	3	—	7 adet	21 adet
Asit ve Sülfat Direnci	Basınç Dayanımı	ASTM C39		150x150x150 mm	3	28 gün + 28, 90 ve 180 gün (Asit ve Sülfat)	7 adet	147 adet
	UPV	ASTM C597		150x150x150 mm	3	28 gün + 28, 90 ve 180 gün (Asit ve Sülfat)	7 adet	126 adet
	Kütle Değişimi	—		150x150x150 mm	3	28 gün + 28, 90 ve 180 gün (Asit ve Sülfat)	7 adet	147 adet
Donma Çözünme Direnci	Basınç Dayanımı	ASTM C39		100 x 200 mm	3	28 gün ve 28 gün + 50, 100, 150, 200, 250 ve 300 döngü	7 adet	42 adet
	Yarmada Çekme Deneyi	ASTM C78		100 x 200 mm	3	28 gün ve 28 gün + 50, 100, 150, 200, 250 ve 300 döngü	7 adet	42 adet
	UPV	ASTM C597		100 x 200 mm	3	28 gün ve 28 gün + 50, 100, 150, 200, 250 ve 300 döngü	7 adet	42 adet
	Kütle Değişimi	—		100x200 mm	3	28 gün ve 28 gün + 50, 100, 150, 200, 250 ve 300 döngü	7 adet	42 adet
Yüksek Sıcaklık Direnci	Basınç Dayanımı	ASTM C39		150x150x150 mm	3	28 gün + 23, 200, 400 ve 600 °C	7 adet	84 adet
	Eğilme Deneyi	ASTM C78		100x100x400 mm	3	28 gün + 23, 200, 400 ve 600 °C	7 adet	84 adet
	Yarmada Çekme Deneyi	ASTM C 496		100x200 mm	3	28 gün + 23, 200, 400 ve 600 °C	7 adet	84 adet
	UPV	ASTM C597		150x150x150 mm 100x100x400 mm	3	28 gün + 23, 200, 400 ve 600 °C	7 adet	84 adet
	Kütle Değişimi	—		150x150x150 mm	3	28 gün + 23, 200, 400 ve 600 °C	7 adet	84 adet
Isı İletkenlik	Sıcaklık Dağılımı	—		1000x1000x200mm	1	300 gün	5 adet	5 adet
	Isıl İletkenlik Katsayısı	ASTM C177		100 x 50 mm Disk	2	28 gün	5 adet	10 adet

*7 adet → (%0-%2,5-%5-%7,5-%10-%20-%30) 5 adet → (%0-%2,5-%5-%10-%20)

Şekil 58. Çalışmada yapılan deney özetleri.

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

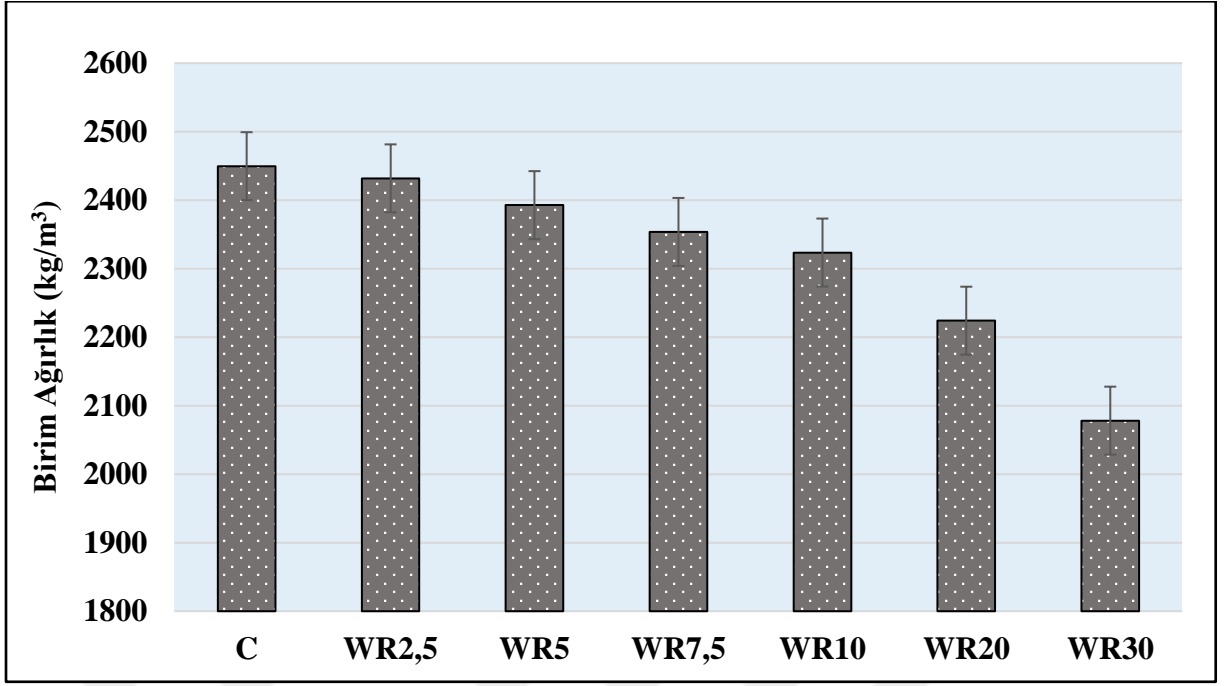
Taze Beton Birim Ağırlık Deneyi Sonuçları

Çalışma kapsamında 150 x 150 x 150 mm boyutlarında üretimi yapılan SSB numunelerin taze birim ağırlıkları ASTM C138 (Anonymous 2023c) standardına göre belirlenmiştir. 0,1 gr hassasiyete sahip hassas terazi ile tartılarak elde edilen birim ağırlık deney sonuçları Tablo 8 ve Şekil 59’de verilmiştir.

Tablo 8. Birim Ağırlık Deney Sonuçları

Karışım	Atık Lastik İçeriği	Taze beton birim ağırlığı (kg/m ³)
C	%0	2449,64
WR2,5	%2,5	2431,84
WR5	%5	2392,77
WR7,5	%7,5	2353,63
WR10	%10	2323,54
WR20	%20	2224,10
WR30	%30	2078,18

Birim ağırlık deney sonuçları incelendiğinde SSB karışımlardaki atık lastik içeriğinin artmasıyla birim ağırlıklarda düzenli bir azalış görülmektedir. Atık lastik içermeyen kontrol karışımlarla (C) kıyaslandığında, %30 atık lastik ikame edilmiş sertleşmiş SSB karışımların (WR30) birim ağırlıklarında yaklaşık 2449 kg/m³’ten 2078 kg/m³’e ciddi bir düşüş meydana gelmiştir. Taze birim ağırlıkları birlikte değerlendirildiğinde kontrol karışımına kıyasla WR2,5, WR5, WR7,5, WR10, WR20 ve WR30 karışımları için yaklaşık olarak sırasıyla %0,80, %2,40, %4,0, %5,30, %9,40 ve %15,25 azalış görülmektedir. Bu azalışların ana nedeni atık lastiklerin birim ağırladıklarının gerek ince gerekse de kaba agregalardan çok daha düşük olması olarak gösterilebilir. Buna üretim sırasında sıkıştırma sonucu meydana gelebilecek boşlukların atık lastik ikamesinin artmasıyla daha da çoğalması sonucu eklenebilir.



Şekil 59. SSB birim ağırlıklarının atık lastik oranına göre değişimi.

Beton karışımlara farklı oranlarda atık lastik eklenmesiyle birim ağırlıkta düzenli olarak azalma elde edilen birçok çalışma yapılmıştır (Corinaldesi *et al.* 2011; Li *et al.* 2016; Bisht and Ramana. 2017). Meddah *et al.* (2014) SSB karışımlara %30 oranında kauçuk ekleyerek birim ağırlıkta %5,8'lik düşüş gözlemlemiştir. Benzer şekilde, Mohammed and Adamu (2018) da SSB karışımlara %30 oranında kırıntı kauçuk eklediğinde %6,45 daha düşük yoğunlukta SSB karışım elde etmişlerdir. Yapılan çalışmalara kıyasla bu çalışmada daha fazla oranda (%15,25) birim ağırlık kaybı elde edilmiştir. Bunun sebebi literatürdeki çalışmalarda atık lastik sadece ince veya kaba agrega yerine kullanılması olarak gösterilebilir. Bu çalışmada atık lastik hem ince hem de kaba agrega yerine kullanıldığı için daha fazla miktarda kullanılmış bu da daha düşük birim ağırlığa sahip SSB elde edilmesi sağlamıştır. Böylece atık lastik ikamesiyle önemli oranda daha hafif SSB karışımlar elde edilebilir ve hafif yapılarda da kullanılabilirliği ortaya konmuştur.

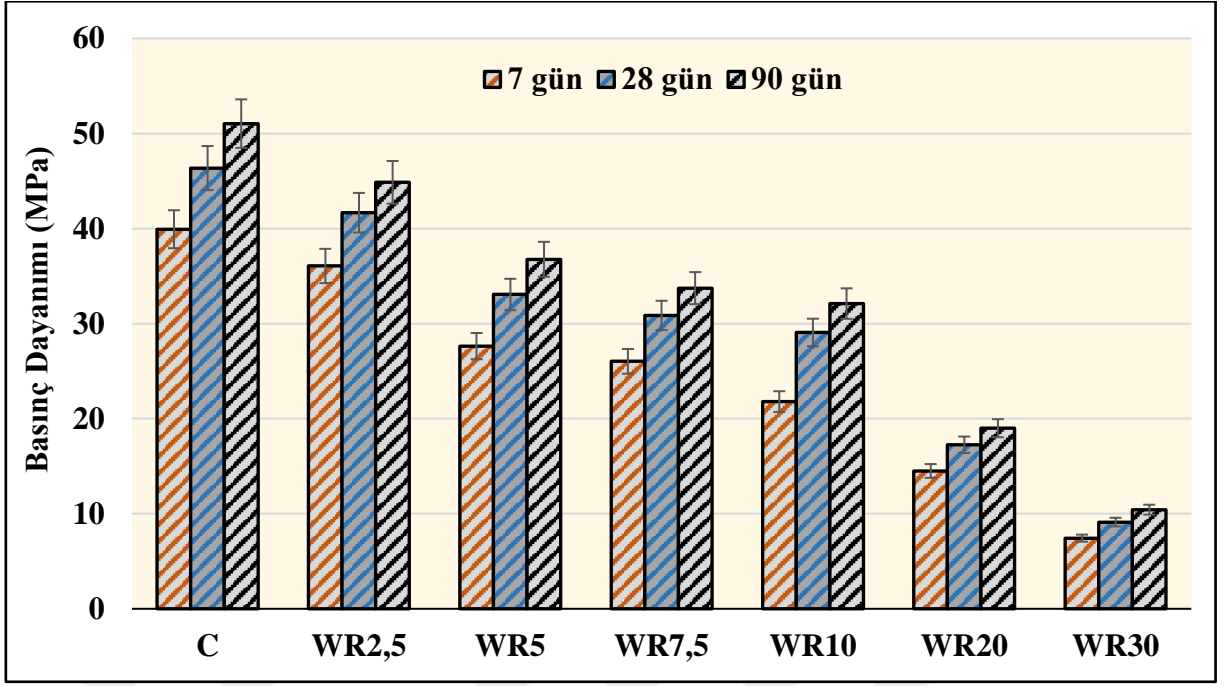
Basınç Dayanımı Deneyi Sonuçları

Çalışma kapsamında 150 x 300 mm boyutlarında üretimi yapılan SSB numunelerin basınç dayanımları ASTM C39 (Anonymous 2023d) standardına göre belirlenmiştir. 7, 28 ve 90 günlük kür uygulama sonrası numunelerin basınç dayanımı deney sonuçları Tablo 9 ve Şekil 60'de verilmiştir. Elde edilen basınç dayanım değerleri, her beton grubu için üç numunenin basınç dayanımlarının ortalamasıdır.

Tablo 9. SSB Numunelerin Basınç Dayanımı Deneş Sonuçları

Karışım	Atık Lastik İçeriği	Basınç Dayanımları (MPa)		
		7 gün	28 gün	90 gün
C	%0	39,93	46,37	51,04
WR2,5	%2,5	36,07	41,67	44,87
WR5	%5	27,63	33,07	36,77
WR7,5	%7,5	26,03	30,87	33,73
WR10	%10	21,80	29,07	32,11
WR20	%20	14,50	17,26	19,00
WR30	%30	7,43	9,12	10,43

Basınç dayanımı deneş sonuçları incelendiğinde atık lastik ikame oranının artmasıyla basınç dayanımlarında istikrarlı bir azalma olduğu belirlenmiştir. Referans alınan kontrol karışımlarının 7, 28 ve 90 günlük kür süresi sonrası dayanımları sırasıyla 39,9, 46,4 ve 51,0 MPa'a ulaşmıştır. 7, 28 ve 90 gün sonrası %30 atık lastik katkılı (WR30) SSB numunelerin dayanımları sırasıyla 7,4, 9,1 ve 10,4 MPa'a kadar gerilemiştir. Kontrol karışımlarla kıyaslandığında ince ve kaba agrega yerine %2.5, %5, %7.5, %10, %20 ve %30 oranlarında atık lastik kullanılan SSB karışımların 28 günlük dayanımları sırasıyla yaklaşık olarak %10, %28, %33, %37, %62 ve %81 azalış göstermiştir. Amerika Beton Enstitüsü (American Concrete Institute - ACI), SSB kaplamalarda, yüzey kaplamalarında kullanımı için minimum 27,6 MPa (4000 psi) basınç dayanımı önermektedir (Anonymous 2001). Elde edilen basınç dayanım sonuçlarıyla birlikte, %10 atık lastik içeriğinin SSB kaplamalarda kullanımı mümkün kılınmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki, atık lastik kullanımı, SSB karışımlarda basınç dayanımında önemli dayanım kaybına neden olmuştur.



Şekil 60. SSB basınç dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.

Atık lastik katkıli SSB karışımların mukavemetindeki bu azalmanın olası nedenlerinden biri, atık lastik ile çimento harcı matrisi arasındaki yetersiz yapışmadan kaynaklanabilir. Bu durum da atık lastiğin hidrofobik davranışı, daha düşük hidrolik iletkenliği ve lastik parçacıklarının pürüzsüz yüzeyinden kaynaklı bir savunmasız bir Arayüzey Geçiş Bölgesi (Interfacial Transition Zone - ITZ) oluşturulmasını sağlar. Bu bölge atık lastik parçacığı ile çimento hamuru arasında zayıf bir kimyasal bağ oluşturur ve böylece lastik parçacıklarına komşu olarak daha zayıf bir çimento hamuru meydana getirir (Miah *et al.* 2023; Khern *et al.* 2020; Miah *et al.* 2023). Böylece atık lastik içeriği artması sonucu meydana gelen bu zayıf bağların etkisi, yük altında dayanım kaybına sebep olabilmektedir. Yapılan çalışmalarda, (Zrar *et al.* 2023; Ma *et al.* 2023a; Reda Taha *et al.* 2008; Ma *et al.* 2023b) betondaki atık lastik miktarı arttıkça beton oluşan boşlukların ve buna bağlı olarak meydana gelen zayıf bağların dayanımları olumsuz etkiledikleri belirtilmiştir. Ghaleh *et al.* (2022) betonda ince agreganın kırıntı kauçuğuyla değiştirmiş ve kırıntı kauçuğun %30'a kadar artırılmasıyla basınç dayanımındaki azalmanın %60'a kadar çıktığını belirlemiştir. Meddah *et al.* (2014) SSB kaplamalarda agrega yerine %30'a kadar oranlarda kauçuk parçaları eklemiş ve kontrol betonuyla kıyaslandığında %30 kauçuk katkıli karışımlarda yaklaşık olarak %50 oranında dayanım kaybı gözlemlemişlerdir.



Şekil 61. SSB numunelerinin basınç dayanımı testi sonrası kırılma yüzeyleri.

Tek eksenli basınç dayanım testine maruz kalan SSB numunelerinin kırılma yüzeyleri Şekil 61’de gösterilmektedir. Atık lastik içermeyen kontrol SSB numuneleriyle kıyaslandığında, atık lastik içeren karışımlarda atık lastik oranı arttıkça daha az deformasyonlar gözlemlenmiştir. Kontrol numunelerinde (C), parçalanma ve kopmalar meydana gelirken, özellikle de yüksek oranda atık lastik içeren numunelerde bu durum oluşmamıştır. Kazmi *et al.* (2021) ile birlikte Khaloo *et al.* (2008) geçmiş çalışmalarında, kırıntı kauçuk içeren numunelerinde, çatlakların uzunluğunda, sayısında ve genişliğinde bir azalma meydana geldiğini belirtmişlerdir. Buna karşın kauçuk içermeyen sade betonlarda, basınç testi sırasında betonun topraklarının ayrıldığı ve hasar belirtilerinin yayılmasının ani ve yoğun olduğu gözlemlenmiştir.

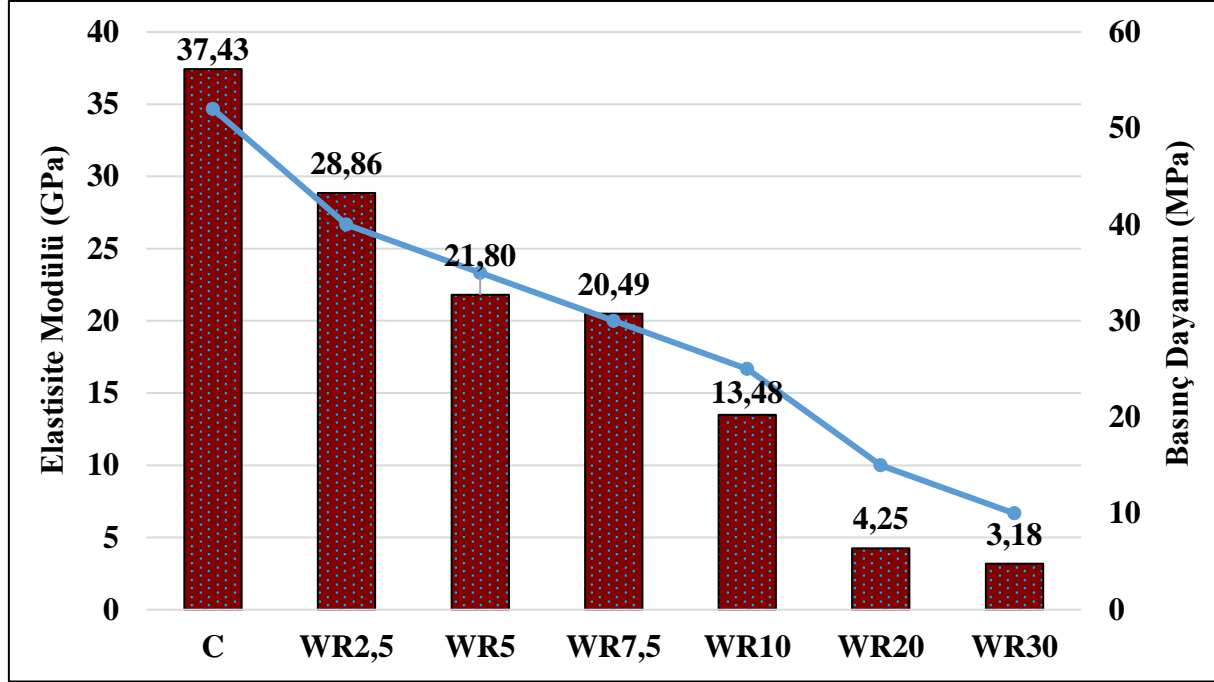
Elastisite Modülü Deneyi Sonuçları

Atık lastik içeren ve içermeyen 28 günlük kür süresine sahip 150 x 300 mm boyutlarında üretilen SSB karışımların ASTM C469 (Anonymous 2022d) standardına uygun olarak belirlenen elastisite modülü sonuçları Tablo 10 ve Şekil 62’de verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde, atık lastik içeren SSB karışımların kontrol betonuna göre daha az rijitliğe sahip olduğu ve atık lastik içeriğinin artmasıyla birlikte elastisite modülünün azaldığı anlaşılmaktadır. Kontrol numunelerin elastisite modülü ortalama olarak yaklaşık 38 GPa bulunmuş iken, toplam agrega hacmindeki atık lastik içeriğinin %30’a çıkarılmasıyla yaklaşık 3 GPa’ya kadar düşmüştür. Bu da elastisite modülünde yaklaşık olarak %91’lik bir azalmaya işaret etmiştir. %2,5, %5, %7,5, %10 ve %20 atık lastik katkılı SSB karışımların elastisite modülleri, kontrol karışımına kıyasla sırasıyla %23, %42, %45, %64 ve %89 azalmıştır. Benzer sonuçlar daha önce yapılan çalışmalarda da gözlemlenmiştir. Gupta *et al.* (2016) farklı s/ç oranlarına sahip beton karışımlarda %25 lastik lif ilavesiyle birlikte yaklaşık olarak %35’e kadar daha düşük elastisite modülü elde etmişlerdir. Benzer şekilde Güneysi *et al.* (2004) da

%50 kauçuk agrega içeriğine sahip betonların elastisite modüllerinde, kontrol numunelere kıyasla ortalama olarak %83'lük bir kayıp not etmişlerdir.

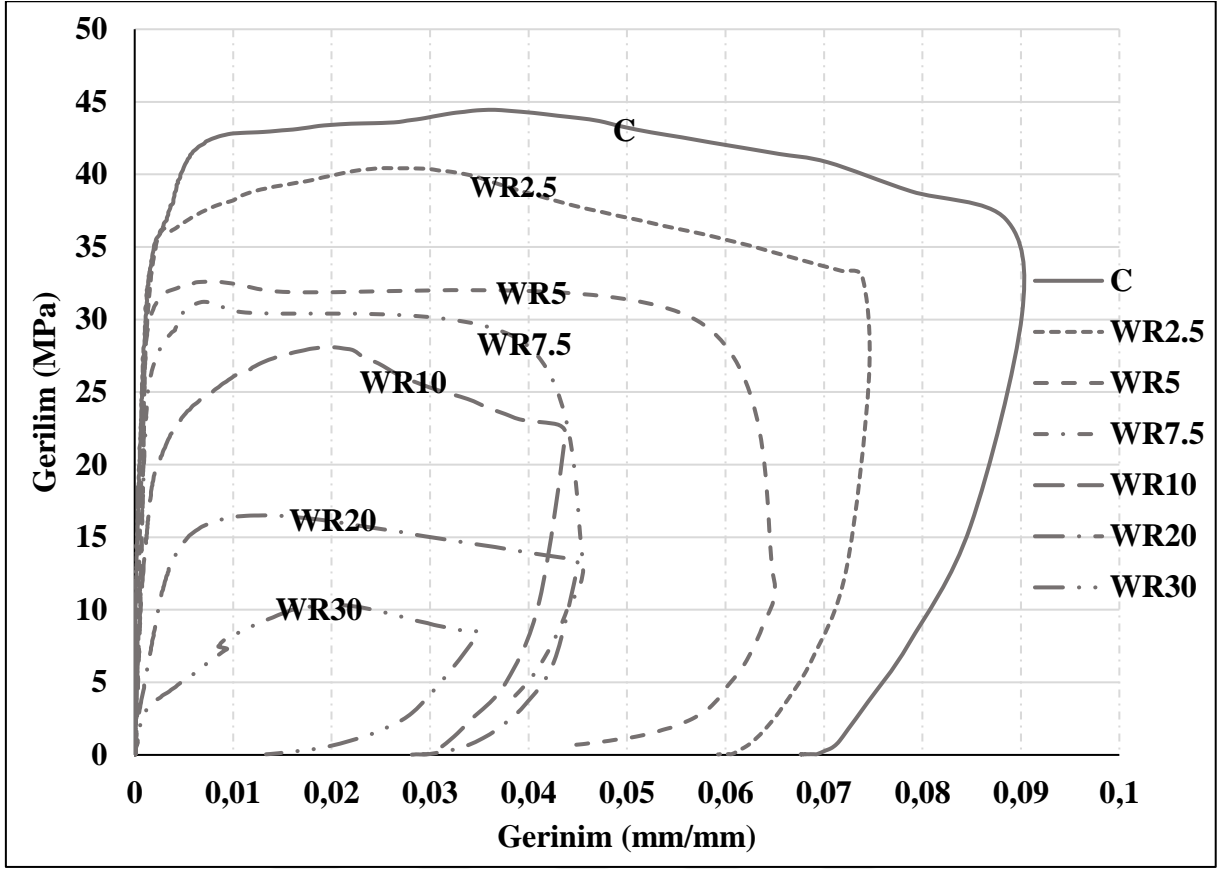
Tablo 10. SSB Numunelerin Elastisite Modülü Deney Sonuçları

Karışım	C	WR2,5	WR5	WR7,5	WR10	WR20	WR30
Elastisite Modülü (GPa)	37,43	28,86	21,80	20,49	13,48	4,25	3,18



Şekil 62. SSB numunelerinin elastisite modüllerinin atık lastik oranına göre değişimi.

Silindirik test numunelerinin basınç gerilme-gerinim davranışları Şekil 63'te eğrilerle sunulmaktadır. Şekilden anlaşılacağı üzere karışımların tepe öncesi davranışları benzer özellik göstermiştir. Atık lastik içermeyen kontrol karışımlarında ve düşük oranlarda atık lastik içeren karışımlarda, sertliğin daha fazla ve eğriliğin daha az olduğu belirlenmiştir. Bu eğrilik %10 atık lastik içeriğine sahip karışımlardan itibaren daha net belirginleşmiştir. Gerilme-gerinim eğrileri incelendiğinde, Khaloo *et al.* (2008) çalışmalarıyla benzer şekilde atık lastikli SSB numuneleri, kontrol SSB numunelerine kıyasla daha büyük deformasyonlara maruz kalmıştır. Sonuçlar dikkate alındığında, atık lastik içeriğinin betonun davranışını önemli ölçüde etkilediği sonucuna varılmıştır.



Şekil 63. SSB numunelerinin gerilim-gerinim eğrileri.

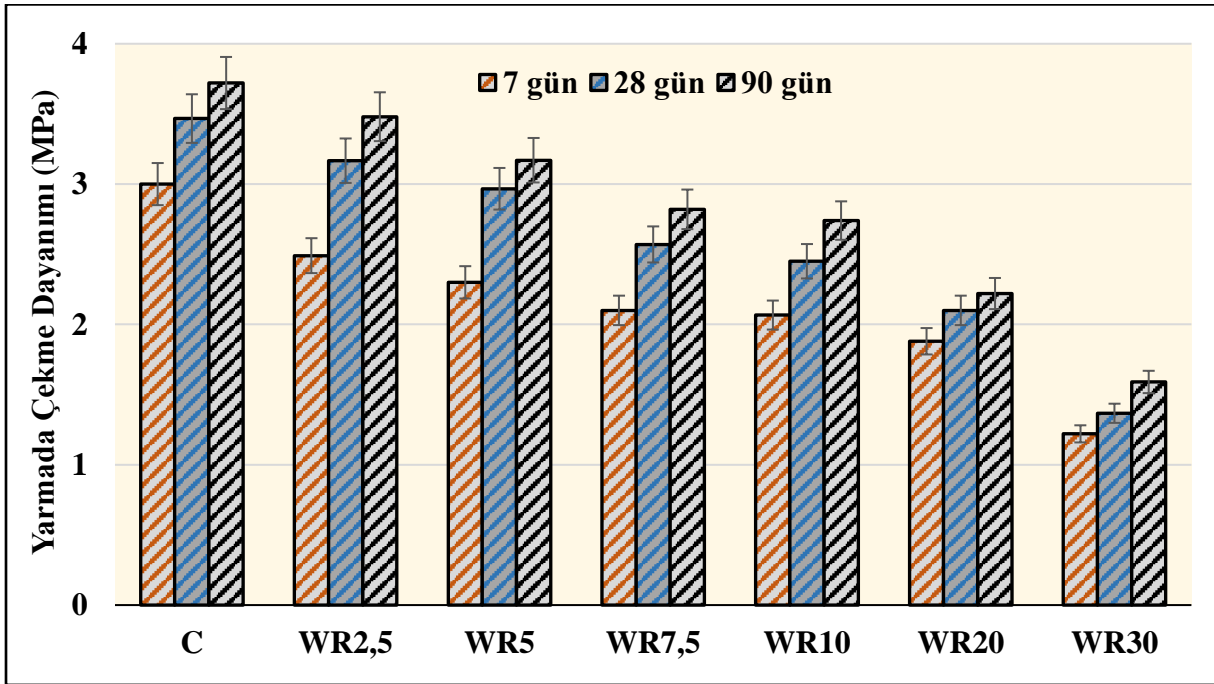
Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi Sonuçları

Çalışma kapsamında 150 x 300 mm boyutlarında üretimi yapılan SSB numunelerin yarmada çekme dayanımları ASTM C496 (Anonymous 2017d) standardına göre belirlenmiştir. 7, 28 ve 90 günlük kür uygulama sonrası numunelerin yarmada çekme dayanımı deney sonuçları Tablo 11 ve Şekil 64’te verilmiştir. Elde edilen yarmada çekme dayanım değerleri, her beton grubu için üç numunenin dayanımlarının ortalamasıdır.

Tablo 11. SSB Numunelerin Yarmada Çekme Dayanımı Deney Sonuçları

Karışım	Atık Lastik İçeriği	Yarmada Çekme Dayanımları (MPa)		
		7 gün	28 gün	90 gün
C	%0	3,00	3,47	3,72
WR2,5	%2,5	2,49	3,17	3,48
WR5	%5	2,30	2,97	3,17
WR7,5	%7,5	2,10	2,57	2,82
WR10	%10	2,07	2,45	2,74
WR20	%20	1,88	2,10	2,22
WR30	%30	1,22	1,37	1,59

Sonuçlar, atık lastiğin ikame seviyesi arttıkça yarmada çekme dayanımının kademeli olarak azaldığını göstermiştir. Atık lastik katkısız kontrol karışımlarla kıyaslandığında, %2,5, %5, %7,5, %10, %20 ve %30 atık lastik ile üretilen 28 günlük karışımlar için yarmada çekme dayanımlarında yaklaşık olarak sırasıyla %8, %14, %25, %29, %39 ve %60 oranlarında azalma meydana gelmiştir. Sonuçlar göstermiştir ki, atık lastik kullanımı, diğer dayanımlarda olduğu gibi SSB karışımlarda yarmada çekme dayanımında da önemli dayanım kayıplarına neden olmuştur. Atık lastik oranının artması sonucu yarmada çekme dayanımında azalma, lastik parçacıkları ile çimento matrisi arasındaki zayıf bağın mikro çatlak oluşumuna ve ani dayanım kaybına neden olmasından kaynaklanmaktadır (Thomas *et al.* 2016). Literatürde atık lastik agregası ile üretilen betonların yarmada çekme dayanımlarında benzer azalmalar gözlemlenmiştir (Mhaya *et al.* 2020; Gesoğlu *et al.* 2014a). Miah *et al.* (2023), %10, %20, %30, %40, %50 ve %75 oranlarında atık lastik ince agrega ile üretilen betonların 28 günde gerçekleştirilen yarmada çekme dayanımları, sırasıyla 12 %, %31, %40, %47, %54 ve %59 oranında dayanım kaybı gözlemlenmişlerdir. Zrar *et al.* (2023), atık lastiğin ikame seviyesi arttıkça yarmada çekme dayanımının kademeli olarak azaldığını belirlemişlerdir. %40' a kadar atık lastik ikamesinde, yarmada çekme dayanımında %41 dayanım kaybı gerçekleşmiştir. Bunların aksine Muhammed and Adamu (2018), %20-30 oranında kaba atık lastik kullanımının yarmada çekme dayanımı yaklaşık %15-30 oranında arttırdığını bulmuştur.



Şekil 64. SSB yarmada çekme dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.

Yarmada çekme testinden sonra tüm SSB numunelerinin kırılma yüzeyleri Şekil 65'te gösterilmektedir. Atık lastik katılmayan kontrol numunelerinde nihai yük sonunda ani patlama

şeklinde yarıma meydana gelirken, bu durum atık lastik içeriği arttıkça yerini, ezilme şeklinde oluşan sünek bir davranışa bırakmıştır. Kırılma yüzeyleri incelendiğinde kontrol numunelerinde yarıma kolay ve düzgün şekilde meydana gelirken atık lastik içeriği fazla olan numunelerde yarıma büyük çatlak şekilde oluşmuş ve kopma meydana gelmemiştir. Bu numuneler bir ayırma aparatı ile güçlkle yarılmış ve şekilden de anlaşılacağı üzere kırılma yüzeylerinde düzensizlikler ve çatlaklar saptanmıştır.



Şekil 65. SSB numunelerinin yarmada çekme dayanımı testi sonrası kırılma yüzeyleri.

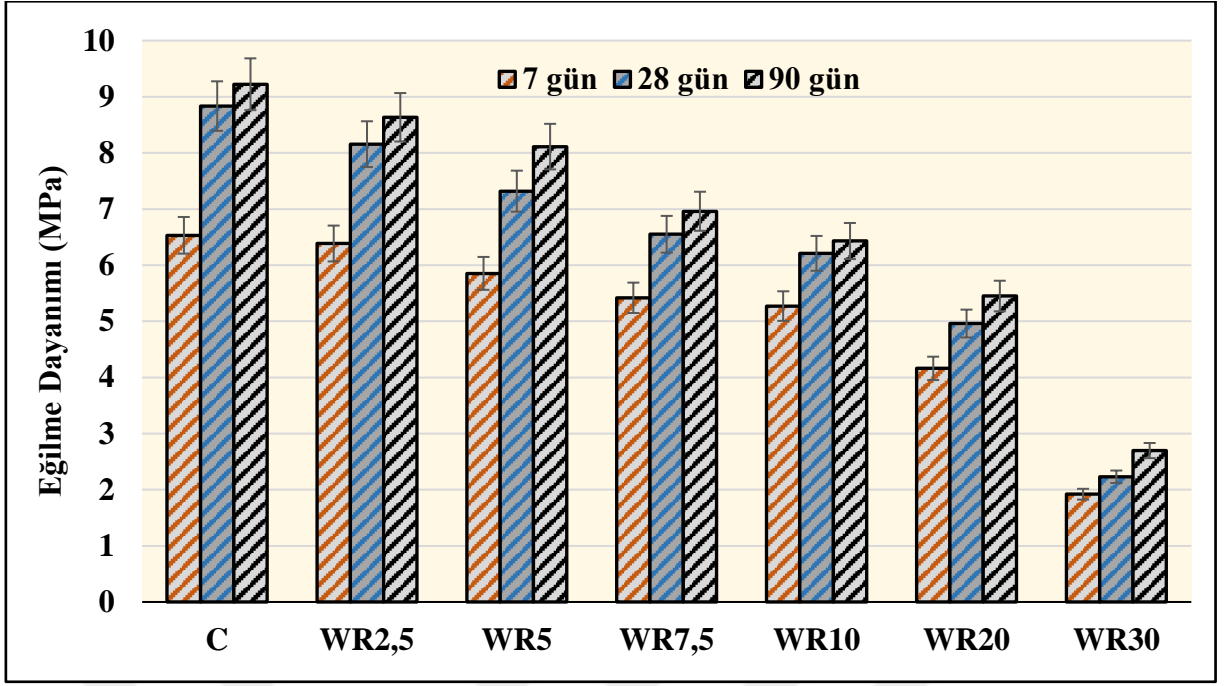
Eğilme Dayanımı Deneyi Sonuçları

Çalışma kapsamında 100 x 100 x 400 mm boyutlarında üretimi yapılan SSB numunelerin eğilme dayanımları ASTM C78 (Anonymous 2010b) standardına göre dört nokta yüklemeli eğilme dayanım testi uygulanarak belirlenmiştir. 7, 28 ve 90 günlük kür uygulama sonrası numunelerin eğilme dayanımı deney sonuçları Tablo 12 ve Şekil 66'da verilmiştir. Elde edilen eğilme dayanım değerleri, her beton grubu için üç numunenin eğilme dayanımlarının ortalamasıdır.

Tablo 12. SSB Numunelerin Eğilme Dayanımı Deney Sonuçları

Karışım	Atık Lastik İçeriği	Eğilme Dayanımları (MPa)		
		7 gün	28 gün	90 gün
C	%0	6,53	8,83	9,22
WR2,5	%2,5	6,39	8,16	8,63
WR5	%5	5,85	7,32	8,11
WR7,5	%7,5	5,42	6,55	6,96
WR10	%10	5,27	6,21	6,43
WR20	%20	4,16	4,96	5,45
WR30	%30	1,92	2,23	2,70

Referans alınan kontrol karışımlarının 7, 28 ve 90 günlük kür süresi sonrası eğilme dayanımları sırasıyla 6,5, 8,8 ve 9,2 MPa' a ulaşmıştır. 7, 28 ve 90 gün sonrası %30 atık lastik katkılı (WR30) SSB numunelerin dayanımları sırasıyla 1,9, 2,2 ve 2,7 MPa'a kadar gerilemiştir. Kontrol karışımlarla kıyaslandığında ince ve kaba agrega yerine %2,5, %5, %7,5, %10, %20 ve %30 oranlarında atık lastik kullanılan SSB karışımların 28 günlük eğilme dayanımları yaklaşık olarak sırasıyla %7, %17, %25, %29, %43 ve %74 azalış göstermiştir. Amerika Beton Enstitüsü (American Concrete Institute - ACI), SSB kaplamalarda, yüzey kaplamalarında kullanımı için minimum 4-5 MPa (600-700 psi) eğilme dayanımı önermektedir (Anonymous 2009). Ayrıca Amerikan Beton Kaplama Birliği (American Concrete Pavement Association - ACPA) SSB'nin eğilme dayanımının karışım tasarımına bağlı olarak, genellikle 3,5 ila 7 MPa (500 ila 1.000 psi) arasında değiştiğini belirtmiştir (Harrington et al. 2010). Elde edilen eğilme dayanım sonuçlarıyla birlikte, %20 atık lastik içeriğinin SSB kaplamalarda kullanımı mümkün kılınmıştır. Sonuçlar incelendiğinde basınç dayanımlarında olduğu gibi atık lastik ikame oranının artmasıyla eğilme dayanımlarında da istikrarlı bir azalma olduğu belirlenmiştir. Ancak eğilme dayanımındaki atık lastik eklenmesiyle artarak devam eden dayanım kaybı yüzdesi, basınç dayanımındaki kayıp yüzdelere oranla daha düşük şekilde gerçekleşmiştir. Bu dayanım kaybı, basınç dayanımında yaklaşık olarak maksimum %81 iken eğilme dayanımında maksimum %74 olarak gerçekleşmiştir. Bunun sebebi atık lastik parçacıklarının, bir fiber görevi görerek kırık çimento matrisini tutması ve mikro çatlak öncesi gerinim kapasitesinde iyileştirmelere yol açması olarak gösterilebilir (Hilal 2017). Zrar et al. (2023), kum ikamesi olarak kırıntı kauçuğu %10 dan %40' a kadar farklı oranlarda kullanmış ve eğilme dayanımlarında sırasıyla %20 ve %46 dayanım kaybı gözlemlenmişlerdir. Hatami and Amiri (2022), %2,5 ve %5 oranlarında atık lastik tozunu betona katarak mekanik özellikleri incelemişlerdir. %2,5 ve %5 atık lastik tozu ilavesinin numunelerin eğilme mukavemeti üzerindeki etkisine bakıldığında, sırasıyla %6,6 ve %15,9' lık bir dayanım kaybı belirlenmiştir.



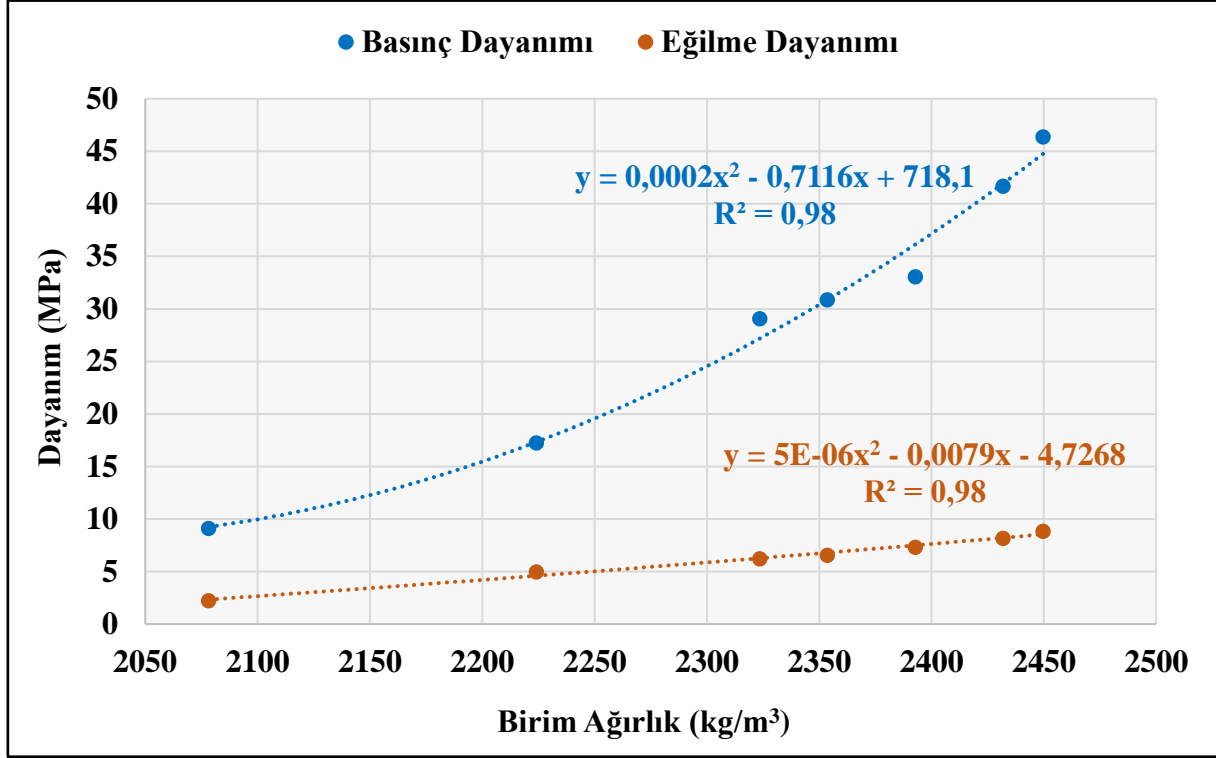
Şekil 66. SSB eğilme dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.

Lastik katkılı SSB numuneler atık lastik içermeyen sade kontrol numuneleriyle karşılaştırıldığında Şekil 67’te görüldüğü üzere kırılma çatlamaında belirgin bir fark gözlemlenmiştir. Kontrol karışımlarda, nihai yüke ulaştığında çatlak oluşumunun hemen ardından ani kopmalar meydana gelmiştir. SSB karışımlarda atık lastiklerin kullanılması, basınç dayanımında olduğu gibi daha düşük sertliği nedeniyle bükülme yüklerine karşı direnci azaltmıştır. Ancak bu durum lastik katkılı SSB numunelerinde, eğilme açısından test edildiğinde daha sünek bir davranışa neden olmuştur. Bu sünek davranışın nedenlerin biri atık lastiklerin bir fiber katkısı gibi davranış göstermeleri olabilmektedir. Atık lastik katkılı SSB kaplamalardaki süneklik, Kardos and Durham (2015), çalışmalarında belirttikleri gibi, belki çatlakları önlemek için değil ama betonun çatlama eğilimli olduğu durumlarda çatlakların genişlemesini durdurmak için istenen bir durum olabilmektedir.



Şekil 67. C ve WR30 SSB numunelerinin eğilme dayanımı testi sonrası kırılma yüzeyleri.

Basınç ve eğilme dayanımlarının, SSB karışımlarının birim ağırlık ile aralarındaki ilişkiyi anlamak için 28 günlük dayanımlarla birim ağırlık arasındaki ilişki Şekil 68'de gösterilmiştir. Basınç dayanımı ve eğilme dayanımı ile birim ağırlık arasında ilişkide R^2 değeri 0,98 olarak elde edilmiştir. İlişkilerden anlaşılacağı üzere dayanımlarla birim ağırlık arasında iyi bir korelasyonun elde edildiği görülmüştür. Birim ağırlıkta meydana gelen azalma hem eğilme hem de basınç dayanımlarında düzenli kayıplara neden olmuştur.



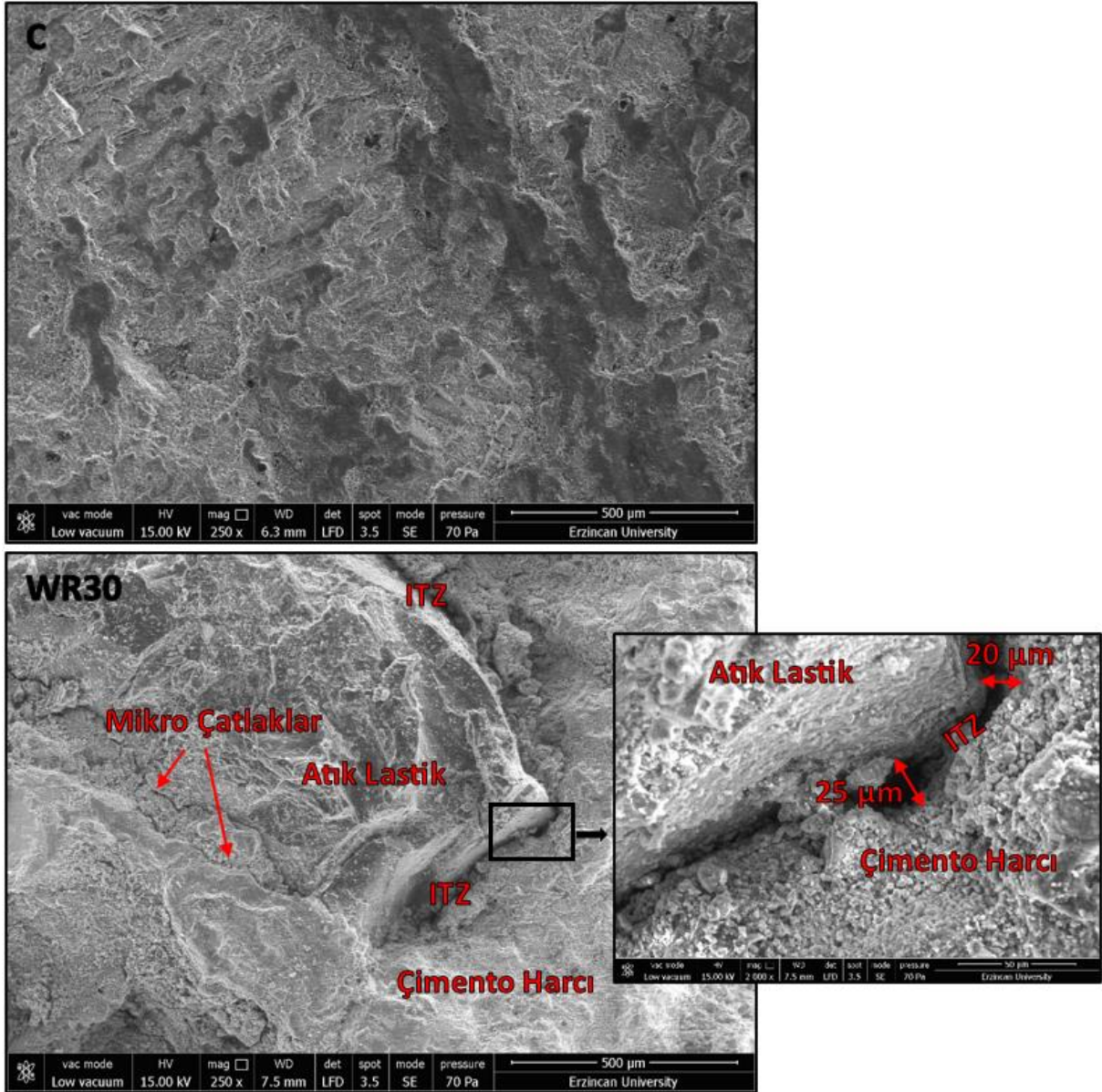
Şekil 68. Birim ağırlık ve dayanımlar arasındaki ilişki.

Mikroyapı Analizi

Atık lastik katkılı SSB'lerde dayanım kayıplarının nedenlerinden biri olarak atık lastik ile çimento hamuru arasındaki oluşan zayıf bağlar gösterilmektedir. Diğer bir neden ise sertleşmiş çimento hamuru ile atık lastikler arasındaki Arayüzey Geçiş Bölgesi (ITZ) kalınlığının artmasıdır. ITZ, zayıf kauçuk bağlantısından dolayı lastikli betonda önemli bir faktör olarak kabul edilir. (Sidhu and Siddique 2023; Mohammed and Adamu 2018). ITZ'de mikro çatlakların oluşması erken kırılmaya ve dolayısıyla dayanımda da azalmaya neden olmaktadır.

Çalışmada, atık lastiklerin SSB kaplamaların üzerindeki etkisini incelemek için mikroyapı analizi, taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak ele alınmıştır. SEM görüntü tekniği ile, atık lastikli ve kontrol numunelerin ITZ mikro çatlak kalınlıkları karşılaştırılmış ve çimento hamuru ile lastik agregalar arasındaki mikroyapı incelenmiştir. 28

gün kür süresine sahip farklı SSB karışımların çeşitli büyütmelelerdeki mikroyapısal görüntüleri Şekil 69'da verilmiştir.



Şekil 69. SSB numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri (C ve WR30).

SSB numunelerinin SEM görüntülerinde, atık lastik ile çimento hamuru ara yüzeyindeki atık lastik çevresinde dikkat edilmesi gereken çatlaklar ve boşluklar vardır. Zayıf bağlara sebep olan bu çatlak ve boşluklar, betonun basınç dayanımının azalmasına yol açmaktadır. Ayrıca SEM görüntüleri, ITZ kalınlığının SSB karışımlardaki lastik boyutlarına bağlı olarak değiştiğini göstermiştir. Daha büyük lastiklerin küçük olanlara kıyasla daha kalın ITZ oluşturmuştur. Daha kalın ITZ, daha zayıf yapılaşmaya ve daha fazla oyuklara yol açar. Bu nedenle, daha büyük lastik boyutlarına sahip numuneler, daha az yoğun mikro yapı ve daha düşük dayanım sergileyebilmektedirler (Islam *et al.* 2023). ITZ kalınlığı normal ıslak karışimli betonlarda genellikle 10 ila 50 µm arasındadır (Mohammed *et al.* 2016). Bu

çalışmadaki SSB karışımların atık lastik içeriğinin artmasıyla birlikte ITZ kalınlığı da git gide artmış olup, %30 atık lastik katkılı numunelerde (WR30) yaklaşık 20-25 µm olmak üzere maksimuma ulaşmıştır. Ayrıca lastik katkısız kontrol numunelerinde ITZ ve çatlaklar görülmez iken atık lastik katkılı karışımlarda ITZ'nin yanı sıra mikro çatlaklar da gözlemlenmiştir.

Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları

Her bir SSB karışımı için basınç ve eğilme dayanımı tahmin modelini geliştirmek amacıyla, basınç ve eğilme dayanım testlerinden önce silindir ve kiriş numuneleri üzerinde “Proceq Pundit lab” UPV test cihazı kullanılarak ASTM C597 (Anonymous 2023f) standardına göre UPV değerleri ölçülmüştür. 7, 28 ve 90 günlük kür uygulama sonrası silindir ve kiriş numunelerin UPV değerleri Tablo 13, Tablo 14 ve Şekil 70’te verilmiştir. UPV değerleri, her beton grubu için üç numunenin ortalamasıdır.

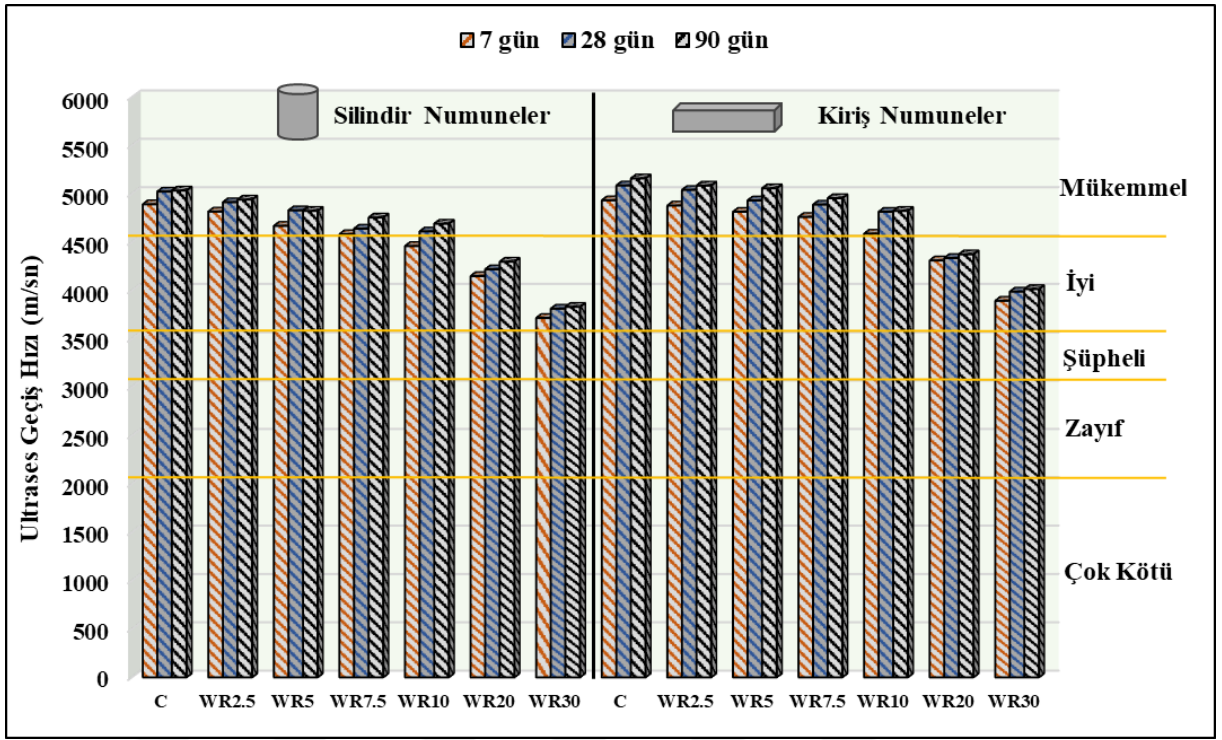
Tablo 13. SSB Silindir Numunelerin UPV Sonuçları

Karışım	7 gün		28 gün		90 gün	
	Ultrases Geçiş Süresi (µs)	Ultrases Geçiş Hızı (m/sn)	Ultrases Geçiş Süresi (µs)	Ultrases Geçiş Hızı (m/sn)	Ultrases Geçiş Süresi (µs)	Ultrases Geçiş Hızı (m/sn)
C	61,33	4891,3	59,73	5022,3	59,60	5033,6
WR2,5	62,30	4815,4	61,07	4912,7	60,73	4939,6
WR5	64,27	4668,0	62,13	4828,3	62,20	4823,2
WR7,5	65,47	4582,5	64,67	4639,2	63,10	4754,4
WR10	67,27	4459,9	65,07	4610,7	63,97	4689,9
WR20	72,30	4149,4	71,10	4219,4	69,80	4298,0
WR30	80,73	3715,9	78,70	3811,9	78,32	3830,4

Tablo 14. SSB Kiriş Numunelerin UPV Sonuçları

Karışım	7 gün		28 gün		90 gün	
	Ultrases Geçiş Süresi (µs)	Ultrases Geçiş Hızı (m/sn)	Ultrases Geçiş Süresi (µs)	Ultrases Geçiş Hızı (m/sn)	Ultrases Geçiş Süresi (µs)	Ultrases Geçiş Hızı (m/sn)
C	81,10	4932,2	78,65	5085,8	77,53	5159,1
WR2,5	82,00	4878,0	79,37	5039,7	78,67	5084,7
WR5	83,10	4813,5	81,12	4931,0	79,10	5056,9
WR7,5	84,03	4760,0	81,83	4888,0	80,73	4954,6
WR10	87,20	4587,2	83,10	4813,5	82,93	4823,2
WR20	92,80	4310,3	92,27	4335,3	91,45	4374,0
WR30	102,73	3893,6	100,30	3988,0	99,65	4014,0

Sonuçlar, erken yaşlardan 90 günlük yaşa kadar tüm SSB numunelerin UPV'sinin istikrarlı bir şekilde arttığını göstermektedir, bu da hidrasyon reaksiyonunun devam ettiğinin göstermektedir. Bu yaşa kadar çimento hidrasyon ürünlerinin büyümesi ve birikmesi neredeyse tamamlanmıştır. Bu, kumun çimento yapısına bağlanmasına ve betonun mekanik dayanımı üzerinde önemli etkisi olan çimento hamurundaki özel kristallerin (CSH gibi) şekillendirilmesini sağlar (Pourjafar *et al.* 2021). 28 günlük karışımların UPV sonuçları genel olarak incelendiğinde silindir numunelerinin UPV değerleri yaklaşık olarak 5020 m/sn ile 3810 m/sn arasında, kiriş numunelerinin ise 5085 m/sn ile 3990 m/sn arasında değiştiği belirlenmiştir. UPV değerleri, agregaların kısmen atık lastik ile değiştirilme oranının artmasıyla azalmıştır. 28 günlük silindir WR2,5, WR5, WR7,5, WR10, WR20 ve WR30 numunelerinin UPV değerleri kontrol numuneleriyle kıyaslandığında yaklaşık olarak sırasıyla %2,2, %3,9, %7,6, %8,2, %16 ve %24,1 daha düşük bulunmuştur. Bu UPV'deki azalma oranları 28 günlük kiriş numunelerde ise sırasıyla %0,9, %3, %3,9, %5,3, %17,7 ve %21,6 şeklindedir. Sonuçlar değerlendirildiğinde, hem silindir hem de kiriş SSB numunelerde atık lastik oranının artmasıyla UPV değerlerinde istikrarlı bir azalma olduğu belirlenmiştir. UPV'deki azalma, üretim aşamasında lastik parçacıklarının yüzeyinde sıkışıp kalan havadan kaynaklanmakta olup, bu da daha gözenekli, sertleştirilmiş lastik beton karışımına yol açar. Bu durum, sertleştirilmiş SSB karışımlarındaki süreksizlikleri artırır, böylece ultrasonik darbenin seyahat süresini artırır ve UPV değerlerini azaltır (Mohammed *et al.* 2011).

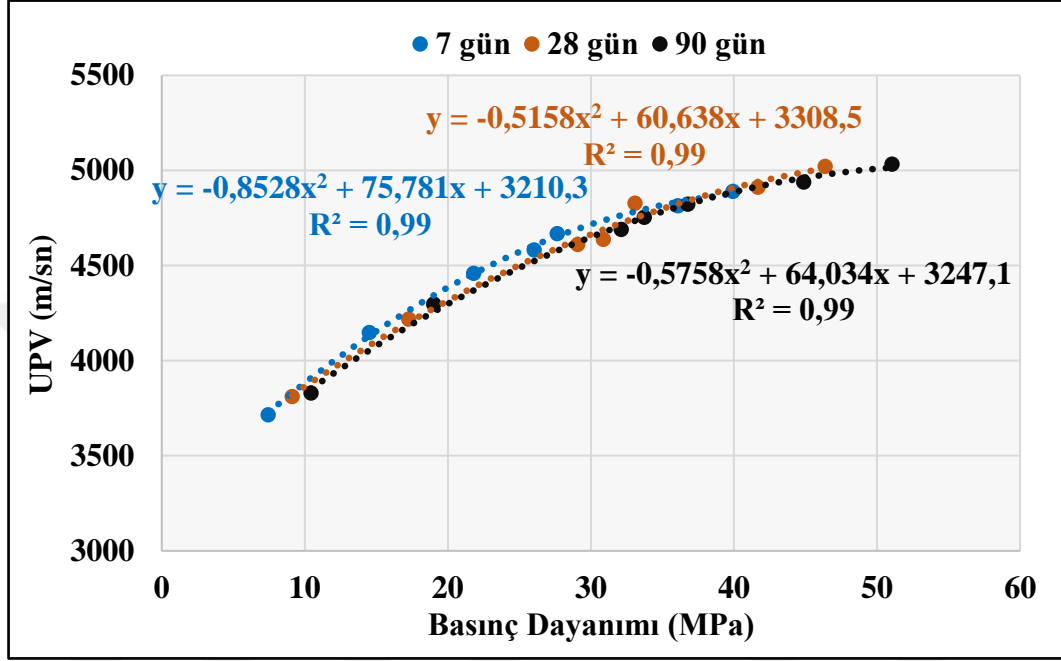


Şekil 70. Silindir ve Kiriş SSB numunelerin UPV değerleri.

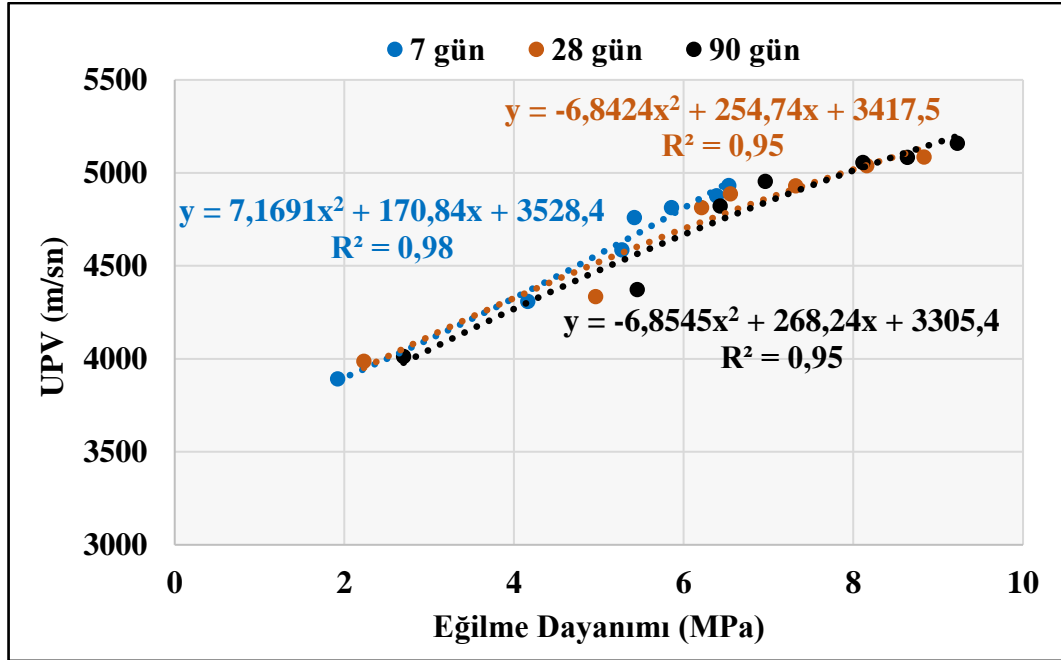
28 günlük silindir ve kiriş SSB numuneleri arasındaki UPV değerleri arasındaki fark yaklaşık olarak %3 belirlenmiştir. Oluşan bu fark çok önemli olmamakla birlikte, numune şeklinden dolayı sıkıştırma yöntemindeki farklılıktan kaynaklandığı düşünülmektedir (Keleş and Akpınar 2022). Whitehurst (1951), UPV'ye dayalı olarak belirli UPV aralıklarına göre bir kalite değerlendirme yöntemi önermiştir. Bu yöntemle göre beton kalitesi mükemmel, iyi, şüpheli, zayıf ve çok kötü olmak üzere beş kategoride değerlendirilebilmektedir. Çalışmada kontrol ve atık lastik katkılı SSB karışımların tümünün iyi seviyede beton kalitesine sahip olduğu anlaşılmaktadır. 28 günlük kür süresi dikkate alındığında %10'a kadar atık lastik katkılı SSB karışımlar mükemmel seviyede kaliteye sahip iken atık lastik oranı artan %20 ve %30 katkılı SSB karışımlar iyi seviyede beton kalitesine sahip olmuşlardır.

Atık lastik katkılı betonlarda dayanım ile UPV arasında üstel ilişkiler öneren birçok çalışma yapılmıştır. Yung *et al.* (2013), kendiliğinden yerleşen betonda atık lastik katkısını incelemiş olup, ultrasonik darbe hızları ve basınç dayanımlarının korelasyon katsayısını 0,92'nin üzerinde bulmuşlardır. Benzer şekilde Bayraktar *et al.* (2021), çimento dozajı ve atık lastik kauçuğunun köpük betonları üzerindeki etkilerini incelemiş ve UPV ile basınç dayanımı arasındaki ilişkide R^2 değeri 0,86 olan güçlü bir korelasyon eğilim çizgisi rapor etmiştir. Benzer şekilde Mohammed *et al.* (2018) ise SSB kaplamalarda atık lastik etkisini tahribatsız teknikler kullanarak değerlendirilmiş, basınç dayanımı ile UPV arasındaki tüm ilişkinin makul bir korelasyon katsayısına ($R^2 > 0,65$) sahip olduğunu göstermişlerdir. Bu çalışmadaki SSB numunelerinin UPV ile basınç ve eğilme dayanımı değerleri arasındaki ilişki Şekil 71 ve Şekil

72’de verilmiştir. UPV ile basınç dayanımları arasındaki ilişkide güçlü bir eğilim çizgisi oluşturularak ortalama değeri 0,99 olan çok yüksek bir korelasyon katsayısı elde edilmiştir. Benzer şekilde UPV ile eğilme dayanımları arasında da ortalama 0,97 değere sahip yüksek korelasyon katsayısına sahip bir ilişki oluşmuştur. Genel olarak dayanımlar ile UPV aralarındaki ilişkiler incelendiğinde atık lastik katkılı SSB karışımların dayanımlarını tahmin etmek için uygun ilişkiler elde edilmiştir.



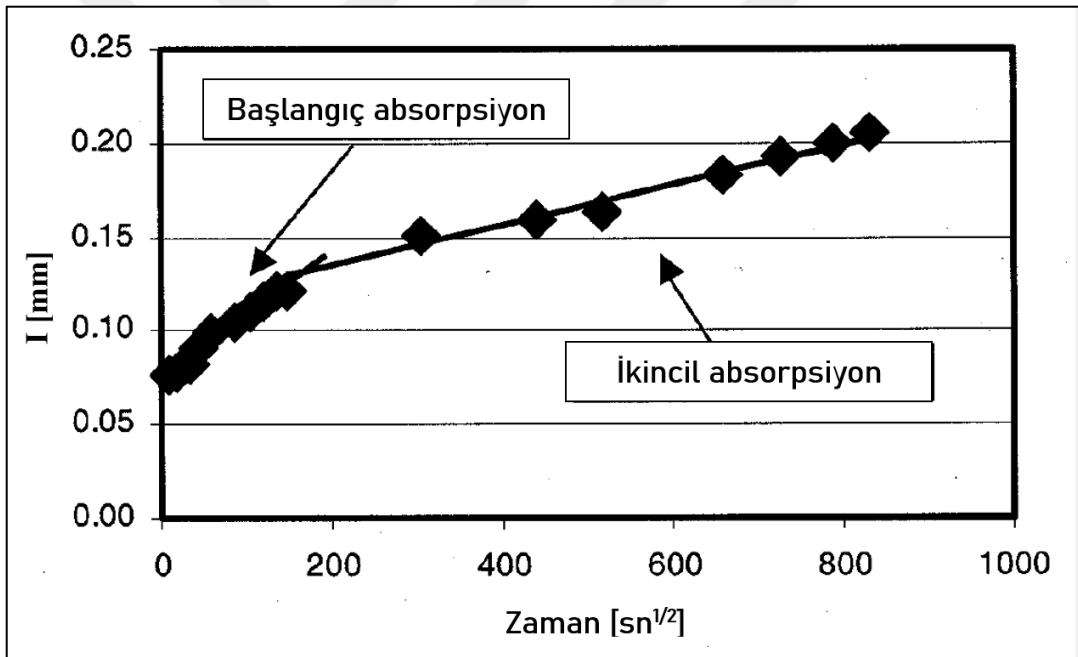
Şekil 71. SSB numunelerin basınç dayanımları ve UPV arasındaki ilişkiler.



Şekil 72. SSB numunelerin eğilme dayanımları ve UPV arasındaki ilişkiler.

Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları

Çalışma kapsamında SSB numunelerin kılcal su emme oranları, 100 x 50 mm boyutlarındaki diskler ASTM C1585 (Anonymous 2020d) standardına uygun olarak kılcal su emme testi yapılarak belirlenmiştir. Su emme oranı (kılcallık katsayısı) Şekil 73'te gösterilen zamanın kareköküne ($sn^{1/2}$) karşı çizilen su emmeye (I) karşılık oluşturulan grafikteki başlangıç su emme ve ikincil su emme doğrularının eğimleri olarak tanımlanır. Bu eğimler, I ile $sn^{1/2}$ grafiğinin en küçük kareler doğrusal regresyon analizini kullanarak elde edilir. Bu çalışmada, SSB numunelerin başlangıç su emme oranları belirlendiği için regresyon analizinde 1 dakikadan 6 saate kadar olan tüm noktalar kullanılmıştır. Eğer 1 dakika ile 6 saat arasındaki veriler doğrusal bir ilişkiyi takip etmiyorsa (korelasyon katsayısı 0,98'den azsa) ve sistematik bir eğrilik göstermiyorsa, başlangıçtaki absorpsiyon hızı belirlenememiş ve deney tekrar yapılmıştır. 28 ve 90 günlük SSB numunelerin su emme-zaman grafik örnekleri Şekil 77ve 78'de verilmiştir.



Şekil 73. Su emme oranının elde edildiği örnek grafik (Anonymous 2020d).

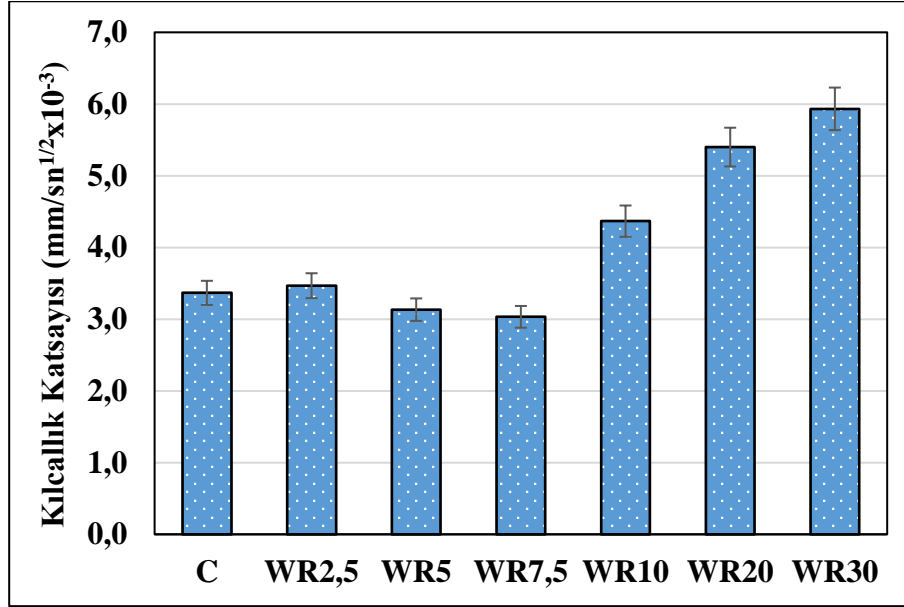
28 ve 90 günlük kür uygulama sonrası numunelerin kılcal su emme oranı (kılcallık katsayıları) deney sonuçları Tablo 15 ile Şekil 74 ve 75'de verilmiştir. Elde edilen kılcal su emme oranı değerleri, her beton grubu için üç adet disk numunenin ortalaması alınarak bulunmuştur.

Tablo 15. SSB Numunelerin Kılcallık Katsayıları

Karışım	Atık Lastik İçeriği	Kılcallık Katsayıları (mm/sn ^{1/2} x10 ⁻³)	
		28 Gün	90 Gün
C	%0	3,37	2,83
WR2,5	%2,5	3,47	3,00
WR5	%5	3,13	2,10
WR7,5	%7,5	3,03	2,17
WR10	%10	4,37	4,13
WR20	%20	5,40	5,13
WR30	%30	5,93	5,60

28 günlük SSB numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayı sonuçları incelendiğinde, en düşük kılcallık katsayısı 3,03 mm/sn^{1/2}x10⁻³ ile %7,5 atık lastik katkıli WR7,5 numunelerinde gözlemlenirken, en yüksek kılcallık katsayısı ise 5,93 mm/sn^{1/2}x10⁻³ ile %30 atık lastik katkıli WR30 numunelerinde gözlemlenmiştir. Atık lastik içermeyen kontrol SSB numunelerin (C) kılcallık katsayısı ortalama yaklaşık olarak 3,4 mm/sn^{1/2}x10⁻³ olarak belirlenmiştir. Kontrol karışımla kıyaslandığında, WR5 ve WR7,5 karışımların kılcallık katsayılarında sırasıyla yaklaşık olarak %7 ve %10 oranlarında düşüş, WR2,5, WR10, WR20 ve WR30 karışımların kılcallık katsayılarında ise sırasıyla yaklaşık olarak %3, %30, %60 ve %76 oranlarında artış meydana gelmiştir.

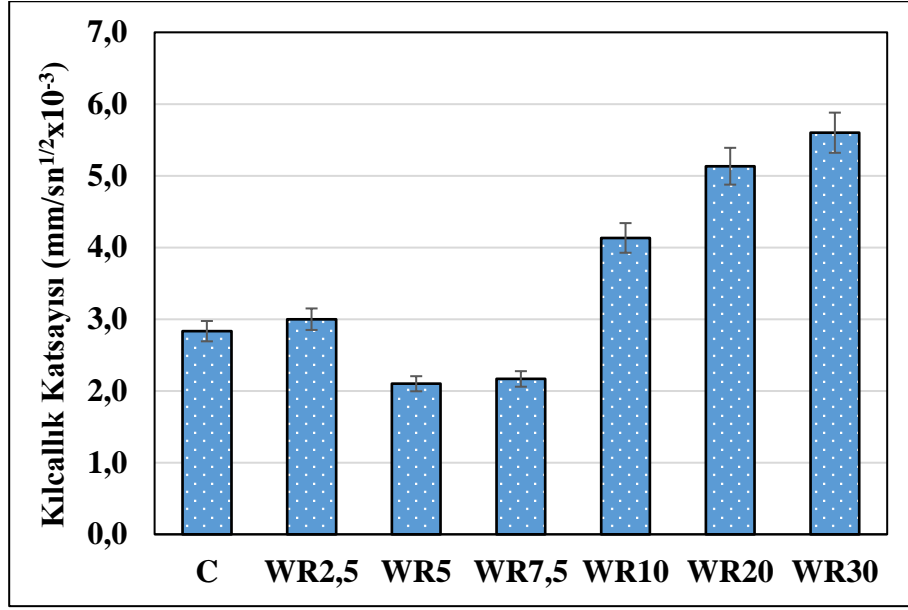
28 günlük SSB karışımların kılcallık katsayı sonuçları genel olarak incelendiğinde %7,5'e kadar atık lastik içeren numunelerin kılcallık katsayıları birbirine çok yakın iken %10 atık lastik içeriğinden itibaren kılcallık katsayılarında %76 gibi önemli artışlar belirlenmiştir. Kılcallık katsayılarında meydana gelen bu artışların nedeni olarak %10 atık lastik içeriğiyle birlikte SSB karışımlarda oluşan boşluk oranının artması gösterilebilir.



Şekil 74. 28 günlük SSB numunelerin kılcallık katsayılarının atık lastik oranına göre değişimi.

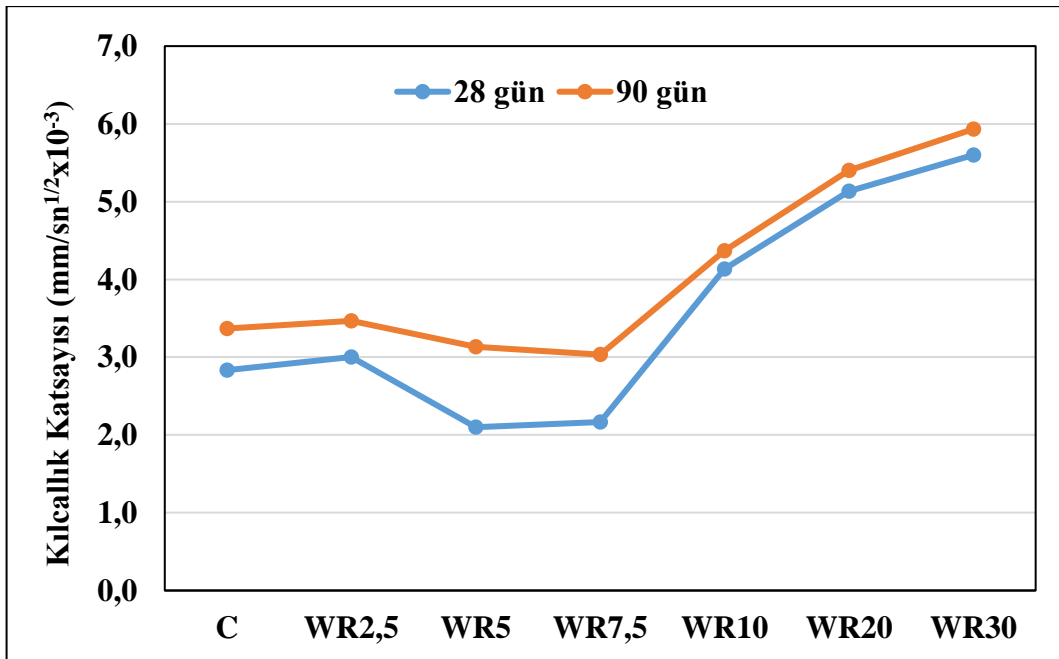
90 günlük SSB numunelerin kılcal geçirimsizlik katsayı sonuçları incelendiğinde, genel olarak 28 günlük SSB numunelerle benzer davranışlar sergilemekle birlikte en düşük kılcallık katsayısı $2,10 \text{ mm/sn}^{1/2} \times 10^{-3}$ ile %5 atık lastik katkıli WR5 numunelerinde gözlemlenirken, en yüksek kılcallık katsayısı ise $5,60 \text{ mm/sn}^{1/2} \times 10^{-3}$ ile %30 atık lastik katkıli WR30 numunelerinde gözlemlenmiştir. Atık lastik içermeyen kontrol SSB numunelerin (C) kılcallık katsayısı ortalama yaklaşık olarak $2,8 \text{ mm/sn}^{1/2} \times 10^{-3}$ olarak belirlenmiştir. Kontrol karışımla kıyaslandığında, WR5 ve WR7,5 karışımların kılcallık katsayılarında sırasıyla yaklaşık olarak %26 ve %24 oranlarında düşüş, WR2,5, WR10, WR20 ve WR30 karışımların kılcallık katsayılarında ise sırasıyla yaklaşık olarak %6, %46, %81 ve %98 oranlarında artış meydana gelmiştir.

90 günlük SSB karışımların kılcallık katsayı sonuçları genel olarak incelendiğinde kontrol karışımları ve %2,5 atık lastik içeren numunelerin kılcallık katsayıları ile birlikte %5 ve %7,5 atık lastik içeren numunelerin kılcallık katsayıları birbirine çok yakın olmuştur. %10 atık lastik içeriğinden itibaren kılcallık katsayılarında da %98 gibi büyük artışlar belirlenmiştir. Kılcallık katsayılarında meydana gelen bu artışların nedeni olarak 28 günlük numunelerdeki %10 atık lastik içeriğiyle birlikte SSB karışımlarda oluşan boşluk oranının artması gösterilebilir.



Şekil 75. 90 günlük SSB numunelerin kılcallık katsayılarının atık lastik oranına göre değişimi.

Ayrıca 28 ve 90 günlük SSB numunelerin kılcallık katsayılarının birlikte değerlendirildiği Şekil 76’da verilen grafikten anlaşılacağı üzere atık lastik oranı ile kılcallık katsayısındaki değişiminin çok benzer olduğu gözlemlenmiştir. Şekilden de daha net anlaşılacağı üzere %7,5 oranına kadar atık lastik ikamesi kılcallık katsayılarını azaltırken, %10’ dan itibaren atık lastik ikamesinin artmasıyla kılcallık katsayılarını artırmıştır. 28 ve 90 günlük SSB numunelerin kılcallık katsayılarında benzer davranış gözlemlenmekle birlikte kür süresinin daha fazla olduğu 90 günlük SSB numunelerin kılcallık katsayıları daha düşük çıkmıştır. Bu da SSB yaşının artmasıyla daha geçirimsiz yapı elde edilerek daha düşük kılcallık sağlandığı anlamına gelmektedir.



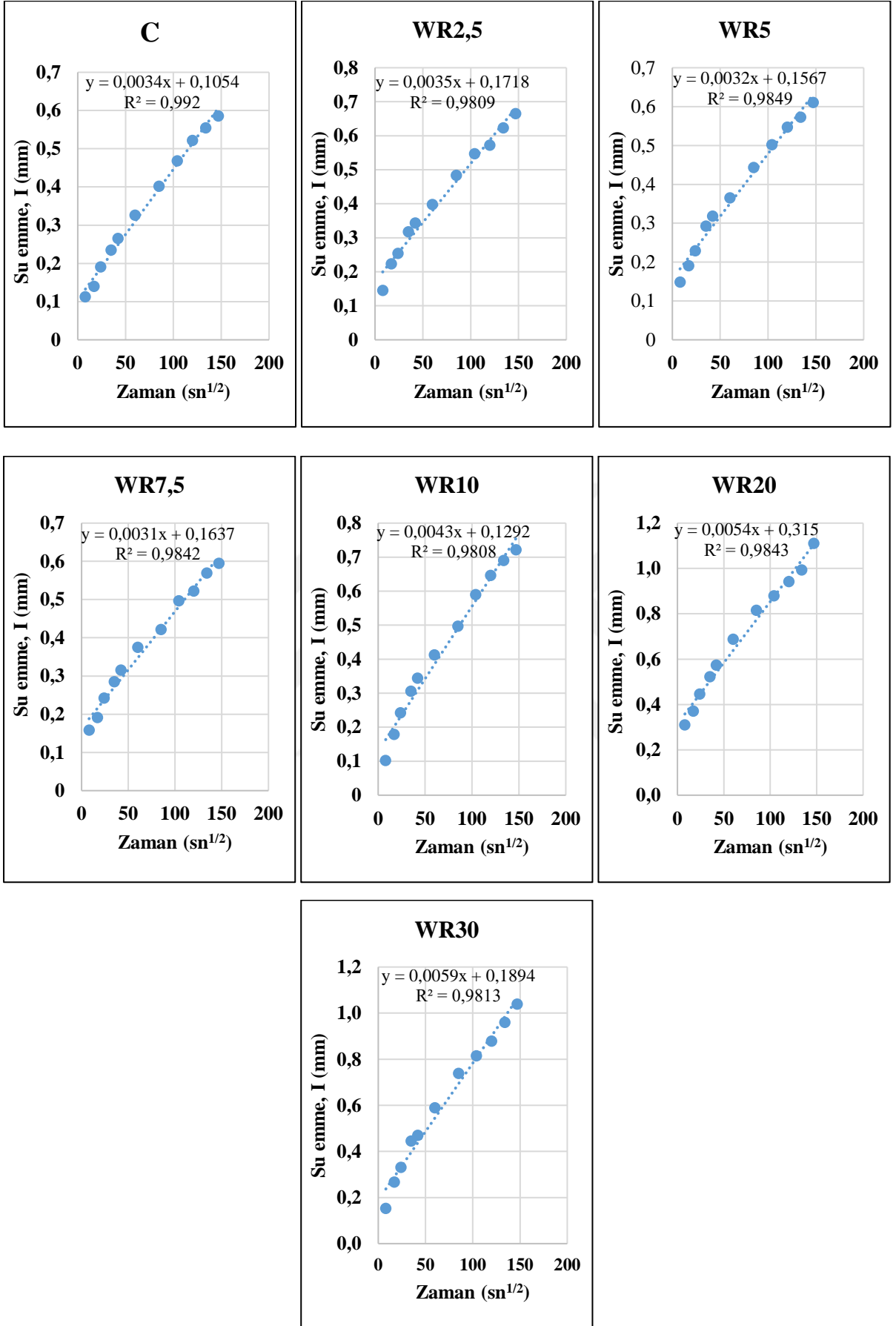
Şekil 76. 28 ve 90 günlük SSB numunelerin kılcallık katsayılarının ilişkisi.

Beton karışımının oranları, kimyasal katkıları, yardımcı çimentolu malzemeler, sürüklenen hava miktarı, kür tipi ve süresi, hidrasyon derecesi, beton yaşı, suyun varlığı ve diğer faktörlerin tamamı beton yüzeyinin su emme yeteneğini etkilemektedir (Anonymous 2020d). Atık lastik katkılı betonlarda su emme oranını atık lastik ikamesiyle azaldığı veya arttığını gösteren birçok çalışma yapılmıştır.

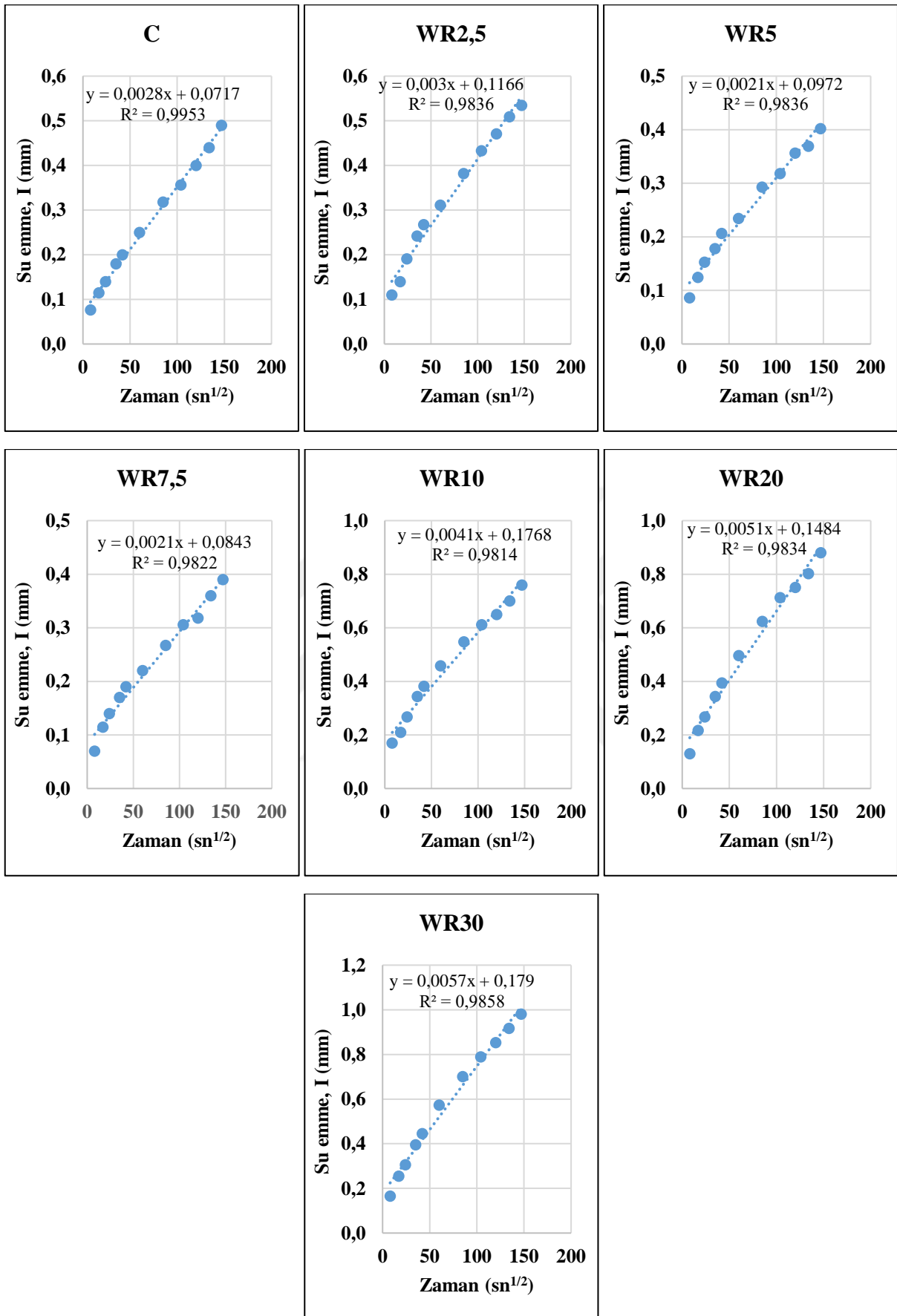
Meddah *et al.* (2014), %30' a kadar atık lastik katkıları silindirle sıkıştırılmış betonlarda, atık lastiğin kılcallık yoluyla su emme oranı üzerindeki etkisini incelemiştir. Karışımındaki kauçuk miktarının artmasıyla betonun gözenekliliğinin azaldığını dolayısıyla da su emme oranının düştüğünü belirtmişlerdir. Yüzey ön kaplaması ve silika dumanının kırıntı kauçuk-çimento matris arayüzü ve çimento harcı özellikleri üzerindeki etkilerinin incelendiği çalışmada, tüm test zaman aralıklarında kırıntı kauçuğun harç numunelerinin kılcal su emme oranını azalttığını ve karışımların kırıntı kauçuğu içeriği arttıkça bu azalmaların daha belirgin hale geldiği belirlenmiştir (Onuaguluchi 2015).

Thakur *et al.* (2020), beton tuğlalarda kırıntı atık kauçuk lastiğinin kullanılmasını araştırdığı çalışmada, ince agrega yerine %20 oranına kadar kullanılan kırıntı kauçuğunun yüzdesel artışının su emiliminin artmasına neden olduğu gözlemlemiştir. Kontrol karışımıyla karşılaştırıldığında %20 atık lastik içeren karışımların su emme değerleri %15 artmıştır. Bu artışın nedeni olarak hidrasyon sırasında genişleyen kauçuğun neden olduğu mikro çatlakları göstermişlerdir. Yüksek miktarda endüstriyel atık malzemenin betonun geliştirilmesi amacıyla kullanıldığı çalışmada, ince ve kaba agrega yerine %100 oranına kadar kullanılan atık lastiklerin %25 oranında kullanımında kontrol karışımına kıyasla sırasıyla kılcallık katsayılarını yaklaşık olarak %75 ve %35 oranında artırdığı saptanmıştır. %100 oranında atık lastik kullanımında bu artış oranı %500 ve %200'ye kadar çıkmaktadır (Helmy *et al.* 2023) Ayrıca boyut etkisi açısından incelendiğinde, betonda kullanılan lastik parçacıklarının boyutunun artması su emilimini azalttığını göstermiştir (Yılmaz and Degirmenci 2009).

Yapılan bu çalışmada, atık lastiğin %7,5'e kadar SSB yollarda kullanımında kılcallık katsayılarını nerdey+ x ışını difraksiyonu x ışını difraksiyonu se değıştirmediği veya düşük bir oran da olsa azalttđđı belirlenmiştir. Atık lastiğın %10 oranından itibaren %30'a kadar kullanılmasıyla da kılcallık katsayılarının neredeyse %100'e yakın artırdđđđı belirlenmiştir. Bunun sebebi olarak, atık lastik miktarının artmasıyla gerek SSB üretim aşamasında sıkıştırma işleminde artan boşluk gerekse de hidrasyon sırasında atık lastiklerde meydana gelen genişleme sonrası oluşan çatlakların varlıđđı gösterilebilir.



Şekil 77. SSB numunelerin 28 günlük su emme - zaman grafik örnekleri.



Şekil 78. SSB numunelerin 90 günlük su emme - zaman grafik örnekleri.

Yüksek Sıcaklık Etkisi Sonuçları

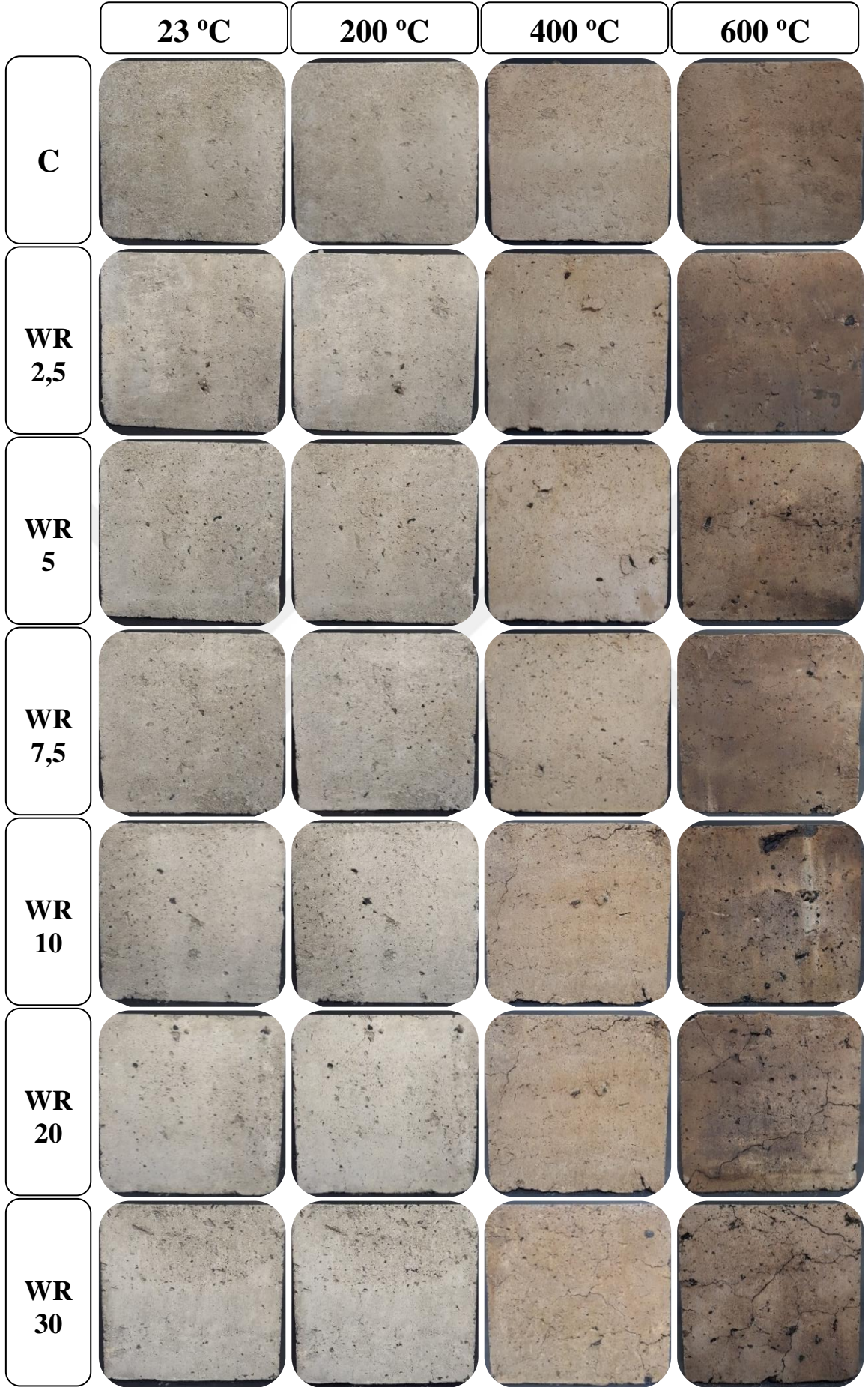
SSB karışımların yüksek sıcaklık etkisine karşılık davranışlarını belirlemek amacıyla, 28 günlük kür süresinden sonra 600 °C'ye kadar yakma işlemi uygulanan numunelere görsel analiz, kütle değişimi, mekanik özellik, UPV ve mikroyapı analizi gibi deney ve analizler yapılmıştır. Elde edilen bu deney sonuçları ve analizler aşağıda detaylı olarak el alınmıştır.

Görsel analiz

Çalışma kapsamında 150 x 150 x 150 mm boyutlarında küp şeklinde olmak üzere üretimi yapılan 28 günlük SSB numunelerin yakım sonrası görsel analizi için tüm numuneler yüksek sıcaklığa maruz bırakılmadan önce ve sonra görsel olarak incelenmiş ve her numunenin yüzeyi, herhangi bir görsel çatlak, dökülme ve renk değişikliği açısından kontrol edilmiştir. Farklı sıcaklıklara maruz kalan SSB numunelerin hem ortam sıcaklığında (23 °C) hem de yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonraki görsel karşılaştırılması Şekil 79'da verilmiştir.

Numuneler incelendiğinde, sıcaklık 200 °C'ye ulaştığında beton yüzeyinde belirgin bir renk değişikliği meydana gelmediği gözlemlenmekle beraber atık lastik içeriğinin arttığı numunelerde (%10'dan itibaren (WR10)) az da olsa çıplak gözle görülebilen yüzey çatlakları belirlenmiştir. Sıcaklık 400 °C'ye yükseltiltiğinde numunelerde renk değişikliği olmaya başlamış ve açık kahverengiye dönüştükleri görülmüştür. Bu sıcaklıkta, yüksek atık lastik katkılı numunelerde daha fazla ve belirgin olmakla birlikte yüzeylerde çatlaklar ve az da olsa pullanma sonucu dökülmeler meydana gelmeye başlamıştır. Sıcaklığın 600 °C'ye ulaşmasıyla numunelerin yüzey renkleri tamamen kahverengiye dönmüştür. Numunelerin yüzeylerindeki meydana gelen çatlak sayısı ve genişliği artmıştır. Bununla birlikte özellikle %10 atık lastik içeriğinden sonraki numune yüzeylerinde yanmış lastik kalıntıları ve dökülmeler gözlemlenmiştir.

Yakım sonrası numune görselleri genel olarak değerlendirildiğinde, numunelerin gerek görsel değişiklik gerekse de yüzeylerde meydana gelen bozulmalar açısından 400 °C sıcaklık itibariyle değişiklikler gözlemlenmeye başlanmıştır. Bununla birlikte atık lastik içeriğinin artmasıyla da renk değişimlerinin, çatlakların ve yüzey bozulmalarının daha fazlaştığı belirlenmiştir.



Şekil 79. Farklı sıcaklıklara maruz kalan SSB numunelerin görsel karşılaştırılması.

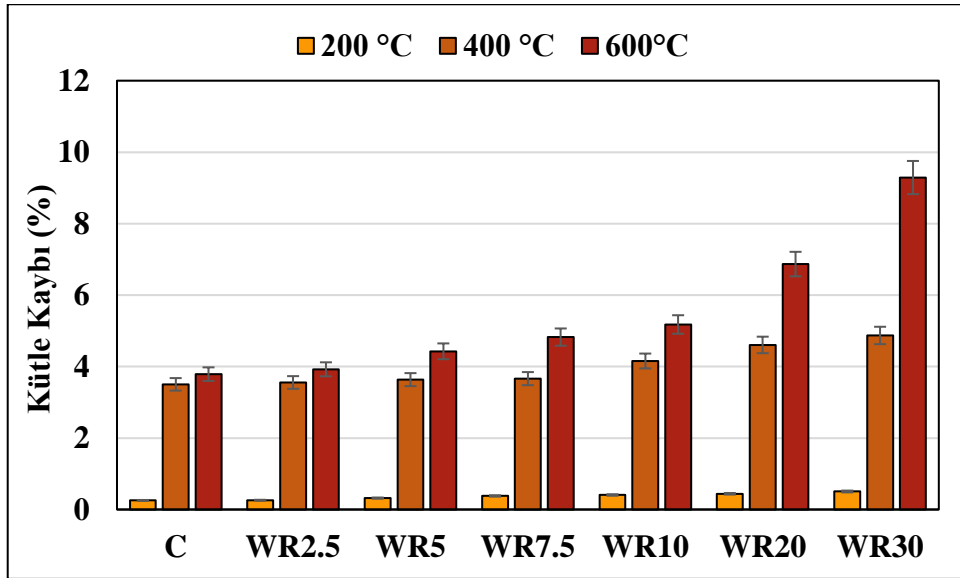
Kütle Değişimi

Çalışma kapsamında 150 x 150 x 150 mm ve 100 x 100 x 400 mm boyutlarında küp ve kiriş şeklinde olmak üzere üretimi yapılan 28 günlük SSB numunelerin yakım öncesi başlangıç ağırlıkları belirlendikten sonra kütle değişimini incelemek amacıyla yakım sonrası da 0,1 gr hassasiyetine sahip terazi kullanılarak kütleleri belirlenmiştir. SSB küp ve kiriş numunelerde yakım sonrası meydana gelen kütle değişimleri negatif olarak kayıp şeklinde gerçekleşmiş olup yüzde olarak sonuçlar Tablo 16 ve Tablo 17 ile birlikte Şekil 80 ve Şekil 81’de verilmiştir. Her beton grubu için üç numune test edilmiş ve ortalama değer deneysel sonuç olarak kullanılmıştır.

Tablo 16. SSB Küp Numunelerin Yüksek Sıcaklık Kütle Kayıpları

Karışım	Atık Lastik İçeriği	Kütle Kayıpları (%)		
		200 °C	400 °C	600 °C
C	%0	0,25	3,50	3,79
WR2,5	%2,5	0,26	3,55	3,92
WR5	%5	0,32	3,64	4,43
WR7,5	%7,5	0,38	3,66	4,83
WR10	%10	0,41	4,16	5,18
WR20	%20	0,44	4,61	6,87
WR30	%30	0,50	4,87	9,29

SSB küp numunelerde yakım sonrası meydana gelen kütle değişimleri incelendiğinde, karışımlardaki atık lastik içeriği arttıkça numunelerde meydana gelen kütle kayıplarının daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Aynı durum sıcaklık değişiminde de görülmektedir. Yakım sıcaklığı arttıkça numunelerde meydana gelen kütle kayıp oranları da artmaktadır. En fazla kütle kaybı, %9,29 oranla %30 atık lastik katkılı (WR30) numunelerde 600 °C’lik yakım sonrasında meydana gelmiştir. En az kütle kaybı ise %0,25 oranla atık lastik içermeyen kontrol numunelerinde (C) 200 °C’lik yakım sonrasında meydana gelmiştir. Numunelerde atık lastik içeriğinin %30’a çıkması kütle kayıplarını, 200 °C yakım sıcaklığında %100, 400 °C yakım sıcaklığında %39 ve 600 °C yakım sıcaklığında %145’e kadar artırmıştır. Atık lastik içeriği açısından sonuçlar incelendiğinde ise kontrol numunelerin 600 °C yakım sonrası kütle kayıp oranı %3,79 olarak belirlenirken WR30 numunelerinde bu oran %9,29’a ulaşmıştır.



Şekil 80. SSB küp numunelerin yüksek sıcaklık kütle değişim oranlarının atık lastik oranına göre değişimi.

SSB küp numunelerin yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen kütle kayıpları genel olarak incelendiğinde, karışımların 200 °C'lik yakım sıcaklığında kütle kayıp oranları birbirlerine çok yakın olmakla birlikte en fazla %0,5' kadar ulaşmıştır. Karışımların 400 °C'lik yakım sıcaklığında kütle kayıp oranları da 200 °C'deki gibi birbirine yakın olup %3,5 ile %4,87 arasında değişmektedir. Karışımların 600 °C'lik yakım sıcaklığında kütle kayıp oranları incelendiğinde diğer yakım sıcaklıklarından farklı olarak atık lastik katkı oranlarının kütle kayıp oranlarını çok daha fazla etkilediği belirlenmiştir. 600 °C'lik yakım sonrası numunelerin kütle kayıp oranlarında, kontrol numuneyle kıyaslandığında %145 oranında bir fark oluşmuştur.

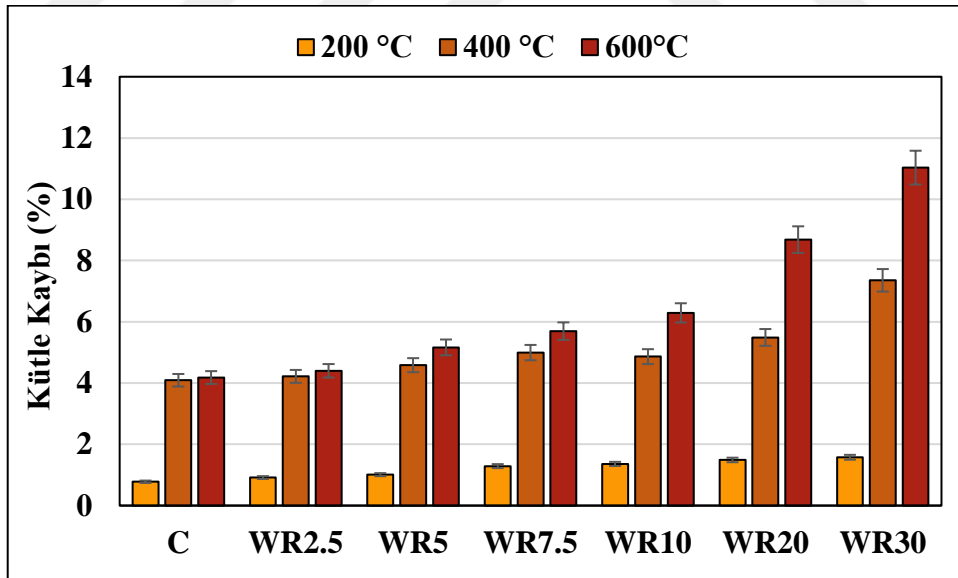
Tablo 17. SSB Kiriş Numunelerin Yüksek Sıcaklık Kütle Kayıpları

Karışım	Atık Lastik İçeriği	Kütle Kayıpları (%)		
		200 °C	400 °C	600 °C
C	%0	0,78	4,09	4,18
WR2,5	%2,5	0,92	4,22	4,40
WR5	%5	1,01	4,58	5,16
WR7,5	%7,5	1,29	4,99	5,70
WR10	%10	1,36	4,86	6,29
WR20	%20	1,49	5,49	8,68
WR30	%30	1,58	7,35	11,03

SSB kiriş numunelerde yakım sonrası meydana gelen kütle değişimleri incelendiğinde küp numunelerle benzer sonuçlar elde edilmiştir. Karışımlardaki atık lastik içeriği ve yakım sıcaklığı arttıkça numunelerde meydana gelen kütle kayıpları daha fazla olmuştur. En fazla kütle kaybı, %11,03 oranla %30 atık lastik katkılı (WR30) numunelerde 600 °C'lik yakım

sonrasında meydana gelmiştir. En az kütle kaybı ise %0,78 oranla atık lastik içermeyen kontrol numunelerinde (C) 200 °C'lik yakım sonrasında meydana gelmiştir. Numunelerde atık lastik içeriğinin %30'a çıkması kütle kayıplarını, 200 °C yakım sıcaklığında %102, 400 °C yakım sıcaklığında %80 ve 600 °C yakım sıcaklığında %90'a kadar artırmıştır. Atık lastik içeriği açısından sonuçlar incelendiğinde ise kontrol numunelerin 600 °C yakım sonrası kütle kayıp oranı %4,81 olarak belirlenirken WR30 numunelerinde bu oran %11,03'e ulaşmıştır.

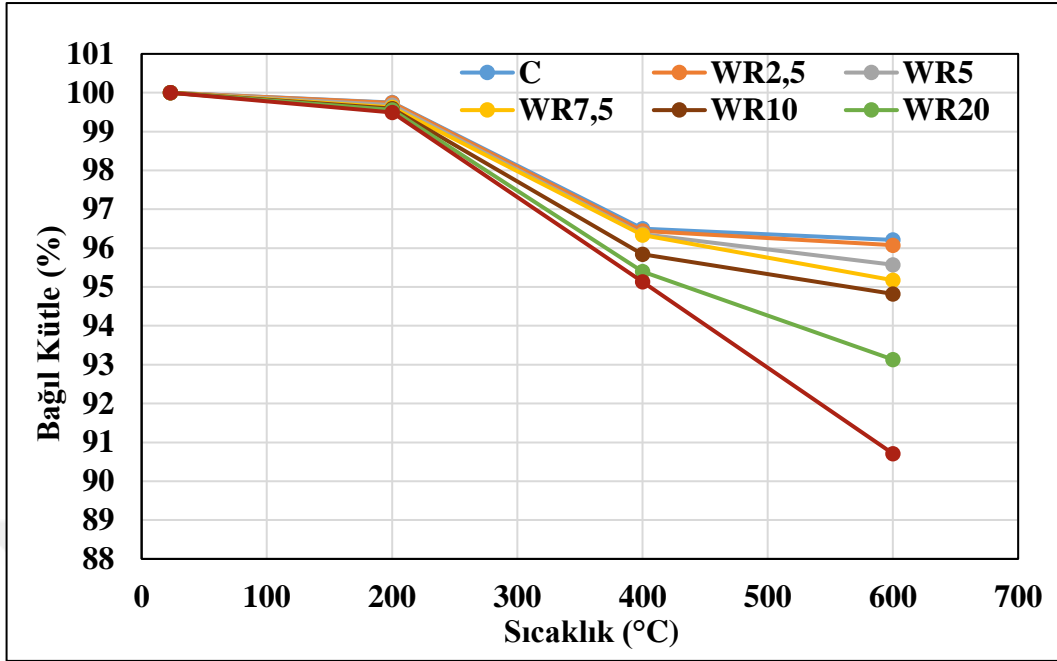
SSB kırıntı numunelerin yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen kütle kayıpları genel olarak incelendiğinde, karışımların 200 °C'lik yakım sıcaklığında kütle kayıp oranları en fazla %1,58'e kadar ulaşmıştır. Karışımların 400 °C'lik yakım sıcaklığında kütle kayıp oranları %4,09 ile %7,35 arasında, 600 °C'lik yakım sıcaklığında kütle kayıp oranları incelendiğinde ise kütle kayıp oranlarını %4,18 ile %11,03 arasında değiştiği belirlenmiştir. 600 °C'lik yakım sonrası numunelerin kütle kayıp oranlarında, kontrol numunesiyle kıyaslandığında %164 oranında bir fark oluşmuştur. Küp ve kırıntı numunelerin yüksek sıcaklık etkisi altında kütle değişim sonuçları birlikte değerlendirildiğinde kırıntı numunelerin küp numunelere kıyasla daha fazla kütle kaybı meydana gelmiştir. Bunun sebebinin boyut etkisinden dolayı meydana gelebileceği düşünülmektedir. Kırıntı numunelerin en kesit boyutlarının küp numunelere göre çok daha küçük olduğundan dolayı yüksek sıcaklık etkisine daha fazla maruz kalmıştır.



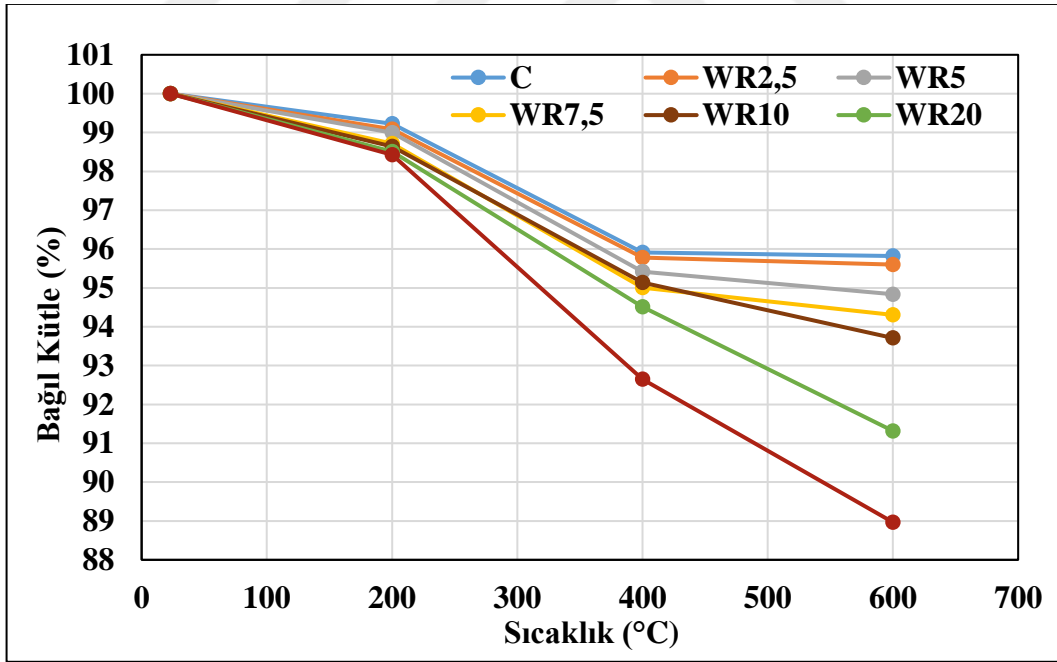
Şekil 81. SSB kırıntı numunelerin yüksek sıcaklık kütle değişim oranlarının atık lastik oranına göre değişimi.

Yüksek sıcaklık etkisi sonrası küp ve kırıntı SSB numunelerin bağıl kütle-sıcaklık değişim ilişkileri Şekil 82 ve Şekil 83'te verilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere hem küp hem de kırıntı numunelerde en çok kütle kaybının yaşandığı WR30 karışımlarının yakım sonrası kütleleri, başlangıç kütlelerinin sırasıyla %91 ve %89' kadar gerilemiştir. 200 °C

hedef sıcaklığa kadar farklı atık lastik katkıli karışımların kütle kayıpları çok benzer olmakla birlikte 400 °C hedef sıcaklıktan itibaren bu durum değişmektedir.



Şekil 82. SSB küp numunelerin yüksek sıcaklık bağlı kütle oranlarının sıcaklığa göre değişimi.



Şekil 83. SSB kirış numunelerin yüksek sıcaklık bağlı kütle oranlarının sıcaklığa göre değişimi.

Betonun kütle kaybı yakım sıcaklığına ve agrega tipine bağlı olmaktadır. Kütle kaybı, artan sıcaklıkla birlikte artar ve bu aynı zamanda betonun iç kısmındaki boşlukların arttığını da göstermektedir (Janotka and Nürnbergerová 2005). Atık lastik katkıli betonlarda yüksek sıcaklık etkisiyle kütle değişimlerini inceleyen birçok çalışma yapılmıştır.

Ma *et al.* (2023b), atık cam ve atık lastik katkılı betonun yüksek sıcaklık sonrası davranışlarını incelemiştir. Yüksek atık lastik hacim fraksiyonları içeren karışımların, yüksek sıcaklıklara maruz kaldıktan sonra daha fazla ağırlık kaybına maruz kaldıklarını belirtmişlerdir. Yüksek sıcaklıkla atık lastiklerin eriyerek buharlaştığını ve bunun da daha fazla gaz ve nemin tahliyesi için kolaylaştırıcı kanallar oluşturup kütle kaybını artırdığı açıklanmıştır. Numunelerin 700 °C'ye kadar yakıma maruz bırakıldığı çalışmada %30 atık lastik katkılı betonların 600 °C yakım sonrası %6,8 oranında kütle kaybı yaşadığı belirlenmiştir. Zhou *et al.* (2023), atık lastik ve polipropilen katkılı betonlarda yüksek sıcaklık etkisini incelemiştir. %15 oranına kadar atık lastik katkılı beton karışımlara 600 °C'ye kadar yakıma prosedürü uygulanmıştır. %15 atık lastik katkılı betonlarda 600 °C yakım sonrası kütle kayıp oranı yaklaşık olarak %10 bulunmuştur. Sürdürülebilir betonda geri dönüştürülmüş agrega ve %6'ya kadar atık kırıntı kauçuğun kullanıldığı çalışmada 600 °C'ye kadar yüksek sıcaklık etkisi incelenmiştir. %6 atık kırıntı kauçuğu kullanılan karışımlarda 600 °C yüksek sıcaklık etkisi sonrasında yaklaşık olarak %8 kütle kaybı gözlemlenmiştir (Tang *et al.* 2021). Atık lastik elyaf katkılı betonun yüksek sıcaklık performansının incelendiği çalışmada, %25'e kadar lastik elyaf katkılı karışımlar 800 °C'ye kadar farklı süreler boyunca (30 dk 60 dk ve 120 dk) yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. %25 atık lastik elyaf katkılı betonlarda 600 °C yakımda 60 dk boyunca yüksek sıcaklığa maruz kalmış karışımların kütle kayıpları %8 olarak belirlenmiştir (Gupta *et al.* 2017).

Yapılan çalışmada literatürdeki sonuçlarla benzer bulgular elde edilmiş olup sıcaklığın artmasıyla birlikte tüm numunelerde kütle kaybının arttığı görülmüştür. Gerek hedef sıcaklığın artması gerekse de atık lastik içeriğinin artması karışımların kütle kayıp oranlarını önemli şekilde yükseltmiştir. Bunun nedeni olarak yüksek sıcaklıkla atık lastiklerin erimesi ve ayrışmasıyla, numunelerin ciddi çatlaklara ve yüzeyden dökülmelere maruz kalması gösterebilir. Ayrıca karışımların kalsiyum hidroksit (CH) ve kalsiyum silikat hidrat (CSH) jeli yapılarının bozulması da bu duruma ek olarak açıklanabilmektedir.

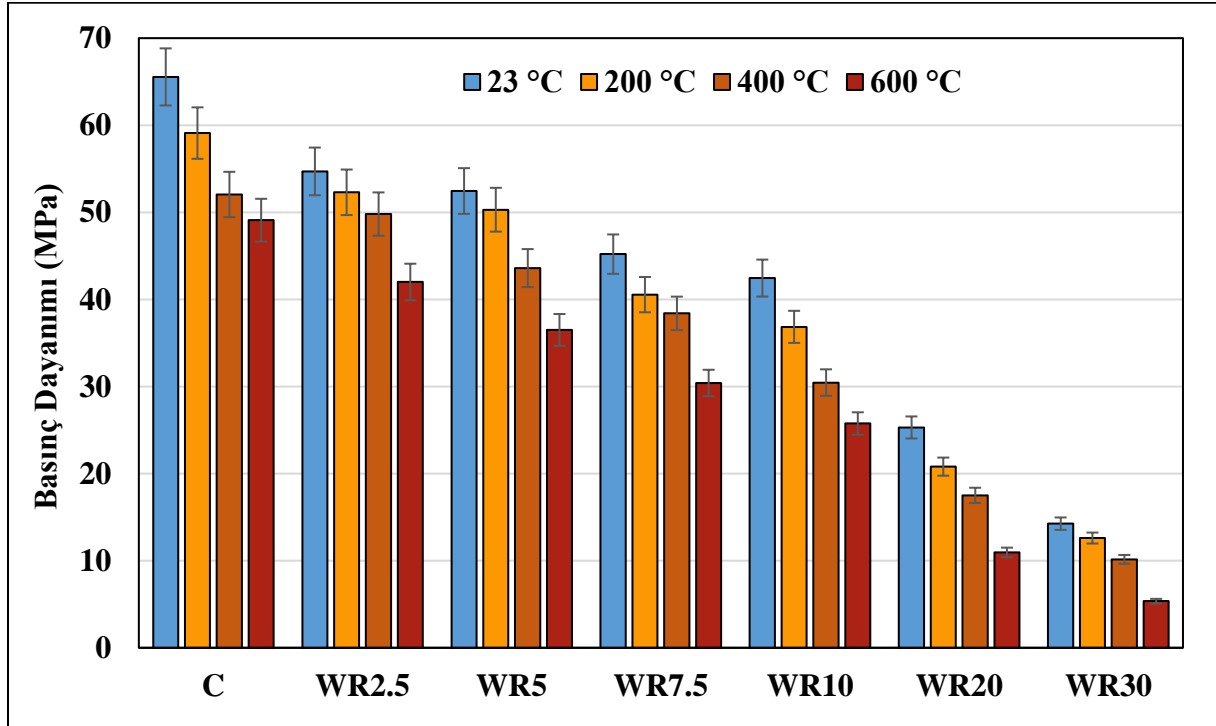
Basınç dayanımı

Çalışma kapsamında 150 x 150 x 150 mm boyutlarında küp şeklinde üretilen yapılan 28 günlük kür uygulanan SSB numunelerin yakım öncesi ve sonrası basınç dayanımları ASTM C39 (Anonymous 2023d) standartına göre belirlenmiştir. Numunelerin yakım öncesi ve sonrası basınç dayanım sonuçları Tablo 18 ile birlikte Şekil 84 ve Şekil 85'te verilmiştir. Her beton grubu için üç numune test edilmiş ve ortalama değer deneysel sonuç olarak kullanılmıştır.

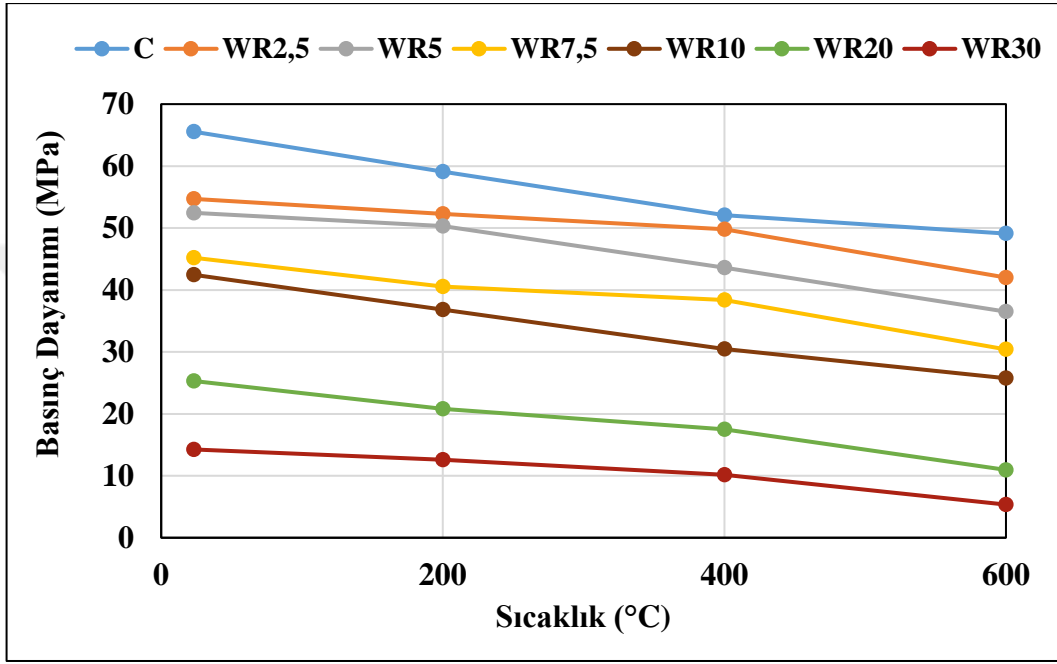
Tablo 18. SSB Numunelerin Yüksek Sıcaklık Basınç Dayanımları

Karışım	Atık Lastik İçeriği	Basınç Dayanımları (MPa)			
		23 °C	200 °C	400 °C	600 °C
C	%0	65,55	59,10	52,05	49,1
WR2,5	%2,5	54,70	52,30	49,80	42
WR5	%5	52,45	50,30	43,60	36,5
WR7,5	%7,5	45,20	40,55	38,40	30,4
WR10	%10	42,45	36,85	30,45	25,75
WR20	%20	25,30	20,80	17,50	10,95
WR30	%30	14,25	12,60	10,15	5,35

SSB numunelerin yakım öncesi ve sonrası basınç dayanım sonuçları incelendiğinde, numunelerin maruz kaldığı hedef sıcaklık arttıkça basınç dayanım sonuçlarında istikrarlı bir azalma meydana gelmiştir. Oda sıcaklığında elde edilen basınç dayanımı sonuçlarıyla karşılaştırıldığında atık lastik içermeyen kontrol (C) numunelerinde, 200 °C, 400 °C ve 600 °C sıcaklıklarda sırasıyla yaklaşık olarak %10, %20 ve %25 oranlarında dayanım kaybı meydana gelmiştir. %30 atık lastik katkılı (WR30) numunelerde ise 200 °C, 400 °C ve 600 °C sıcaklıklarda dayanım kaybı sırasıyla yaklaşık olarak %12, %29 ve %62 oranlarında gerçekleşmiştir. En fazla dayanım kaybı %62 oranla %30 atık lastik katkılı (WR30) numunelerde 600 °C'lik yakım sonrasında meydana gelmiştir. En az dayanım kaybı ise %4 oranla %5 atık lastik katkılı (WR5) numunelerde 200 °C'lik yakım sonrasında meydana gelmiştir.

**Şekil 84.** SSB numunelerin yüksek sıcaklık basınç dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.

Yüksek sıcaklık etkisi sonrası SSB numunelerin basınç dayanım sonuçları genel olarak incelendiğinde, yakım sıcaklığının artmasıyla basınç dayanımları azalmış, en fazla basınç dayanımı kaybı 600 °C hedef sıcaklıkta meydana gelmiştir. Atık lastik içeriği açısından sonuçlar incelendiğinde ise lastik içeriğinin artmasıyla sıcaklığa karşı direncin azaldığı ve en fazla basınç dayanım kayıplarının %30 atık lastik katkılı karışımlarda meydana geldiği belirlenmiştir. Şekil 85'te verilen basınç dayanımı-sıcaklık ilişkisinden sıcaklık ve atık lastik içeriğiyle basınç dayanımın birbirleriyle orantılı şekilde azaldığı da görülmektedir.



Şekil 85. SSB numunelerin yüksek sıcaklık basınç dayanımlarının sıcaklığa göre değişimi.

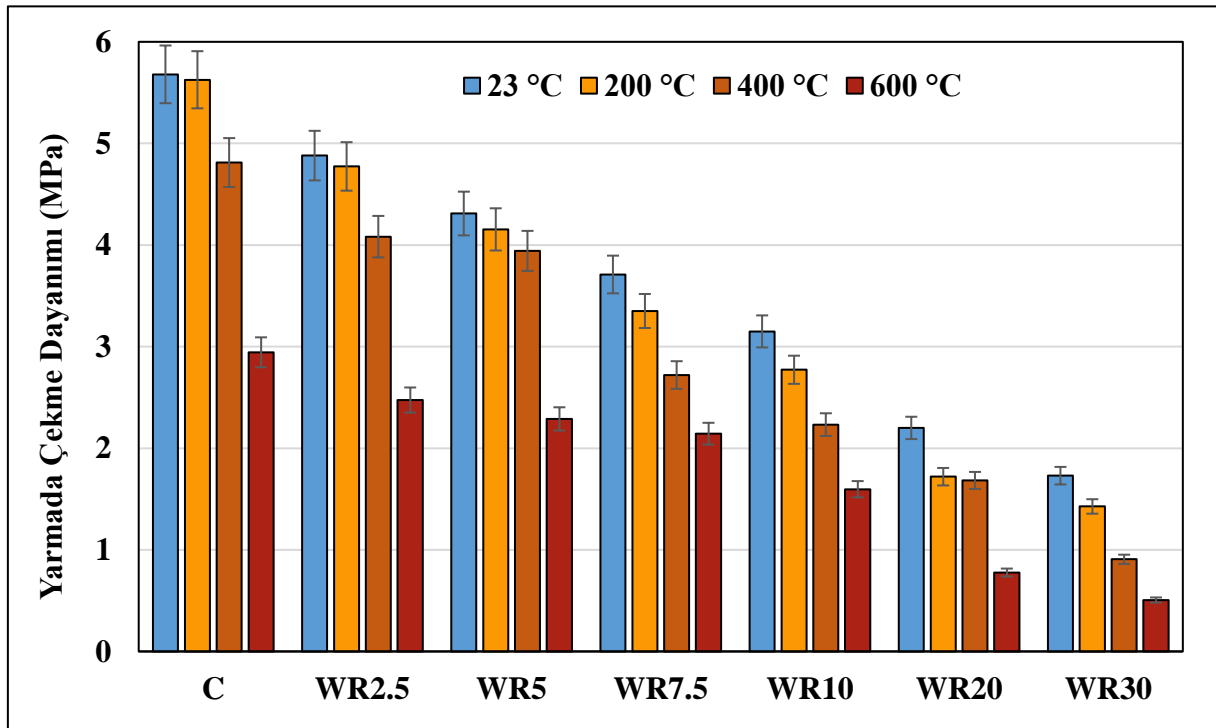
Yarmada çekme dayanımı

Çalışma kapsamında 100 x 200 mm boyutlarında silindir şeklinde üretilen 28 günlük kür uygulanan SSB numunelerin yakım öncesi ve sonrası yarmada çekme dayanımları ASTM C496 (Anonymous 2017d) standardına göre belirlenmiştir. Numunelerin yakım öncesi ve sonrası yarmada çekme dayanım sonuçları Tablo 19 ile birlikte Şekil 86 ve Şekil 87'de verilmiştir. Her beton grubu için üç numune test edilmiş ve ortalama değer deneysel sonuç olarak kullanılmıştır.

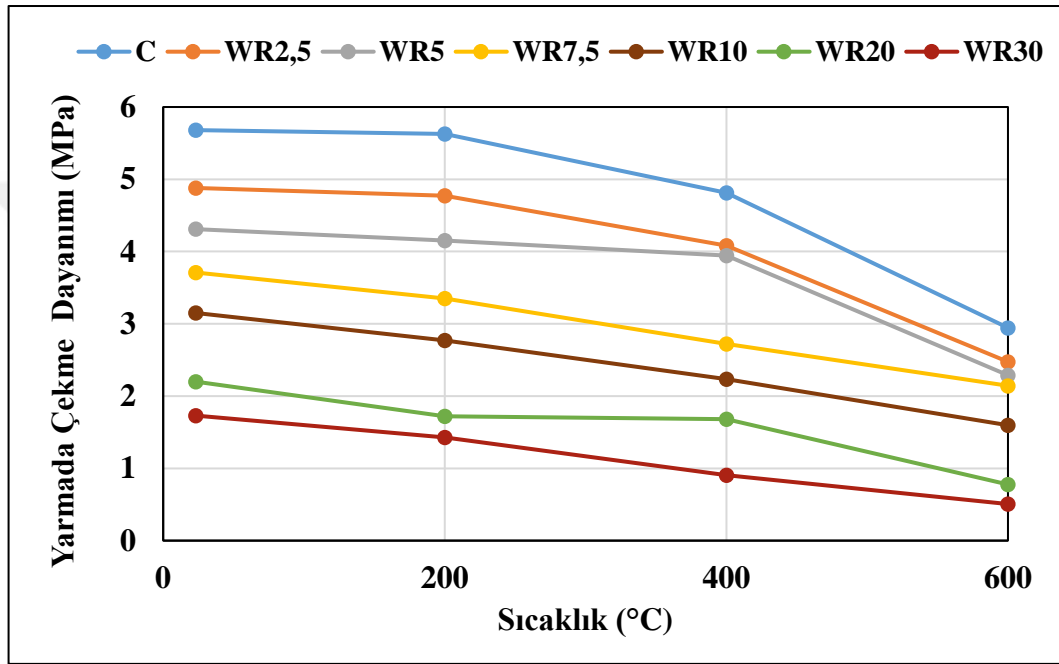
Tablo 19. SSB Numunelerin Yüksek Sıcaklık Yarmada Çekme Dayanımları

Karışım	Atık Lastik İçeriği	Yarmada Çekme Dayanımları (MPa)			
		23 °C	200 °C	400 °C	600 °C
C	%0	5,68	5,63	4,81	2,94
WR2,5	%2,5	4,88	4,77	4,08	2,47
WR5	%5	4,31	4,15	3,94	2,29
WR7,5	%7,5	3,71	3,35	2,72	2,14
WR10	%10	3,15	2,77	2,23	1,60
WR20	%20	2,20	1,72	1,68	0,78
WR30	%30	1,73	1,43	0,91	0,51

SSB numunelerin yakım öncesi ve sonrası yarmada çekme dayanım sonuçları, numunelerin maruz kaldığı hedef sıcaklığın artmasıyla dayanımlarda düşüş olduğunu göstermiştir. 23 °C sıcaklıkta elde edilen yarmada çekme dayanım sonuçlarıyla kıyaslandığında atık lastik içermeyen kontrol (C) numunelerinde, 200 °C, 400 °C ve 600 °C sıcaklıklarda sırasıyla yaklaşık olarak %1, %15 ve %48 oranlarında dayanım kaybı meydana gelmiştir. %30 atık lastik katkılı (WR30) numunelerde ise 200 °C, 400 °C ve 600 °C hedef sıcaklıklarda dayanım kayıpları sırasıyla yaklaşık olarak %17, %47 ve %71 oranlarında gerçekleşmiştir. En fazla dayanım kaybı %71 oranla %30 atık lastik katkılı (WR30) numunelerde 600 °C'lik yakım sonrasında meydana gelmiştir. En az dayanım kaybı ise %1 oranla lastik içermeyen (C) kontrol numunelerinde 200 °C'lik yakım sonrasında meydana gelmiştir.

**Şekil 86.** SSB numunelerin yüksek sıcaklık yarmada çekme dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.

SSB numunelerin yarmada çekme dayanım sonuçları genel olarak incelendiğinde, yakım sıcaklığının artmasıyla yarmada çekme dayanımları azalmış, en fazla yarmada çekme dayanımı kaybı 600 °C hedef sıcaklıkta meydana gelmiştir. Atık lastik içeriği açısından sonuçlar incelendiğinde ise lastik içeriğinin artmasıyla sıcaklığa karşı direncin azaldığı ve en fazla yarmada çekme dayanım kayıplarının %30 atık lastik katkılı karışımlarda meydana geldiği belirlenmiştir. Şekil 85’de verilen yarmada çekme dayanımı-sıcaklık ilişkisinden sıcaklık ve atık lastik içeriğiyle yarmada çekme dayanımın birbirleriyle orantılı şekilde azaldığı da görülmektedir.



Şekil 87. SSB numunelerin yüksek sıcaklık yarmada çekme dayanımlarının sıcaklığa göre değişimi.

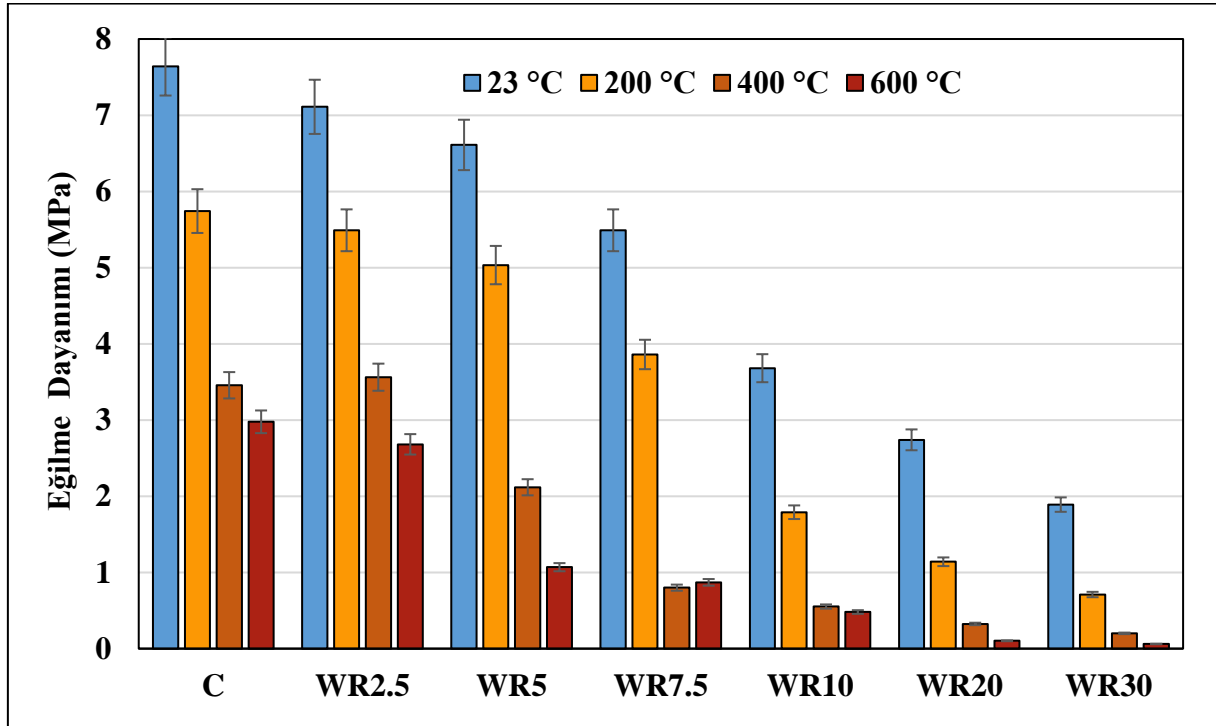
Eğilme dayanımı

Çalışma kapsamında 100 x 100 x 400 mm boyutlarında kiriş şeklinde üretimi yapılan 28 günlük kür uygulanan SSB numunelerin yakım öncesi ve sonrası eğilme dayanımları ASTM C78 (Anonymous 2010b) standardına göre belirlenmiştir. Numunelerin yakım öncesi ve sonrası eğilme dayanım sonuçları Tablo 20 ile birlikte Şekil 88 ve Şekil 89’da verilmiştir. Her beton grubu için üç numune test edilmiş ve ortalama değer deneysel sonuç olarak kullanılmıştır.

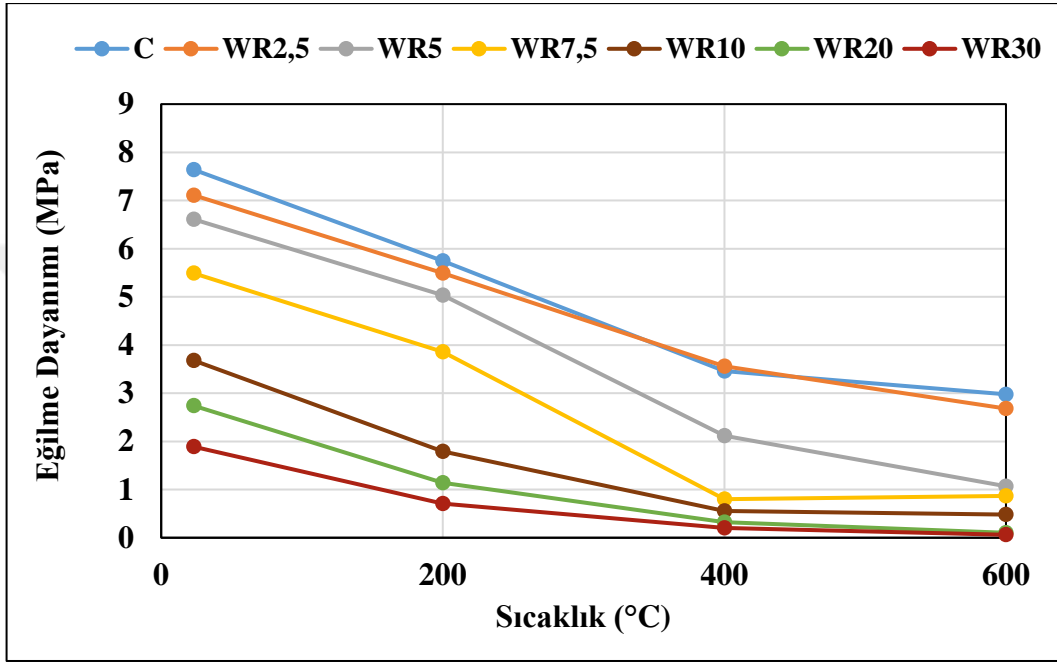
Tablo 20. SSB Numunelerin Yüksek Sıcaklık Eğilme Dayanımları

Karışım	Atık Lastik İçeriği	Eğilme Dayanımları (MPa)			
		23 °C	200 °C	400 °C	600 °C
C	%0	7,64	5,74	3,46	2,98
WR2,5	%2,5	7,11	5,49	3,56	2,68
WR5	%5	6,61	5,03	2,12	1,07
WR7,5	%7,5	5,49	3,86	0,80	0,87
WR10	%10	3,68	1,79	0,55	0,48
WR20	%20	2,74	1,14	0,32	0,10
WR30	%30	1,89	0,71	0,20	0,06

SSB numunelerin yakım öncesi ve sonrası eğilme dayanım sonuçları incelendiğinde, numunelerin maruz kaldığı hedef sıcaklık arttıkça eğilme dayanım sonuçlarında istikrarlı bir azalma meydana gelmiştir. Oda sıcaklığında elde edilen eğilme dayanımı sonuçlarıyla karşılaştırıldığında atık lastik içermeyen kontrol (C) numunelerinde, 200 °C, 400 °C ve 600 °C sıcaklıklarda sırasıyla yaklaşık olarak %25, %55 ve %61 oranlarında dayanım kaybı meydana gelmiştir. %30 atık lastik katkılı (WR30) numunelerde ise 200 °C, 400 °C ve 600 °C sıcaklıklarda dayanım kaybı sırasıyla yaklaşık olarak %62, %89 ve %97 oranlarında gerçekleşmiştir. En fazla dayanım kaybı %7 oranla %30 atık lastik katkılı (WR30) numunelerde 600 °C'lik yakım sonrasında meydana gelmiştir. En az dayanım kaybı ise %22 oranla %2,5 atık lastik katkılı (WR2,5) numunelerde 200 °C'lik yakım sonrasında meydana gelmiştir.

**Şekil 88.** SSB numunelerin yüksek sıcaklık eğilme dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.

Yüksek sıcaklık etkisi sonrası SSB numunelerin eğilme dayanım sonuçları genel olarak incelendiğinde, yakım sıcaklığının artmasıyla eğilme dayanımları azalmış, en fazla eğilme dayanımı kaybı 600 °C hedef sıcaklıkta meydana gelmiştir. Atık lastik içeriği açısından sonuçlar incelendiğinde ise lastik içeriğinin artmasıyla sıcaklığa karşı direncin azaldığı ve en fazla eğilme dayanım kayıplarının %30 atık lastik katkılı karışımlarda meydana geldiği belirlenmiştir. Şekil 87’de verilen eğilme dayanımı-sıcaklık ilişkisinden sıcaklık ve atık lastik içeriğiyle eğilme dayanımın birbirleriyle orantılı şekilde azaldığı da görülmektedir.



Şekil 89. SSB numunelerin yüksek sıcaklık eğilme dayanımlarının sıcaklığa göre değişimi.

Dayanım sonuçları birlikte değerlendirildiğinde, hedef sıcaklıklara çıkıldıkça en çok dayanım kayıp oranlarının meydana geldiği sonuçların sırasıyla eğilme, yarmada çekme ve basınç dayanımlarında olduğu belirlenmiştir. Atık lastik içermeyen kontrol (C) karışımlarında 600 °C hedef sıcaklık sonrası basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanım kayıp oranları sırasıyla %25, %48 ve %61 oranlarında gerçekleşmiştir. Bu kayıplar aynı hedef sıcaklığında %10 atık lastik katkılı karışımlarda sırasıyla %39, %49 ve %87 oranlarında ve %30 atık lastik katkılı karışımlarda sırasıyla %62, %71 ve %97 oranlarında gerçekleşmiştir. Buna benzer durum yüksek sıcaklık etkisi sonrası kütle değişimleri sonuçlarında da gözlemlenmiştir. Boyut etkisinin önemli olduğu bu durumda, numunelerin her ne kadar maruz kaldığı hedef sıcaklık aynı olsa da daha küçük kesitlere sahip silindir ve kiriş numunelerde yüksek sıcaklığın etkisi daha fazla görülmektedir. Bu da dayanım sonuçlarındaki kayıp oranlarının artma sebebi olarak gösterilebilmektedir.

Literatürde atık lastik katkılı betonlarda yüksek sıcaklık etkisiyle basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarındaki davranışları inceleyen çalışmalar mevcuttur. Ma *et al.*

(2023b), atık cam ve atık lastik katkılı betonun 700 °C'ye kadar yüksek sıcaklık sonrası davranışlarını incelemişlerdir. %30 atık lastik katkılı betonların 600 °C yakım sonrası basınç dayanımlarında %27 oranda dayanım kaybı yaşadığı belirtilmiştir. Ayrıca yarmada çekme dayanım sonuçlarında %51 oranda dayanım kaybı da gözlemlenmiştir. Zhou *et al.* (2023), atık lastik ve polipropilen katkılı betonlarda yüksek sıcaklık etkisini 600 °C'ye kadar yakma prosedürü uygulayarak incelemişlerdir. %15 atık lastik katkılı betonlarda 600 °C yakım sonrası basınç dayanım kayıp oranı yaklaşık olarak %68 bulunmuştur. Atık lastik elyaf katkılı betonun yüksek sıcaklık performansının incelendiği çalışmada, %25'e kadar lastik elyaf katkılı karışımlar 800 °C'ye kadar farklı süreler boyunca (30 dk 60 dk ve 120 dk) yüksek sıcaklığa maruz bırakılmıştır. %25 atık lastik elyaf katkılı betonlarda 600 °C yakımda 60 dk boyunca yüksek sıcaklığa maruz kalmış karışımların basınç dayanımı kayıpları %70 olarak belirlenmiştir (Gupta *et al.* 2017). Kuang *et al.* (2023), kauçuk katkılı geopolimer betonlarda 800 °C'ye kadar yüksek sıcaklık etkisini araştırmıştır. %5 oranında farklı boyutlarda katılan atık kauçuklu betonların yüksek sıcaklık performansının incelendiği çalışmada, 600 °C yakım sonrası numunelerin eğilme dayanımlarında %64 ile %72 arasında azalma meydana gelmiştir.

Yapılan çalışmada sıcaklığın artmasıyla tüm karışımların basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımlarında düşüş belirlenmiştir. Dayanım azalmasının temel nedeni kauçuk parçacıklarının yanmasından kaynaklanan boşluklu yapının artmasıdır. Ayrıca yüksek sıcaklıklarda, CH, CSH, agrega parçalanması ve matrisin mikroyapısal çatlaması gibi beton bileşenlerinin ayrışması da aynı anda meydana gelir ve bu da büyük mukavemet kaybına katkıda bulunabilmektedir.

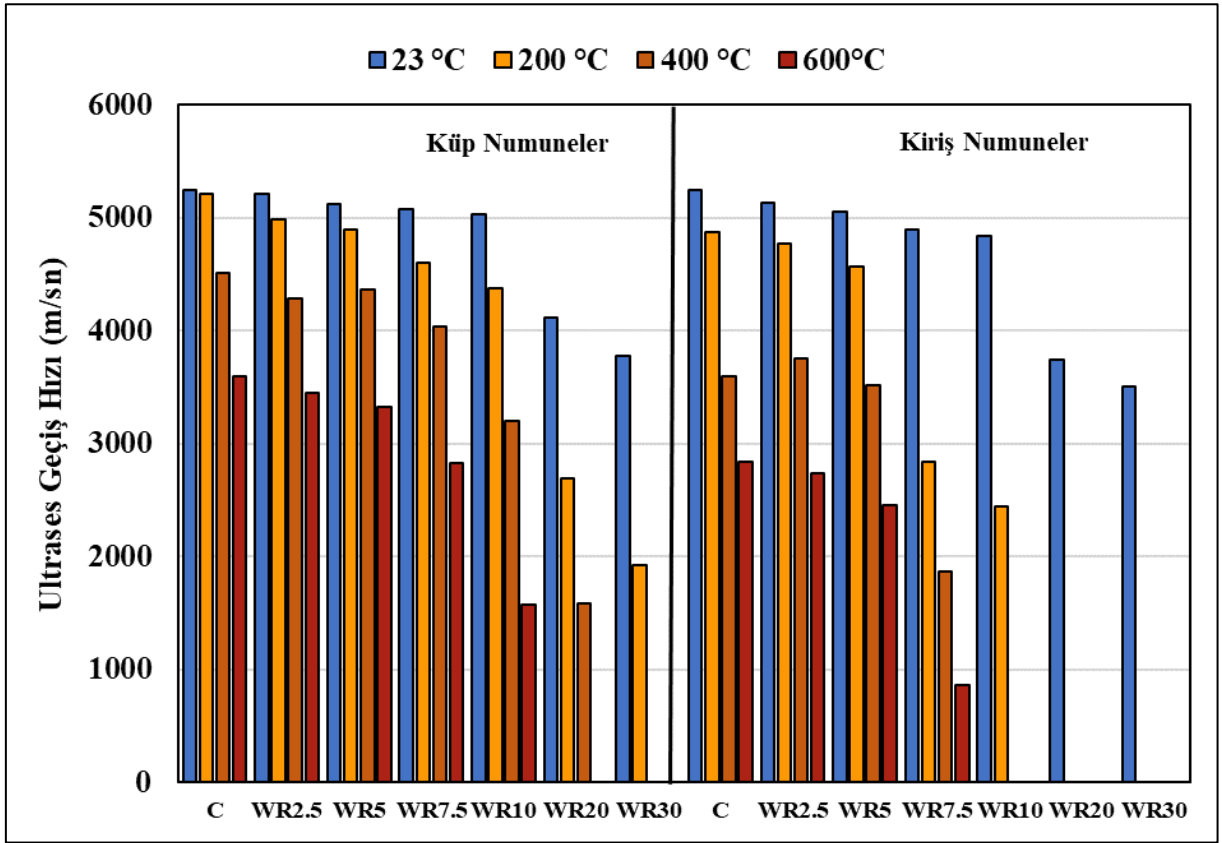
Ultrases geçiş hızı

Çalışma kapsamında 150 x 150 x 150 mm ve 100 x 100 x 400 mm boyutlarında küp ve kiriş şeklinde olmak üzere üretimi yapılan 28 günlük SSB numunelerin yakım öncesi ve sonrası UPV değerleri ASTM C597 (Anonymous 2023f) standardına göre ölçülmüştür. Numunelerin yakım öncesi ve sonrası UPV sonuçları Tablo 21 ve Tablo 22 ile birlikte Şekil 90, Şekil 91 ve Şekil 92'de verilmiştir. Her beton grubu için üç numune test edilmiş ve ortalama değer deneysel sonuç olarak kullanılmıştır.

Tablo 21. SSB Küp Numunelerin Yüksek Sıcaklık UPV Sonuçları

Karışım	23 °C		200 °C		400 °C		600 °C	
	Ultrases Geçiş Süresi (µs)	Ultrases Geçiş Hızı (m/sn)	Ultrases Geçiş Süresi (µs)	Ultrases Geçiş Hızı (m/sn)	Ultrases Geçiş Süresi (µs)	Ultrases Geçiş Hızı (m/sn)	Ultrases Geçiş Süresi (µs)	Ultrases Geçiş Hızı (m/sn)
C	28,60	5244,8	28,80	5208,3	33,20	4518,1	41,65	3601,4
WR2,5	28,80	5208,3	30,05	4991,7	34,95	4291,8	43,45	3452,2
WR5	29,30	5119,5	30,60	4902,0	34,35	4366,8	45,10	3325,9
WR7,5	29,55	5076,1	32,60	4601,2	37,10	4043,1	53,00	2830,2
WR10	29,80	5033,6	34,25	4379,6	46,90	3198,3	95,00	1578,9
WR20	36,45	4115,2	55,65	2695,4	94,50	1587,3	-	-
WR30	39,70	3778,3	77,90	1925,5	-	-	-	-

SSB küp numunelerin yakım öncesi ve sonrası elde dilen UPV değerleri incelendiğinde, numunelerin maruz kaldığı hedef sıcaklık arttıkça UPV sonuçlarında istikrarlı bir azalma meydana gelmiştir. Atık lastik içermeyen kontrol numunelerinin (C) başlangıç UPV değerleri yaklaşık olarak 5245 m/sn iken bu değer 600 °C'lik yüksek sıcaklık etkisi sonrası %29 oranında azalarak 3601 m/sn'ye kadar gerilemiştir. %30 atık lastik katkılı (WR30) numunelerin UPV sonuçları incelendiğinde 400 °C ve 600 °C'lik yüksek sıcaklık etkisi sonrası UPV sonuçları ölçülememiştir. Benzer durum %20 atık lastik katkılı (WR20) numunelerinde de gözlemlenmiştir. WR20 numunelerinin 600 °C'lik yüksek sıcaklık etkisi sonrası UPV sonuçları ölçülememiştir. 600 °C'lik hedef sıcaklık sonrası UPV değerleri ölçülebilen en yüksek atık lastik katkılı SSB karışımlar, %10 atık lastik katkılı (WR10) numuneleri olmuştur. Ancak WR10 numunelerinin UPV değerleri de başlangıç UPV değerleriyle kıyaslandığında 600 °C'lik yüksek sıcaklık etkisi sonucu %69 oranında azalarak 1579 m/sn'ye kadar gerilemiştir.



Şekil 90. SSB numunelerin yüksek sıcaklık UPV değerlerinin atık lastik oranına göre değişimi.

Tablo 22. SSB Kiriş Numunelerin Yüksek Sıcaklık UPV Sonuçları

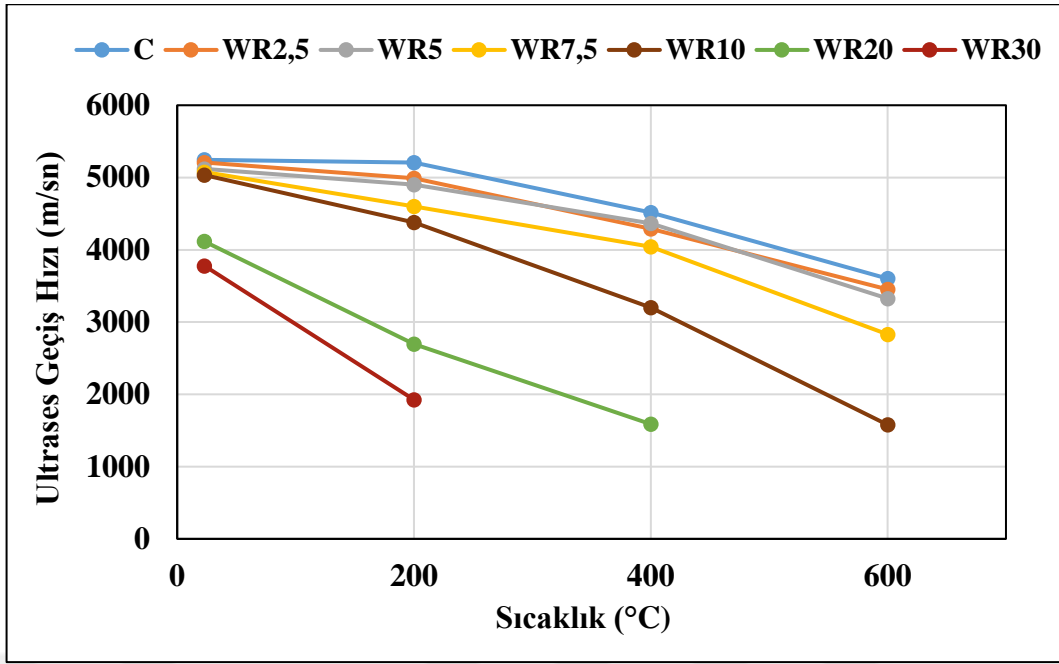
Karışım	23 °C		200 °C		400 °C		600 °C	
	Ultrases Geçiş Süresi (µs)	Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)	Ultrases Geçiş Süresi (µs)	Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)	Ultrases Geçiş Süresi (µs)	Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)	Ultrases Geçiş Süresi (µs)	Ultrases Geçiş Hızı (km/sn)
C	76,30	5242,5	82,05	4875,1	111,05	3602,0	140,75	2841,9
WR2,5	77,85	5138,1	83,75	4776,1	106,40	3759,4	146,20	2736,0
WR5	79,10	5056,9	87,50	4571,4	113,70	3518,0	163,10	2452,5
WR7,5	81,65	4899,0	140,65	2843,9	214,00	1869,2	463,00	863,9
WR10	82,60	4842,6	163,55	2445,7	-	-	-	-
WR20	106,80	3745,3	-	-	-	-	-	-
WR30	114,00	3508,8	-	-	-	-	-	-

SSB kiriş numunelerin UPV değerleri küp numunelerle benzer davranış göstermiş olup maruz kaldığı hedef sıcaklık arttıkça UPV sonuçlarında istikrarlı bir azalma meydana gelmiştir. Atık lastik katılmayan kontrol numunelerinin (C) başlangıç UPV değerleri yaklaşık olarak 5242 m/sn iken bu değer 600 °C'lik yüksek sıcaklık etkisi sonrası %45 oranında azalarak 2842 m/sn'ye kadar gerilemiştir. %20 ve %30 atık lastik katkılı (WR20 ve WR30) numunelerin UPV sonuçları incelendiğinde 200 °C, 400 °C ve 600 °C'lik yüksek sıcaklık etkisi sonrası UPV sonuçları ölçülemedi. Benzer durum %10 atık lastik katkılı (WR10)

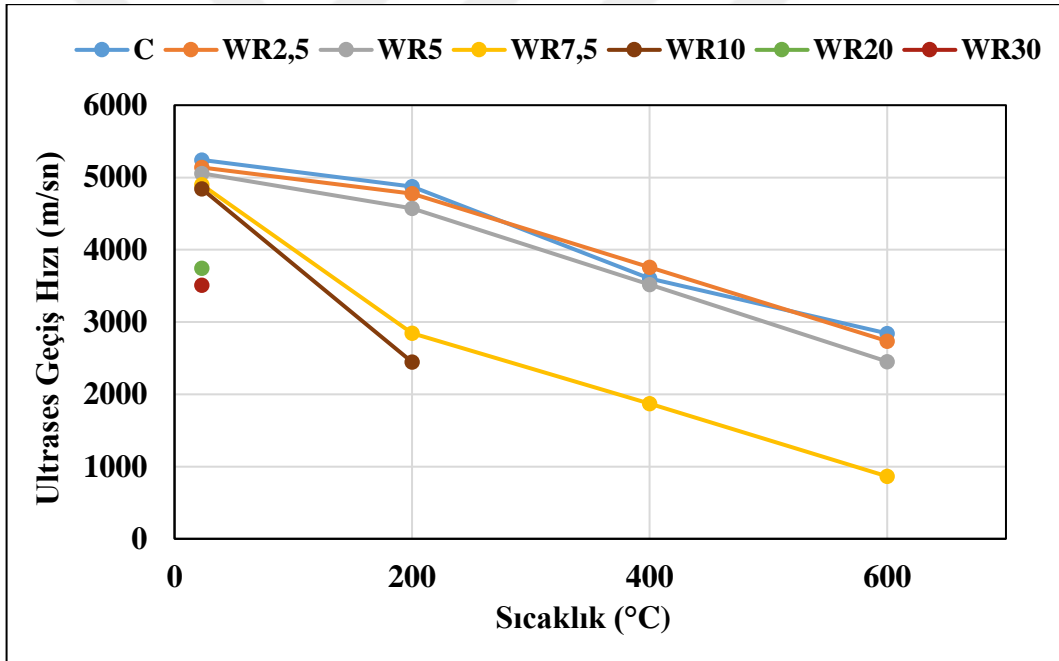
numunelerinde de gözlemlenmiştir. WR10 numunelerinin ise 400 °C ve 600 °C'lik yüksek sıcaklık etkisi sonrası UPV sonuçları ölçülememiştir. 600 °C'lik hedef sıcaklık sonrası UPV değerleri ölçülebilen en yüksek atık lastik katkılı SSB karışımlar, %7,5 atık lastik katkılı (WR7,5) numuneleri olmuştur. WR7,5 numunelerinin UPV değerleri de başlangıç UPV değerleriyle kıyaslandığında 600 °C'lik yüksek sıcaklık etkisi sonucu %82 oranında azalarak 864 m/sn'ye kadar gerilemiştir.

UPV-sıcaklık değişim ilişkileri Şekil 89 ve Şekil 90'da verilen SSB küp ve kırı ş numunelerin yüksek sıcaklık etkisi sonrası UPV değerlerinin sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde hedef yakım sıcaklığının artmasıyla UPV değerlerinde önemli düşüşler meydana gelmiştir. Kütle kaybında olduğu gibi yüksek sıcaklık etkisi altında UPV değerleri üzerinde numune şekil ve boyutunun etkili bir parametre olduğu belirlenmiştir. Kırı ş numuneler, küp numunelerden daha küçük en kesit alanına sahip olduğundan dolayı hedef yüksek sıcaklıktan daha fazla olumsuz etkilenmiştir. Bu durum atık lastik içeriğinin artmasıyla daha da etkili bir hale gelmiştir. Küp numunelerde 600 °C yakım sıcaklığı sonrası %10 atık lastik katkılı numunelere (WR10) kadar UPV değerleri ölçülebilirken, kırı ş numunelerde en fazla %7,5 atık lastik katkılı numunelerde (WR7,5) UPV ölçümü yapılabilmektedir.

Beton karışımının iç bütünlüğü korunduğunda ultrases geçişin diğer tarafa olan mesafesi daha kısa olup ve yayılma hızı da daha hızlı olmaktadır. Yüksek sıcaklığa maruz bırakıldığında oluşan matris çatlaklar veya gözenekler ultrasesin yayılma yolu uzayıp yayılma hızı yavaşlamaktadır (Kuang *et al.* 2023). Literatürde atık lastik katkılı betonlarda yüksek sıcaklık sonrası UPV davranışının incelendiği çalışmalar çok kısıtlı olmakla birlikte. Ma *et al.* (2023b), atık cam ve atık lastik katkılı betonun 700 °C'ye kadar yüksek sıcaklık sonrası davranışlarını incelemiştir. %30 atık lastik katkılı betonların 600 °C yakım sonrası UPV değerlerinde %70 oranda düşüş olduğu belirtilmiştir. Bu çalışmada da sıcaklığın etkisiyle birlikte atık lastik içeriğinin artması tüm karışımlarda UPV değerlerin önemli düşüşlere neden olmuştur. Özellikle 200 °C'den sonra atık lastik parçalarının yanmasıyla dolayısıyla gözenekli ağların ve çatlakların oluşması bu düşüşlerin ana nedeni olarak kabul edilmektedir. Mikro çatlaklardaki ve gözenek hacmindeki artışlar da yüksek sıcak etkisiyle hidrasyon ürünü bileşenlerinin termal ayrışmasından kaynaklanmaktadır.



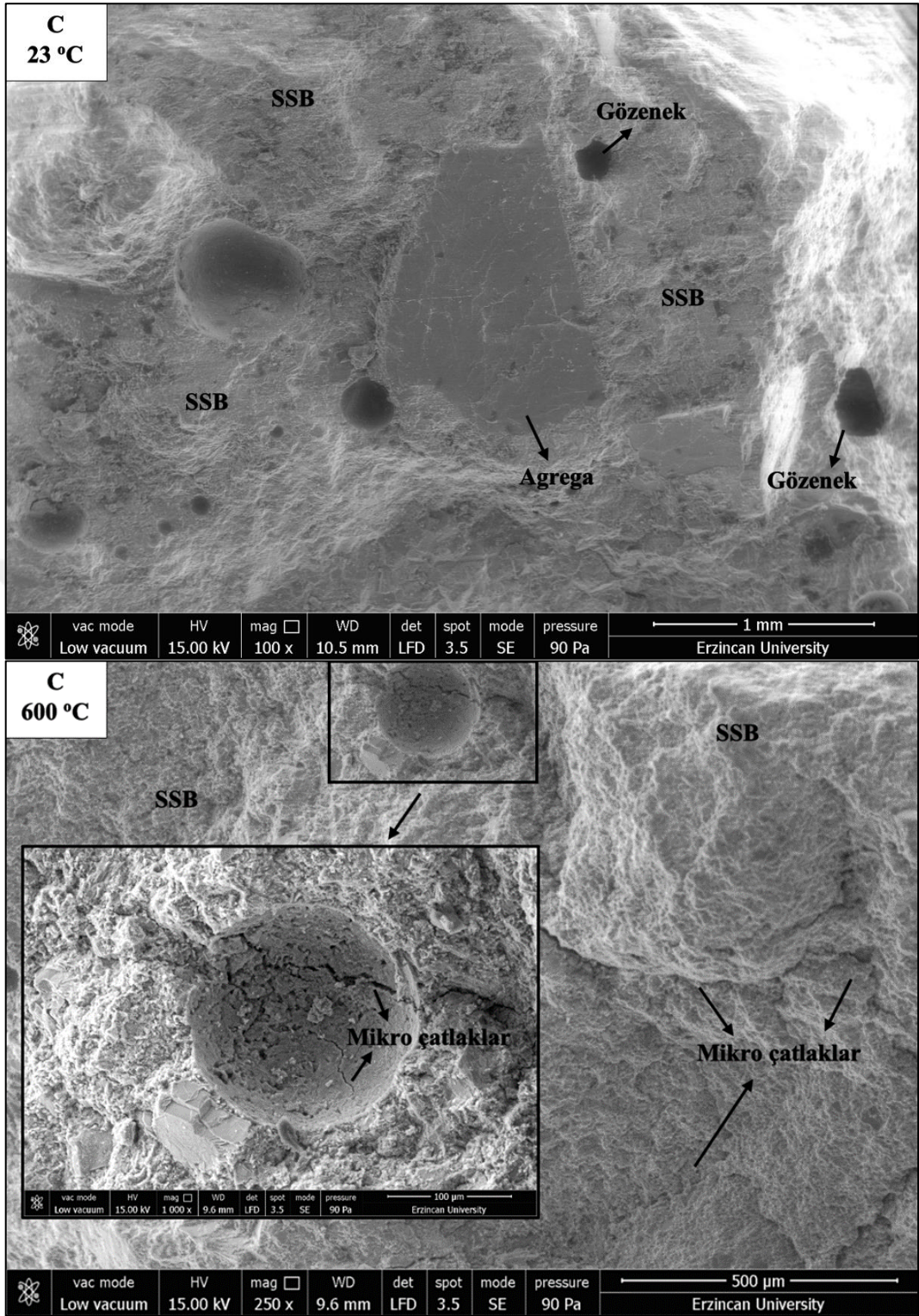
Şekil 91. SSB küp numunelerin yüksek sıcaklık UPV değerlerinin oranına göre değişimi.



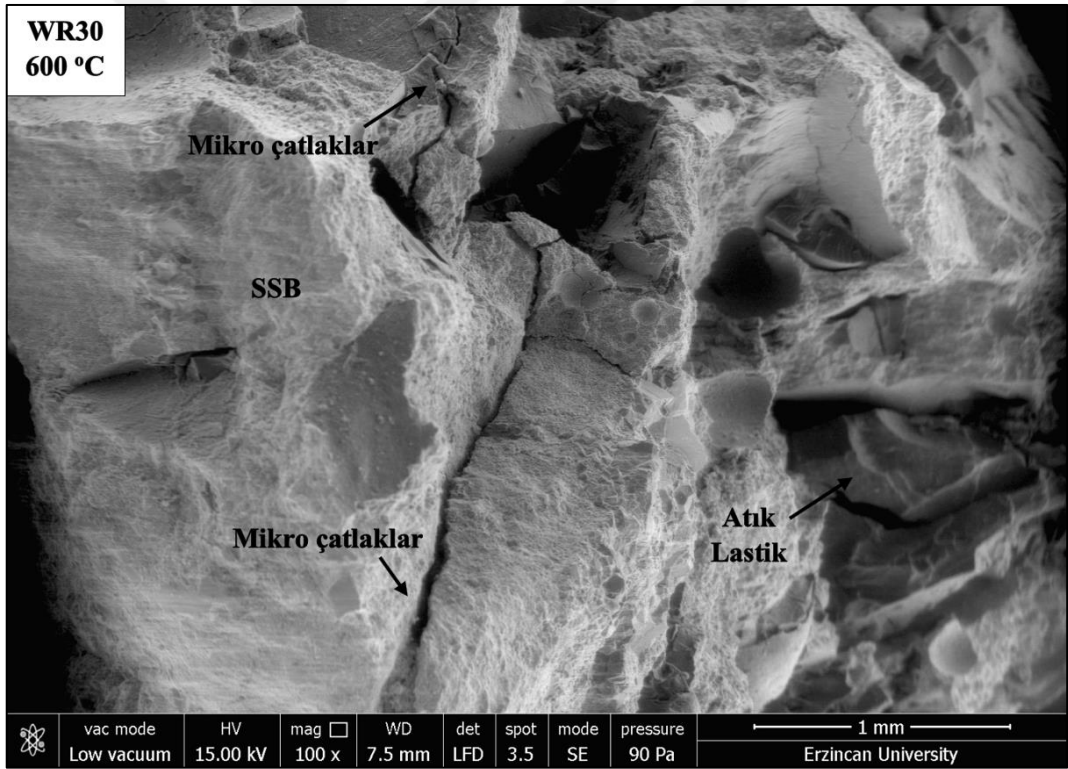
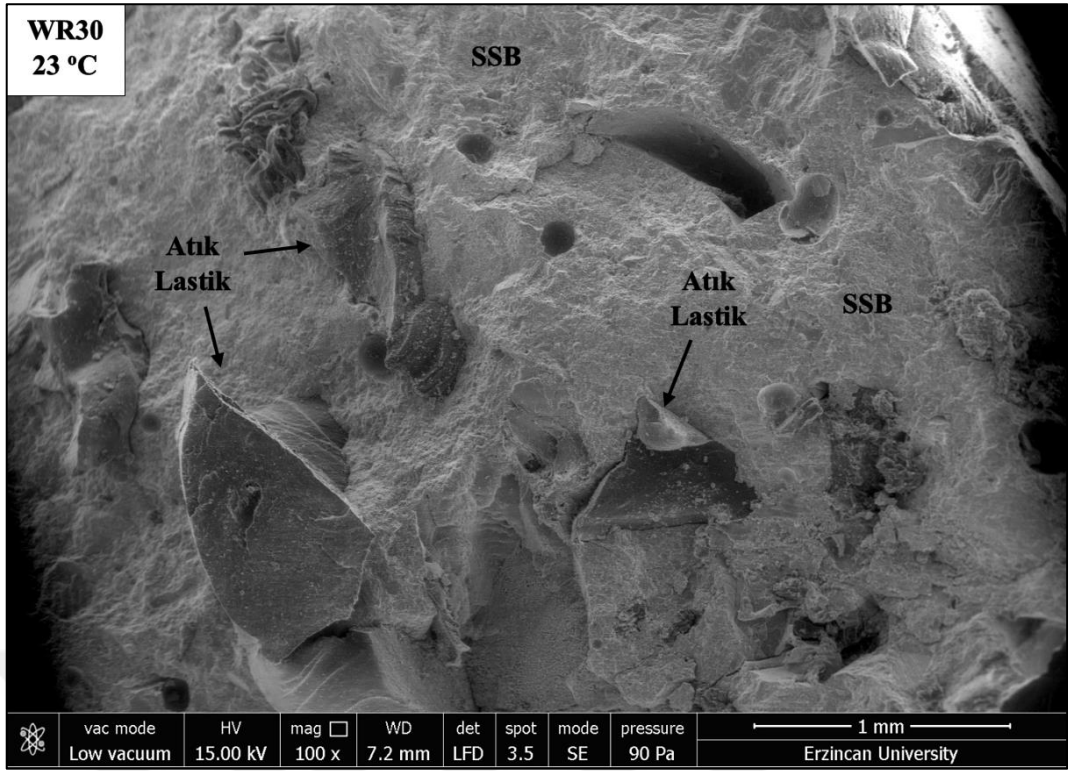
Şekil 92. SSB kiriş numunelerin yüksek sıcaklık UPV değerlerinin sıcaklığa göre değişimi.

Mikroyapı analizi

Çalışmada, yüksek sıcaklığın atık lastikli SSB kaplamaların üzerindeki etkisini mikroyapı analizi ile incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Bu kapsamda atık lastik içermeyen kontrol numuneleri (C) ile %30 atık lastik katkılı numunelerin (WR30) 23°C'lik ortam sıcaklığındaki ve 600 °C hedef yakım sıcaklığı sonrası SEM görüntüleri ele alınmıştır. Şekil 93 ve Şekil 94'te numunelerin yakım öncesi ve sonrası SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 93. Kontrol SSB numunelerin (C) yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri.



Şekil 94. %30 atık lastik katkılı SSB numunelerin (WR30) yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası SEM görüntüleri.

Mevcut çalışmalar, sertleşmiş matrisin mekanik ve fiziksel performansının, mikro yapıdaki değişimle yakından ilişkili olduğunu saptamıştır. Normal sıcaklıkta lastik ile çimento macunu ara yüzeyinde önemli bir boşluğun ortaya çıktığı daha önce gözlemlenmiştir. Bu, polar olmayan lastiğin hidrofobik doğasıyla ilişkilidir. Bu durum da atık lastik ile çimento

matrisi arasında zayıf bir bağın meydana geldiği anlamına gelmektedir. 600 °C'ye kadar çeşitli sıcaklıklarda lastik ile çimento macunu arayüzünün kalınlığının arttığı gözlemlenmiştir.

600 °C'ye maruz kaldıktan sonra mikro yapıda çatlak ve gözenek büyümesi görülmüştür. Çimento matrisinin termal genişmesi, çimento ve agrega arasındaki bağın yerel olarak bozulmasına neden olmuş, hamurun mikro yapısı ciddi şekilde bozulmuştur. 600 °C'de lastik parçacıklarının çevresinde mikro çatlaklar belirip dışarıya doğru yayıldığında birleşik gözenek-mikro çatlak ağının oluştuğu görülmektedir. Yüksek sıcaklık sonrası atık lastik parçacıklarının çimento matrisinden tamamen ayrıldığı tespit edilmiştir.

Donma-Çözünme Etkisi Sonuçları

SSB karışımların donma-çözünme etkisine karşılık davranışlarını belirlemek amacıyla 28 günlük kür süresinden sonra ASTM C 666 (Anonymous 2017e) standardına uygun olarak donma-çözünme kabiniinde 300 döngüelik donma-çözünmeye tabi tutulan numunelere görsel analiz, kütle değişimi, mekanik özellik, UPV ve mikroyapı analizi deney ve analizleri yapılmıştır. Elde edilen bu deney sonuçları ve analizler aşağıda detaylı olarak el alınmıştır.

Görsel analiz

Çalışma kapsamında 100 x 200 mm boyutlarında silindir şeklinde üretimi yapılan SSB numunelerin donma-çözünme sonrası görsel analizi için tüm numuneler donma-çözünme etkisi sonrası görsel olarak incelenmiş ve her numunenin yüzeyi herhangi bir görsel çatlak, dökülme ve renk değişikliği açısından kontrol edilmiştir. SSB numunelerin 100, 200 ve 300 donma-çözünme döngüleri sonrası maruz kaldıktan sonraki görsel karşılaştırılması Şekil 97'de verilmiştir.

Numuneler incelendiğinde 100, 200 ve 300 döngü sonrası beton yüzeyinde belirgin bir renk değişikliği meydana gelmediği gözlemlenmiştir. Atık lastik içeriğinin düşük olduğu numunelerde 300 döngü sırasında yüzey çatlakları görülmezken %10 atık lastik katkılı numunelerden (WR10) itibaren Şekil 95'te gösterildiği gibi gözle görülebilen yüzey çatlakları belirlenmiştir. Atık lastik içeriği arttıkça numunelerin yüzeylerinde meydana gelen çatlaklarda artma, genişliklerinde ise büyüme gözlemlenmiştir.

Şekil 96'da verilen donma-çözünmeye maruz kalan numunelerin yakın çekim görselleri incelendiğinde, özellikle de atık lastik içeriğinin fazla olduğu karışım numunelerinde donma-çözünme etkisinden dolayı yüzey pullanmaları meydana gelmiştir. Atık lastik içeriğinin ve donma-çözünme döngü sayısının artmasıyla yüzeylerde oluşan bu

pullanmaların sayılarında ve büyüklüklerinde artışlar gözlemlenmiştir. Beton yüzeyinde oluşan pul yapılarının dökülmesiyle alttaki atık lastik varlıkları ortaya çıkmıştır.

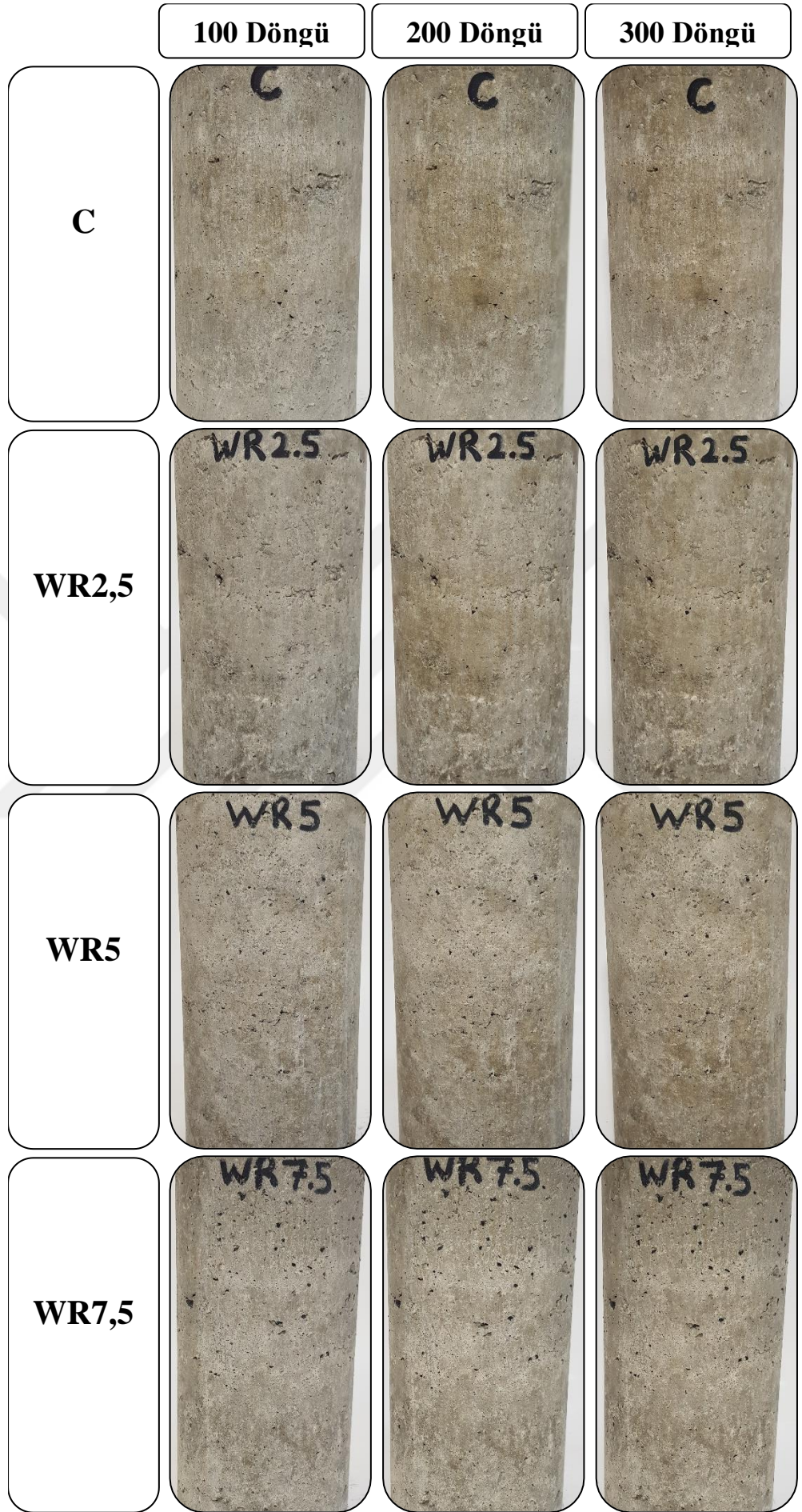


Şekil 95. 300 donma-çözünme döngü sonrası SSB numunelerindeki yüzey çatlakları.

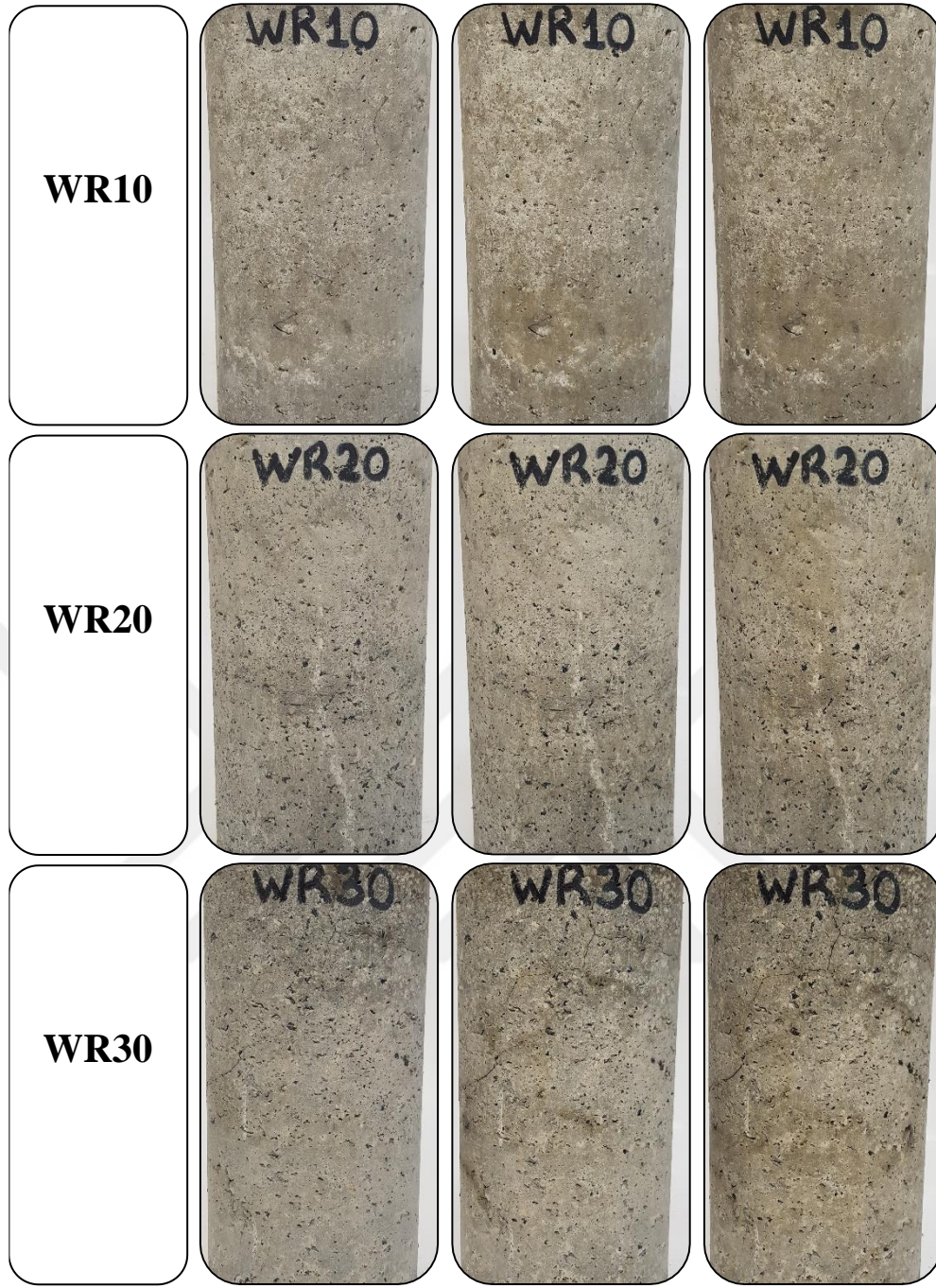


Şekil 96. Donma-çözünme döngülerine maruz kalan SSB numunelerde meydana gelen pullanmalar.

Donma-çözünme döngüleri sonrası numune görselleri genel olarak değerlendirildiğinde, numunelerin yüzeylerinde belirgin bir renk değişikliği meydana gelmediği, %10 atık lastik katkılı SSB numunelerden (WR10) itibaren gözle görülebilen yüzey çatlaklarının ve pullanmalar sonucu dökülmelerin meydana geldiği gözlemlenmiştir.



Şekil 97. Donma-çözünme döngülerine maruz kalan SSB numunelerin görsel karşılaştırılması



Şekil 97. Donma-çözünme döngülerine maruz kalan SSB numunelerin görsel karşılaştırılması (devamı).

Kütle değişimi

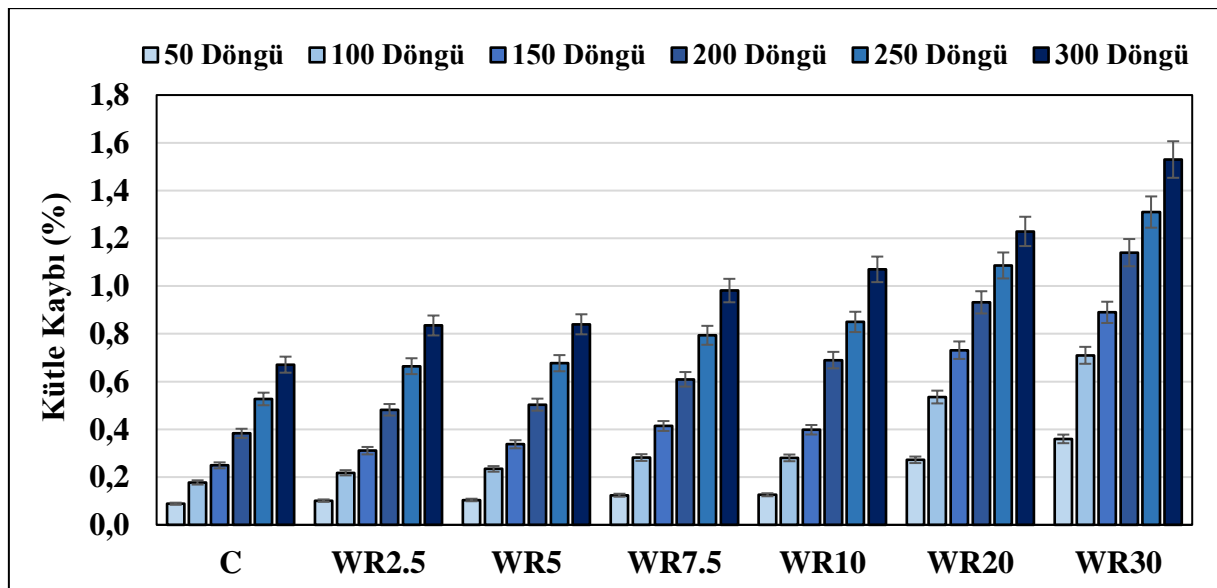
Çalışma kapsamında 100 x 200 boyutlarında silindir şeklinde olmak üzere üretimi yapılan 28 günlük SSB numunelerin donma-çözünme döngüleri öncesi başlangıç ağırlıkları belirlendikten sonra kütle değişimini incelemek amacıyla 300 donma-çözünme döngüsüne kadar her 50 donma-çözünme döngü sonrası 0,1 gr hassasiyetine sahip terazi kullanılarak kütleleri belirlenmiştir. SSB numunelerde donma-çözünme sonrası meydana gelen kütle değişimleri negatif olarak kayıp şeklinde gerçekleşmiş olup yüzde olarak sonuçlar Tablo 23

ile birlikte Şekil 98 ve Şekil 99’da verilmiştir. Her beton grubu için üç numune test edilmiş ve ortalama değer deneysel sonuç olarak kullanılmıştır.

Tablo 23. SSB Numunelerin Donma-Çözünme Kütle Kayıpları

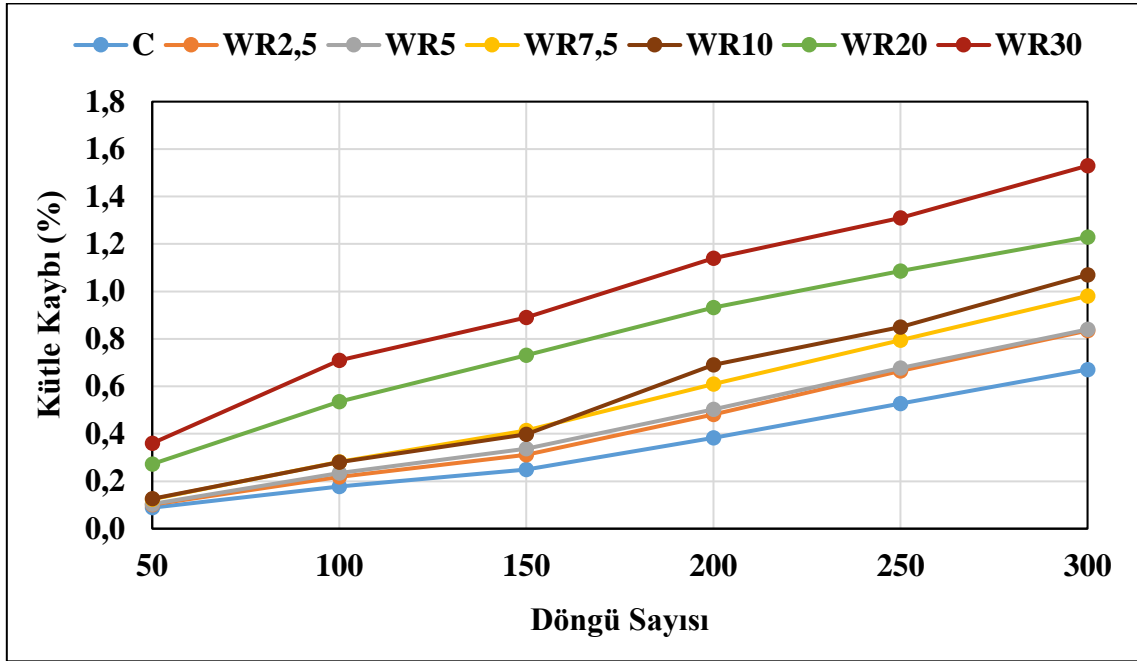
Karışım	Atık Lastik İçeriği	Kütle Kayıpları (%)					
		50 Döngü	100 Döngü	150 Döngü	200 Döngü	250 Döngü	300 Döngü
C	%0	0,09	0,18	0,25	0,38	0,53	0,67
WR2,5	%2,5	0,10	0,22	0,31	0,48	0,66	0,84
WR5	%5	0,10	0,23	0,34	0,50	0,68	0,84
WR7,5	%7,5	0,12	0,28	0,41	0,61	0,79	0,98
WR10	%10	0,13	0,28	0,40	0,69	0,85	1,07
WR20	%20	0,27	0,54	0,73	0,93	1,09	1,23
WR30	%30	0,36	0,71	0,89	1,14	1,31	1,53

SSB numunelerde donma-çözünme sonrası meydana gelen kütle değişimleri incelendiğinde, karışımlardaki atık lastik içeriği arttıkça numunelerde meydana gelen kütle kayıplarının daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte donma-çözünme döngü sayılarının artmasıyla da numunelerde meydana gelen kütle kayıp oranları da artmaktadır. Donma-çözünme etkisi sonrası numunelerde meydana gelen kütle kayıp oranları birbirine çok yakın ve düşük olmakla birlikte %0 ile %2 arasında değiştiği belirlenmiştir. En fazla kütle kaybı, %1,53 oranla %30 atık lastik katkılı (WR30) numunelerde 300 döngülük donma-çözünme süreci sonrasında meydana gelmiştir. En az kütle kaybı ise %0,1 oranla atık lastik içermeyen kontrol numunelerinde (C) 50 döngülük donma-çözünme süreci sonrasında meydana gelmiştir. Numunelerde atık lastik içeriğinin %30’a çıkması 300 donma-çözünme döngüsü sonrası kütle kaybını %56 artırmıştır.



Şekil 98. SSB numunelerin donma-çözünme kütle değişim oranlarının atık lastik oranına göre değişimi.

SSB numunelerin donma-çözünme etkisiyle meydana gelen kütle kayıpları genel olarak incelendiğinde, Şekil 99'dan anlaşılacağı gibi 50 döngü sonrasında %10'a kadar atık lastik içeren numunelerde kütle kayıpları birbirlerine çok yakın ilerlerken döngü sayısı arttıkça atık lastik içeriğinden dolayı kütle kayıp oranlarında artışlar gözlemlenmiştir.



Şekil 99. SSB numunelerin donma-çözünme kütle oranlarının döngü sayılarına göre değişimi.

Atık lastik katkılı betonların donma-çözünme etkisi altında davranışlarını inceleyen birçok çalışma yapılmıştır. *Alsaif et al.* (2019), kauçuklu betonun donma-çözünme direncini incelemiştir. Kaba ve ince agrega yerine %0, %30 ve %60 oranlarda atık lastik kullanılan çalışmada, 7, 14, 28, 42 ve 56 donma-çözünme döngüsünden sonra karışımların kütle kaybı oranları belirlenmiştir. 56 donma-çözünme döngü sonrası %30 atık lastik katkılı numunelerde %0,65 oranında kütle kaybı belirlenmiştir. *Zhang et al.* (2018), silindirle sıkıştırılmış betonun donma direncine kauçuk parçacıkların etkisini araştırmışlardır. İnce agrega yerine %10 oranında atık lastik katılan karışımlar 300 döngülük donma-çözünme etkisine maruz bırakılmıştır. 300 donma-çözünme döngü sonrası %10 oranında atık lastik içeren karışımlarda kontrol karışımlarına kıyasla yaklaşık olarak %5 daha fazla kütle kaybı görülmüştür. *Gesoğlu et al.* (2014b), atık kauçuk içeren geçirimli betonların aşınma ve donma-çözünme direnci adlı çalışmada, %10 ve %20 atık lastik katkılı betonların 300 donma-çözünme döngüsü sonrası meydana gelen kütle kayıplarını incelemiştir. 300 donma-çözünme döngüsü sonrası %10 ve %20 atık lastik içeren karışımların kütle kayıp oranları sırasıyla %2,7 ve %3 oranlarında gerçekleşmiştir. *Guelmine* (2022), kauçuk agregasını içeren betonun donma-çözünme dayanıklılığını incelediği çalışmada doğal agrega yerine ikame olarak %5, %10 ve %15 oranlarında atık lastik eklenen karışımlar, 120, 240 ve 340 donma-çözünme döngüsüne maruz

bırakılmıştır. %5, %10 ve %15 atık lastik katkılı betonlar, 340 donma-çözünme döngüsü sonrası sırasıyla %1,8, %1,1 ve %1,5 oranlarında kütle kaybı yaşamışlardır.

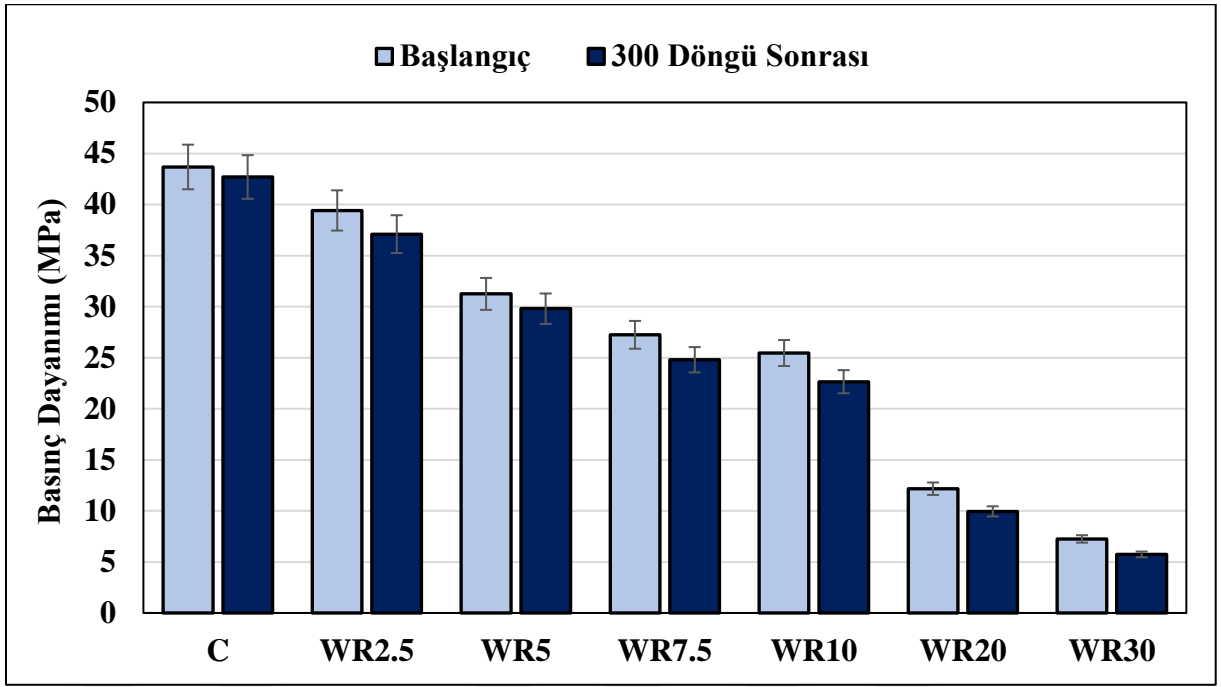
Basınç dayanımı

Çalışma kapsamında 100 x 200 boyutlarında silindir şeklinde olmak üzere üretimi yapılan 28 günlük SSB numunelerin 300 döngünlük donma-çözünme öncesi ve sonrası basınç dayanımları ASTM C39 (Anonymous 2023d) standardına göre belirlenmiştir. SSB numunelerin donma-çözünme öncesi ve sonrası basınç dayanım sonuçları Tablo 24 ile birlikte Şekil 100'de verilmiştir. Her beton grubu için üç numune test edilmiş ve ortalama değer deneysel sonuç olarak kullanılmıştır.

Tablo 24. SSB Numunelerin Donma-Çözünme Basınç Dayanımları

Karışım	Atık Lastik İçeriği	Basınç Dayanımları (MPa)	
		Başlangıç	300 Döngü Sonrası
C	%0	43,68	42,70
WR2,5	%2,5	39,42	37,10
WR5	%5	31,25	29,80
WR7,5	%7,5	27,24	24,80
WR10	%10	25,46	22,65
WR20	%20	12,17	9,95
WR30	%30	7,25	5,73

SSB numunelerin donma-çözünme öncesi ve sonrası basınç dayanım sonuçları incelendiğinde, 300 döngü sonunda bütün numunelerde basınç dayanım kayıpları meydana gelmiştir. Donma-çözünmeye maruz kalmayan numunelerde, 300 döngü sonrası meydana gelen basınç dayanım kayıp oranları %0, %2,5, %5, %7,5, %10, %20 ve %30 atık lastik katkılarına göre yaklaşık olarak sırasıyla %2, %6, %5, %9, %11, %18 ve %21 oranlarında gerçekleşmiştir. Basınç dayanım kaybı oranlarından anlaşılacağı üzere atık lastik içeriğinin artmasıyla numunelerin basınç dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir. En fazla basınç dayanım kaybı %21 oranla %30 atık lastik katkılı (WR30) numunelerde meydana gelmiştir.



Şekil 100. SSB numunelerin donma-çözünme basınç dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.

Yarmada çekme dayanımı

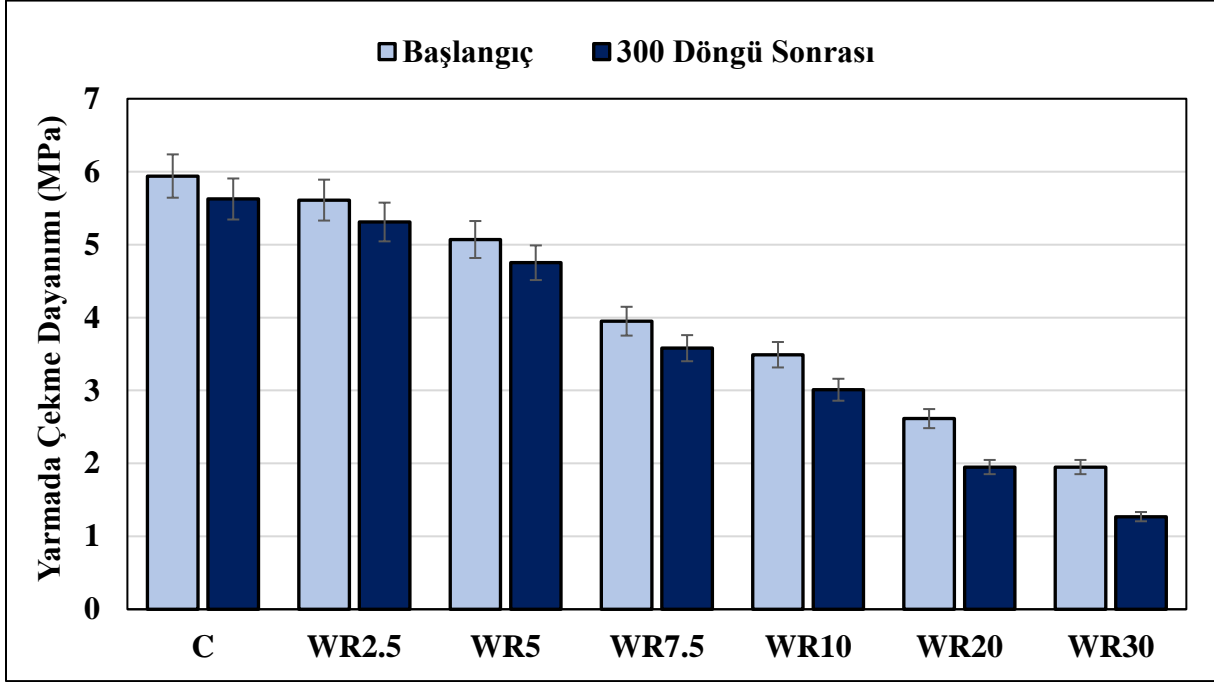
Çalışma kapsamında 100 x 200 boyutlarında silindirik şekilde olmak üzere üretilen 28 günlük SSB numunelerin 300 döngülik donma-çözünme öncesi ve sonrası yarmada çekme dayanımları ASTM C496 (Anonymous 2017d) standardına göre belirlenmiştir. SSB numunelerin donma-çözünme öncesi ve sonrası yarmada çekme dayanım sonuçları Tablo 25 ile birlikte Şekil 101’de verilmiştir. Her beton grubu için üç numune test edilmiş ve ortalama değer deneysel sonuç olarak kullanılmıştır.

Tablo 25. SSB Numunelerin Donma-Çözünme Yarmada Çekme Dayanımları

Karışım	Atık Lastik İçeriği	Yarmada Çekme Dayanımları (MPa)	
		Başlangıç	300 Döngü Sonrası
C	%0	5,94	5,63
WR2,5	%2,5	5,61	5,31
WR5	%5	5,07	4,75
WR7,5	%7,5	3,95	3,58
WR10	%10	3,49	3,01
WR20	%20	2,61	1,95
WR30	%30	1,95	1,27

SSB numunelerin donma-çözünme öncesi ve sonrası yarmada çekme dayanım sonuçları incelendiğinde, basınç dayanımı sonuçlarıyla benzer olarak 300 döngü sonunda bütün numunelerde yarmada çekme dayanım kayıpları meydana gelmiştir. Donma-çözünmeye maruz kalmayan numunelerde, 300 döngü sonrası meydana gelen yarmada çekme dayanım

kayıp oranları %0, %2,5, %5, %7,5, %10, %20 ve %30 atık lastik katkılarına göre yaklaşık olarak sırasıyla %5, %5, %6, %9, %14, %25 ve %35 oranlarında gerçekleşmiştir. Atık lastik içeriğinin artmasıyla numunelerin yarmada çekme dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir. En fazla yarmada çekme dayanım kaybı basınç dayanımında olduğu gibi %35 oranla %30 atık lastik katkılı (WR30) numunelerde meydana gelmiştir. %7,5 oranına kadar atık lastik katkılı karışımların dayanım kayıpları birbirine çok yakın oranlarda gerçekleşmiştir.



Şekil 101. SSB numunelerin donma-çözünme yarmada çekme dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.

Literatürde atık lastik katkılı betonlarda donma-çözünme etkisi sonrası basınç dayanımı davranışlarını inceleyen çalışmalar mevcut iken yarmada çekme dayanım davranışını inceleyen çalışmalara rastlanmamıştır. *Alsaif et al.* (2019), kauçuklu betonun donma-çözünme direncini incelemişlerdir. Kaba ve ince agrega yerine %0, %30 ve %60 oranlarda atık lastik kullanılan çalışmada, 56 donma-çözünme döngüsünden sonra karışımların basınç dayanımları belirlenmiştir. 56 donma-çözünme döngü sonrası %30 atık lastik katkılı numunelerde %20 oranında basınç dayanımı kaybı belirlenmiştir. *Rashad and Sadek* (2020), donma-çözünme döngüleri etkisi altında atık kauçuk tozuyla karıştırılmış betonların davranışını incelemiştir. %15'e kadar atık lastik katkılı numuneler 20 donma-çözünme döngüsüne maruz bırakılmıştır. 20 döngü sonrası %15 atık lastik katkılı numunelerde yaklaşık olarak %25 oranında dayanım artışı gözlemlenmiştir. *Huang et al.* (2022), kauçuk katkılı betonun mekanik özellikleri üzerine donma-çözünme etkisini incelemişlerdir. Bu kapsamda, %5, %10, %15 ve %20 olmak üzere 4 farklı oranda atık lastik katkılı karışımların 60 döngü boyunca basınç dayanımı değişimleri araştırılmıştır. %5, %10,

%15 ve %20 atık lastik katkılı numunelerin 60 döngü sonrası göreceli basınç dayanımları sırasıyla yaklaşık 0,44, 0,57, 0,52 ve 0,43 olarak belirlenmiştir. Guelmine (2022), kauçuk agregasını içeren betonun donma-çözünme dayanıklılığını incelediği çalışmada doğal agrega yerine ikame olarak %5, %10 ve %15 oranlarında atık lastik eklenen karışımlar, 120, 240 ve 340 donma-çözünme döngüsüne maruz bırakılmıştır. %5, %10 ve %15 atık lastik katkılı betonlar, 340 donma-çözünme döngüsü sonrası sırasıyla %48, %21 ve %14 oranlarında basınç kaybı yaşamışlardır.

Ultrases geçiş hızı

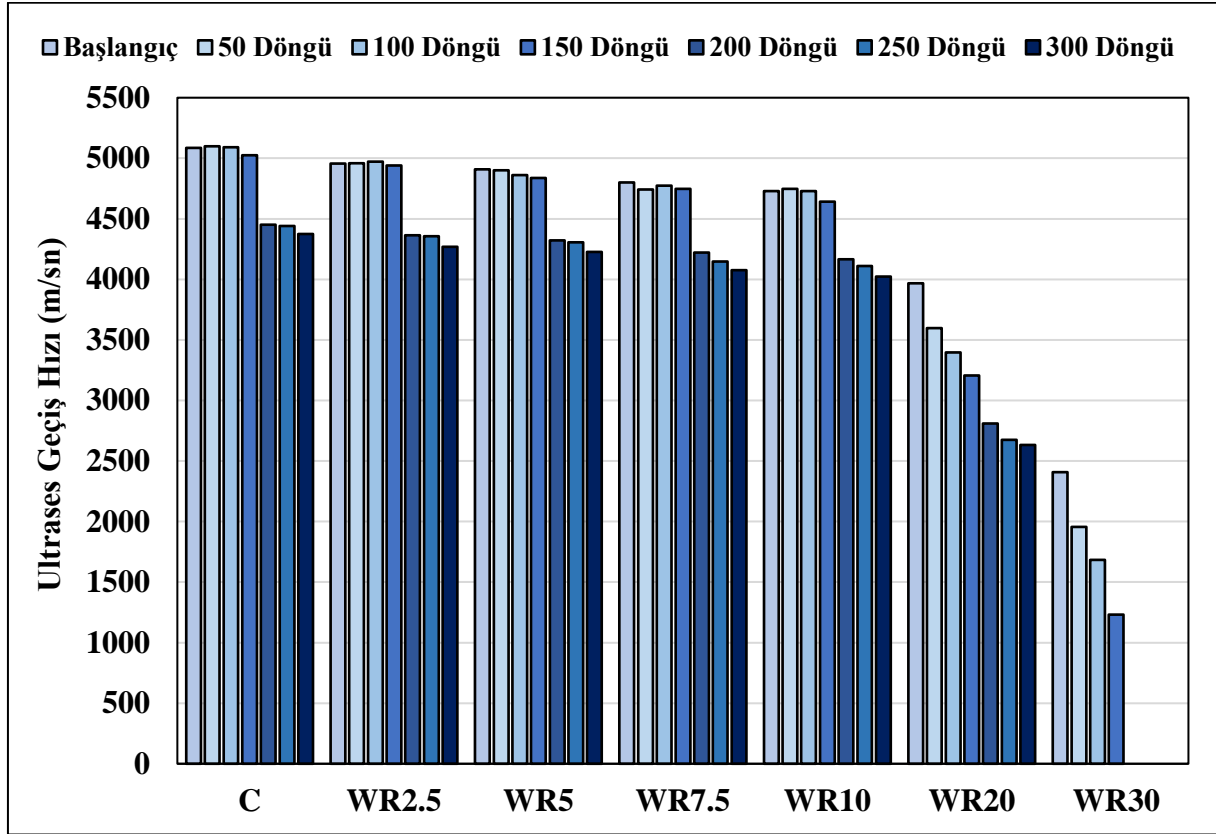
Çalışma kapsamında 28 günlük 100 x 200 boyutlarında silindir SSB numunelerin 300 döngülük donma-çözünme öncesi ve sonrası UPV değerleri ASTM C597 (Anonymous 2023f) standardına göre belirlenmiştir. SSB numunelerin donma-çözünme öncesi ve 300 donma-çözünme döngüsüne kadar her 50 donma-çözünme döngüsü sonrası UPV sonuçları Tablo 26 ile birlikte Şekil 102 ve Şekil 103'te verilmiştir. Her beton grubu için üç numune test edilmiş ve ortalama değer deneysel sonuç olarak kullanılmıştır.

Tablo 26. SSB Numunelerin Donma-Çözünme UPV Sonuçları

Karışım	Ultrases Geçiş Hızı (m/sn)						
	Başlangıç	50 Döngü	100 Döngü	150 Döngü	200 Döngü	250 Döngü	300 Döngü
C	5085,82	5098,79	5090,68	5025,13	4451,86	4441,98	4373,97
WR2,5	4956,63	4959,70	4972,03	4940,71	4363,24	4354,93	4268,94
WR5	4909,48	4901,96	4860,27	4836,76	4320,82	4305,71	4227,21
WR7,5	4799,62	4740,94	4774,90	4748,34	4221,95	4146,92	4076,88
WR10	4729,73	4746,08	4728,13	4640,37	4165,43	4110,39	4022,99
WR20	3966,68	3597,12	3396,74	3207,18	2810,96	2674,82	2632,07
WR30	2408,48	1955,51	1683,50	1230,77	-	-	-

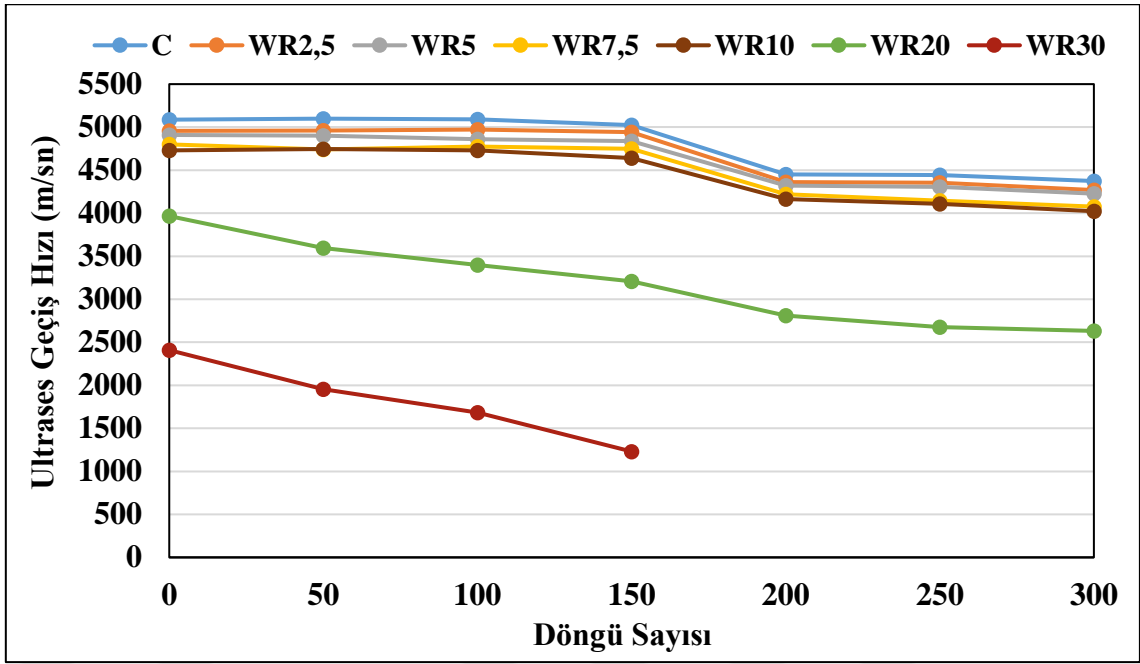
SSB numunelerin donma-çözünme öncesi ve sonrası elde edilen UPV değerleri incelendiğinde, numunelerin maruz kaldığı donma-çözünme döngü sayıları arttıkça UPV sonuçlarında düzenli bir azalma meydana gelmekle birlikte ilk döngülerde UPV değerlerindeki birbirlerine yakınlık dikkat çekmektedir. UPV değişim oranları açısından değerlendirildiğinde, %10'a kadar atık lastik içeren karışımların 150 döngüye kadarki UPV değişim oranlarının birbirlerine çok yakın ve %0 ile %2 arasında değiştiği belirlenmiştir. Atık lastik içermeyen kontrol numunelerinin (C) başlangıç UPV değerleri yaklaşık olarak 5086 m/sn iken bu değer 300 döngülük donma-çözünme etkisi sonrası %14 oranında azalarak 4374 m/sn'ye kadar gerilemiştir. %30 atık lastik katkılı (WR30) numunelerin, 200 döngüden itibaren UPV sonuçları ölçülemez. %20 atık lastik katkılı (WR20) numunelerin başlangıç

UPV değerleri yaklaşık olarak 3967 m/sn iken bu değer 300 döngülük donma-çözünme etkisi sonrası %34 oranında azalarak 2632 m/sn'ye kadar gerilemiştir.



Şekil 102. SSB numunelerin donma-çözünme UPV değerlerinin atık lastik oranına göre değişimi.

Donma-çözünme etkisi sonrası SSB numunelerin UPV-döngü sayıları ilişkileri Şekil 103'te verilmiştir. Sonuçlar genel olarak incelendiğinde, donma-çözünme döngü sayılarının ve atık lastik içeriğinin artması numunelerin UPV değerlerinin düşürmüştür. UPV-döngü sayıları ilişkileri incelendiğinde %10'a kadar atık lastik içeren karışımların UPV değişimleri çok benzer bir değişim göstermiştir. Bununla birlikte %20 ve %30 atık lastik katkılı karışımlarda donma-çözünme döngü sayısının artmasıyla birlikte UPV kayıp oranları daha fazla gerçekleşmiştir.

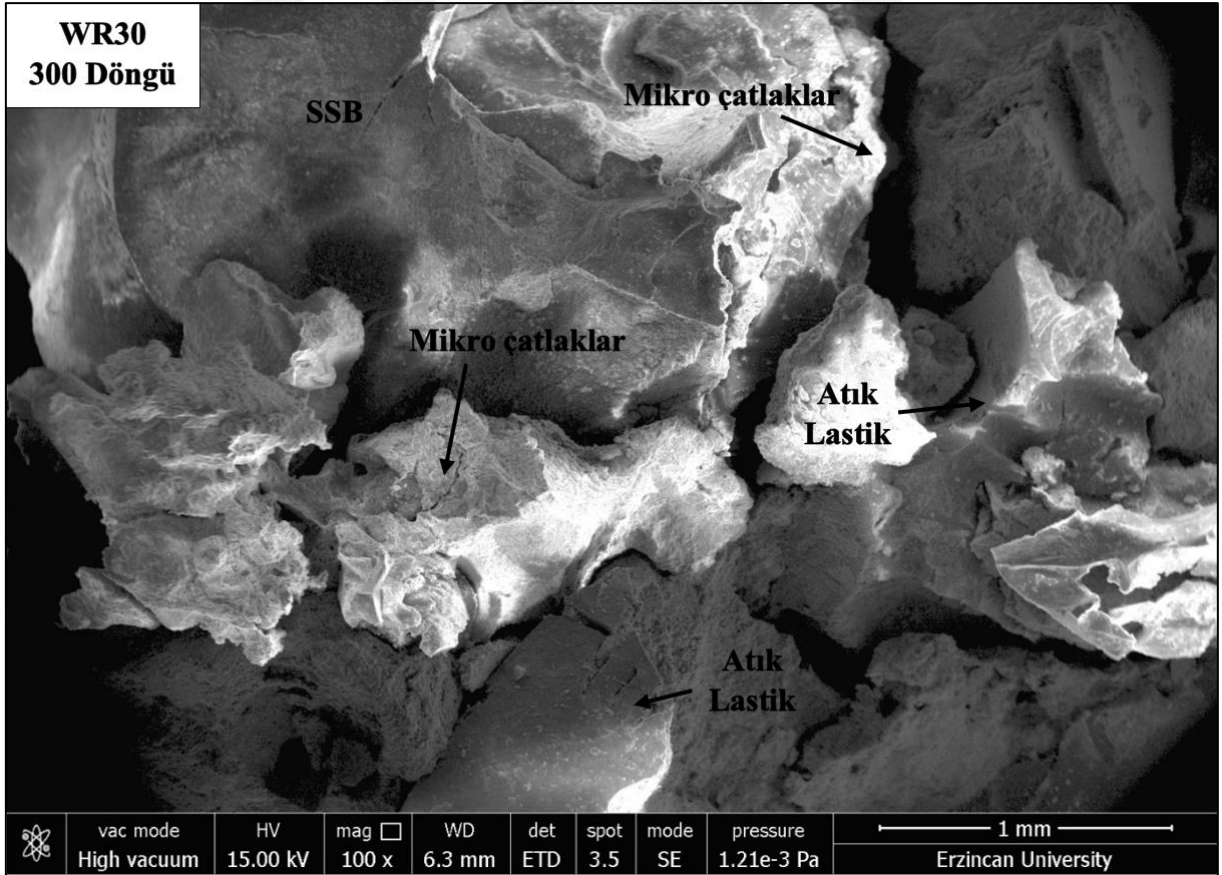
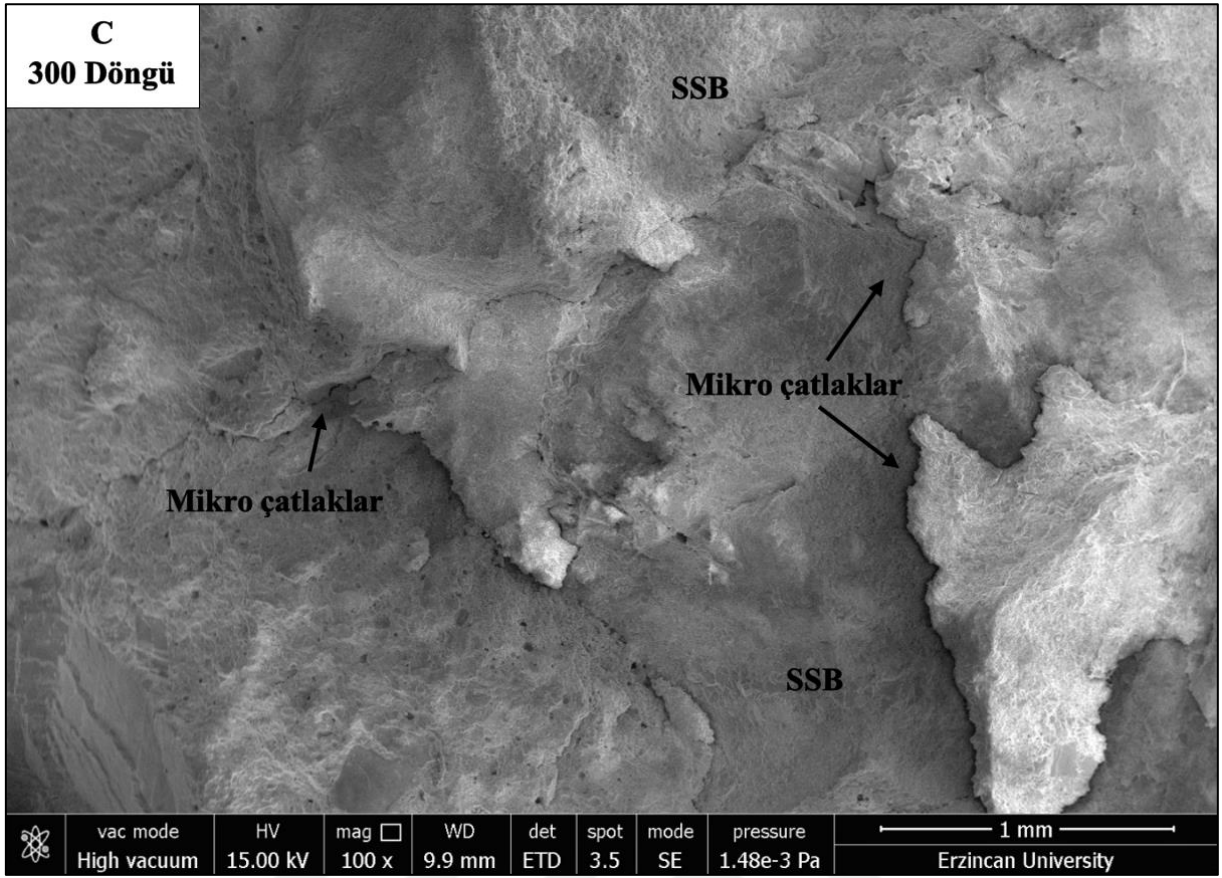


Şekil 103. SSB numunelerin donma-çözünme UPV değerlerinin döngü sayılarına göre değişimi.

Bayraktar *et al.* (2021), çimento dozajı ve atık lastik kauçuğunun, donma-çözünmeye maruz kalan betonların mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Farklı dozajlarda çimento içeriğine sahip karışımlarda ince agrega yerine %100 oranda atık lastik kullanılmıştır. 30 ve 60 döngülük donma-çözünmeye maruz bırakılan numunelerin başlangıç UPV değerleri 1,88 km/sa'ten sırasıyla 1,85 km/sa ve 1,78 km/sa'e gerilemiştir. Richardson *et al.* (2011), granül kauçuk kırıntı kullanılan betonun donma-çözünme performansı adlı çalışmalarında, %0,5 ve %1 oranlarında atık lastik katılan numunelerin 50 donma-çözünme döngüsü sonrası UPV değerlerindeki değişimleri araştırmışlardır. 50 donma-çözünme döngüsü sonrası %0,5 ve %1 atık lastik içeren numunelerin UPV değerlerinin neredeyse değişmediğini belirlemiştir.

Mikroyapı analizi

Çalışmada, donma-çözünmenin atık lastikli SSB kaplamaların üzerindeki etkisini mikroyapı analizi ile incelemek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Bu kapsamda atık lastik içermeyen kontrol numuneleri (C) ile %30 atık lastik katkılı numunelerin (WR30) 300 donma-çözünme sonrası SEM görüntüleri ele alınmıştır. Şekil 104'te numunelerin donma-çözünme sonrası SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 104. Kontrol (C) ve %30 atık lastik katkılı SSB numunelerin (WR30) 300 donma-çözünme döngü sonrası SEM görüntüleri.

Donma-çözünme döngülerinin başlangıcında harcın mikro yapısının nispeten kompakt olduğu açıkça gözlemlenebilmektedir. Donma-çözünme döngülerinin artmasıyla birlikte topaklaşan kristaller giderek artmıştır. 300 donma-çözünme döngüsünden sonra hem atık lastik içermeyen hem de %30 atık lastik içeren numunelerde yüzeyin kristal ürünlerle kaplandığı ve mikro çatlakların varlığı gözlemlenmiştir. Donma-çözünme döngüsünün artmasının numunelerin iç gözenekliliğine yol açtığı ve arayüzey bağ mukavemetini zayıflattığı görülmektedir. 300 donma-çözünme döngüsünden sonra betonda daha fazla gözenek dağılımı gözlemlenmiştir. Bu küçük gözenekler donma-çözünme döngüsü sırasında tekrar tekrar donarak, genişleyerek ve büzülerek çevredeki yapıyı tahrip etmektedir. Bu durum da donma-çözünme sonrası numunelerde meydana gelen dayanım kaybına sebep olmaktadır.

Atık lastik içermeyen numunelerde atık lastik içeren numunelere kıyasla meydana gelen mikro çatlakların dağılımı ve miktarı daha azdır. Ayrıca numunelerde kullanılan atık lastik miktarının artması bu mikro çatlakların miktar ve genişliklerini de artırmıştır.

Asit ve Sülfat Etkisi Sonuçları

SSB karışımların asit ve sülfat etkisine karşılık davranışlarını belirlemek amacıyla 28 günlük kür süresinden sonra 28, 90 ve 180 güne kadar sülfürik asit (H_2SO_4) ve sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltilerinde bekletilen numunelere görsel analiz, kütle değişimi, basınç dayanımı ve UPV deney ve analizleri yapılmıştır. Elde edilen bu deney sonuçları ve analizler aşağıda detaylı olarak el alınmıştır.

Görsel analiz

Çalışma kapsamında 150 x 150 x 150 mm boyutlarında küp şeklinde olmak üzere üretimi yapılan 28 günlük SSB numunelerin asit ve sülfat etkisi sonrası görsel analizi için tüm numuneler sülfürik asit ve sodyum sülfat çözeltilerine maruz bırakılmadan önce ve sonra görsel olarak incelenmiş ve her numunenin yüzeyi herhangi bir görsel değişim, aşınma ve renk değişikliği açısından kontrol edilmiştir. Farklı gün sürelerinde asit ve sülfat çözeltilerine maruz kalan SSB numunelerin görsel karşılaştırılması Şekil 107 ve Şekil 108'de verilmiştir.

Numuneler incelendiğinde, sülfürik asit çözeltilerinde bekletilen SSB numunelerin yüzeylerinde bozulmalar ve renk değişimleri meydana gelmiştir. Yüzeylerde asit etkisiyle ince agrega ve çimento harcının erimesi sonucu pürüzsüz ve düz yüzey, yerini girinti ve çıkıntıların yer aldığı pütürlü bir yapıya bırakmıştır. Asit çözeltisinin etkisinden dolayı gri olan yüzey renkleri beyaza dönüşmüştür. Atık lastik içeriği açısından görsel değerlendirme yapıldığında, numunelerdeki atık lastik içeriği arttıkça yüzeydeki bozulmaların daha fazla

meydana geldiği anlaşılmaktadır. Şekil 105'te atık lastik içermeyen karışım ile %30'a kadar atık lastik içeren karışımların asit etkisi sonrası görselleri toplu olarak verilmiştir. Çözeltilerde bekletilen gün süresi açısından görsel inceleme yapıldığında, numunelerin asit çözeltilerine maruz kaldığı gün süresi arttıkça asit etkisinin daha fazla olması, beton yüzeylerinde daha fazla bozulma ve düzensizliklere yol açtığı belirlenmiştir.



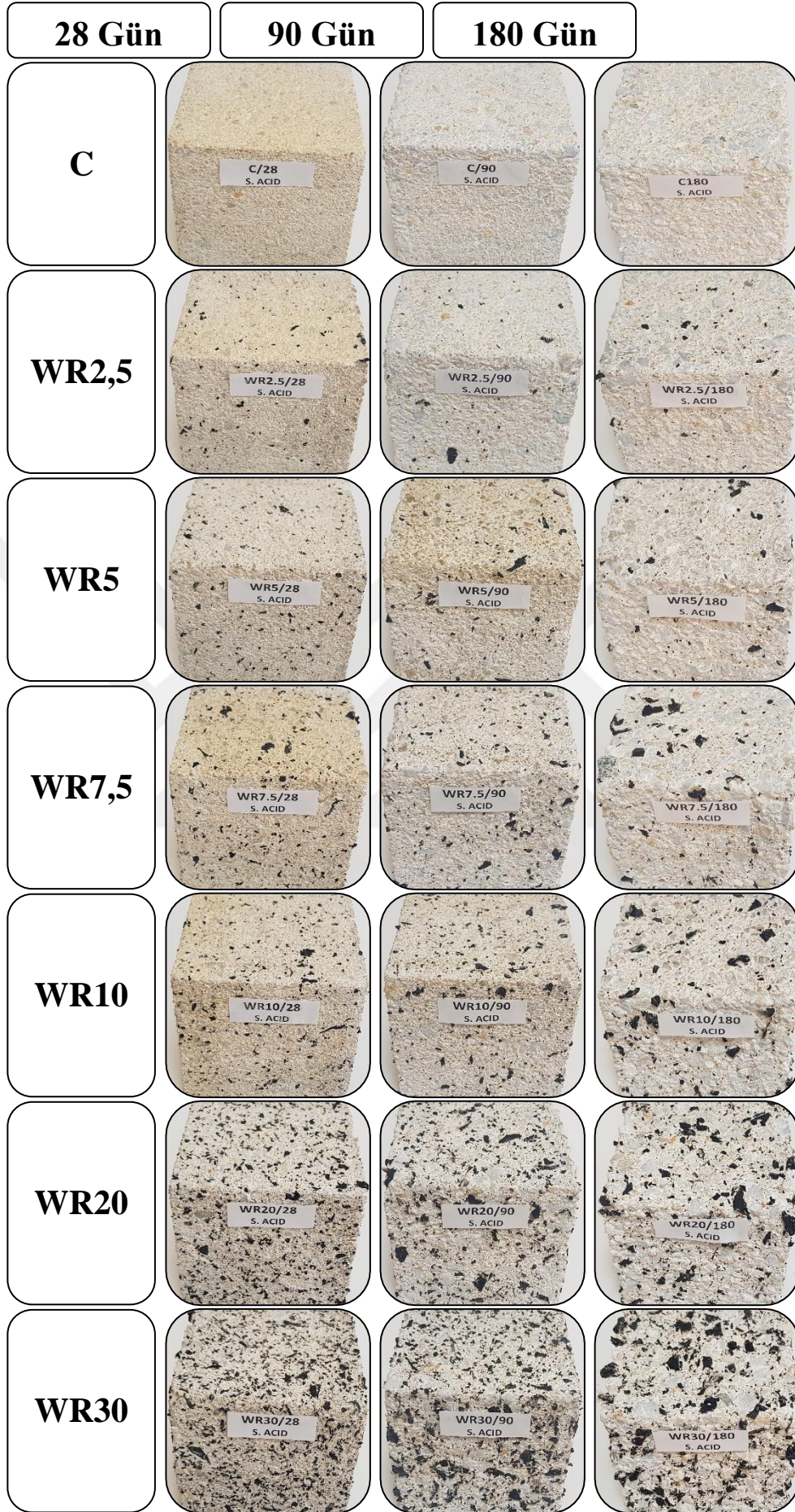
Şekil 105. SSB numunelerinin asit etkisi sonrası atık lastik oranına göre görsel değişimi.

Sülfürik asit çözeltilerinde bekletilen SSB numunelerin aksine sodyum sülfat çözeltilerinde bekletilen SSB numunelerinde yüzeylerinde bozulmalar ve renk değişimleri bakımından gözle görülebilir herhangi bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Şekil 106'da atık lastik içermeyen karışım ile %30'a kadar atık lastik içeren karışımların sülfat etkisi sonrası görselleri toplu olarak verilmiştir. Atık lastik içeriği ve gün süresi açısından görsel değerlendirme yapıldığında, önemli değişiklikler meydana gelmemiştir.

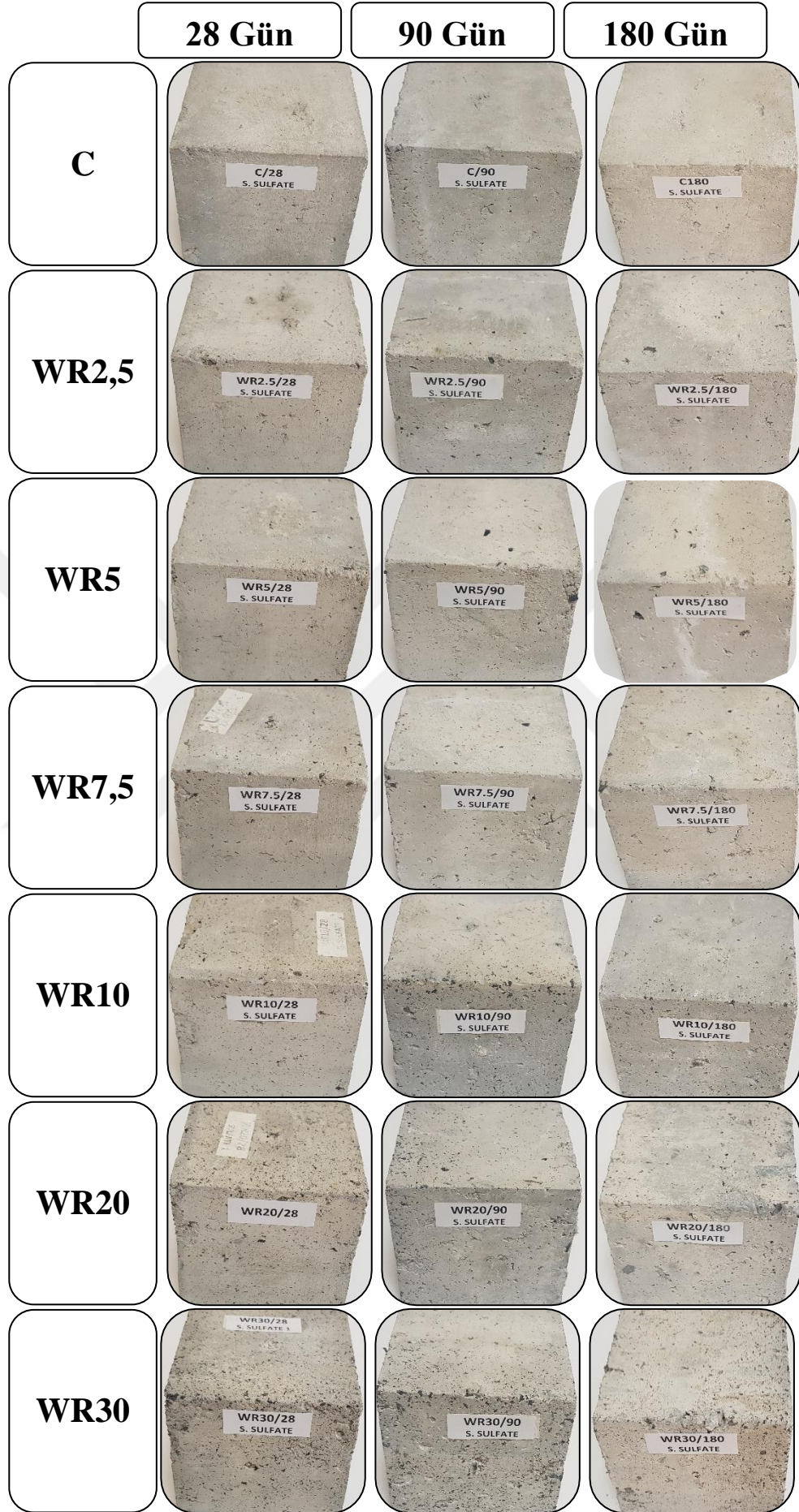


Şekil 106. SSB numunelerinin sülfat etkisi sonrası atık lastik oranına göre görsel değişimi.

Asit ve sülfat etkisi sonrası numune görselleri genel olarak değerlendirildiğinde, asit çözeltilerine maruz bırakılan SSB numunelerinin yüzeylerinde bozulmalar ve renk değişimleri meydana gelirken, sülfat çözeltilerine maruz bırakılan SSB numunelerinin yüzeylerinde ise gözle görülebilir herhangi bozulma ve renk değişimi gözlemlenmemiştir.



Şekil 107. Sülfürik asit çözeltilerine maruz kalan SSB numunelerin görsel karşılaştırılması.



Şekil 108. Sodyum sülfat çözeltilerine maruz kalan SSB numunelerin görsel karşılaştırılması.

Kütle Değişimi

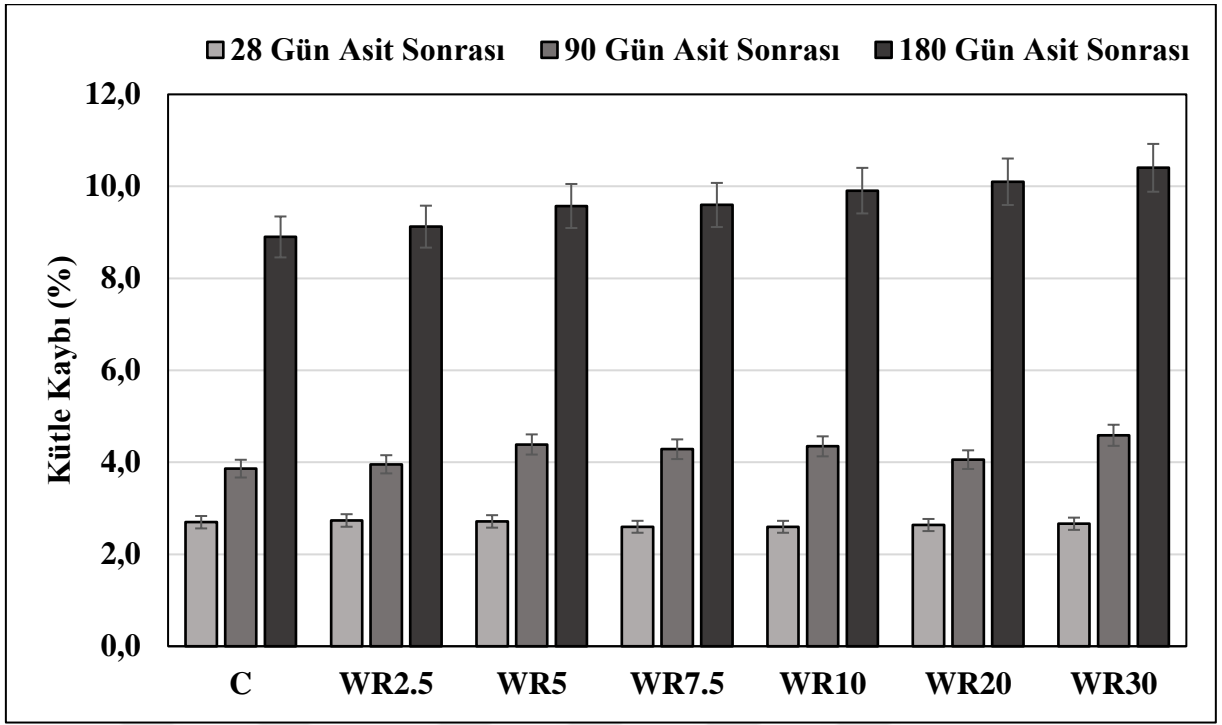
Çalışma kapsamında 150 x 150 x 150 mm boyutlarında küp şeklinde olmak üzere üretimi yapılan 28 günlük SSB numunelerin asit ve sülfat etkisi öncesi başlangıç ağırlıkları belirlendikten sonra kütle değişimini incelemek amacıyla asit ve sülfat etkisi sonrası da 0,1 gr hassasiyetine sahip terazi kullanılarak kütleleri belirlenmiştir.

SSB küp numunelerde, asit etkisi sonrası meydana gelen kütle değişimleri negatif olarak kayıp şeklinde gerçekleşmiş olup yüzde olarak sonuçlar Tablo 27 ve Şekil 109'da verilmiştir. Her beton grubu için üç numune test edilmiş ve ortalama değer deneysel sonuç olarak kullanılmıştır.

Tablo 27. SSB Numunelerin Asit Etkisi Kütle Kayıpları

Karışım	Atık Lastik İçeriği	Kütle Kayıpları (%)		
		28 Gün Asit Sonrası	90 Gün Asit Sonrası	180 Gün Asit Sonrası
C	%0	2,70	3,86	8,90
WR2,5	%2,5	2,73	3,96	9,12
WR5	%5	2,71	4,39	9,57
WR7,5	%7,5	2,60	4,28	9,60
WR10	%10	2,60	4,35	9,91
WR20	%20	2,64	4,06	10,10
WR30	%30	2,66	4,59	10,40

Asit etkisi sonrası SSB numunelerde meydana gelen kütle kayıpları incelendiğinde, 28 günlük asit çözeltisine maruz kalmış numunelerde kütle kayıp sonuçlarının yüzde olarak birbirine çok yakın olduğu belirlenmekle birlikte, 90 ve 180 günlük asit çözeltisine maruz kalmış numunelerde ise kütle kaybının atık lastik oranının artmasıyla birlikte daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, numunelerin asit çözeltisine maruz kaldığı gün süresi arttıkça meydana gelen kütle kayıpları da düzenli bir şekilde artmıştır. En fazla kütle kaybının gerçekleştiği numuneler, %10,40 oranla 180 gün asit çözeltisine maruz bırakılan %30 atık lastik katkılı (WR30) karışımlar olarak belirlenmiştir. En az kütle kaybı ise %2,60 oranla 28 gün asit çözeltilerine maruz kalan %7,5 ve %10 atık lastik katkılı (WR7,5 ve WR10) karışımlarda olarak elde edilmiştir. 180 günlük asit etkisi sonrası atık lastik içermeyen kontrol numunelerinde (C) kütle kaybı %8,90 iken bu oran %30 atık lastik katkılı (WR30) numunelerinde %17 artarak %10,40 oranına ulaşmıştır.



Şekil 109. SSB numunelerin asit etkisi kütle değişim oranlarının atık lastik oranına göre değişimi.

Asit etkisi sonrası kütle kaybı sonuçları genel olarak incelendiğinde, 28 gün sonrası gerçekleşen kütle kayıplarının birbirine çok yakın değerler olduğu ve atık lastik içeriğiyle birlikte değişen kütle kayıp oranlarında %5 gibi küçük farkın olduğu belirlenmiştir. 90 ve 180 gün sonrası numunelerde meydana gelen kütle kaybının ise numunelerdeki atık lastik içeriğinin artmasıyla birlikte daha fazla değiştiği belirlenmiştir. Numunelerin asit çözeltisine maruz bırakılan gün sayısının artması en fazla WR30 numunelerinde olmak üzere bütün karışımlardaki kütle kaybını artmıştır.

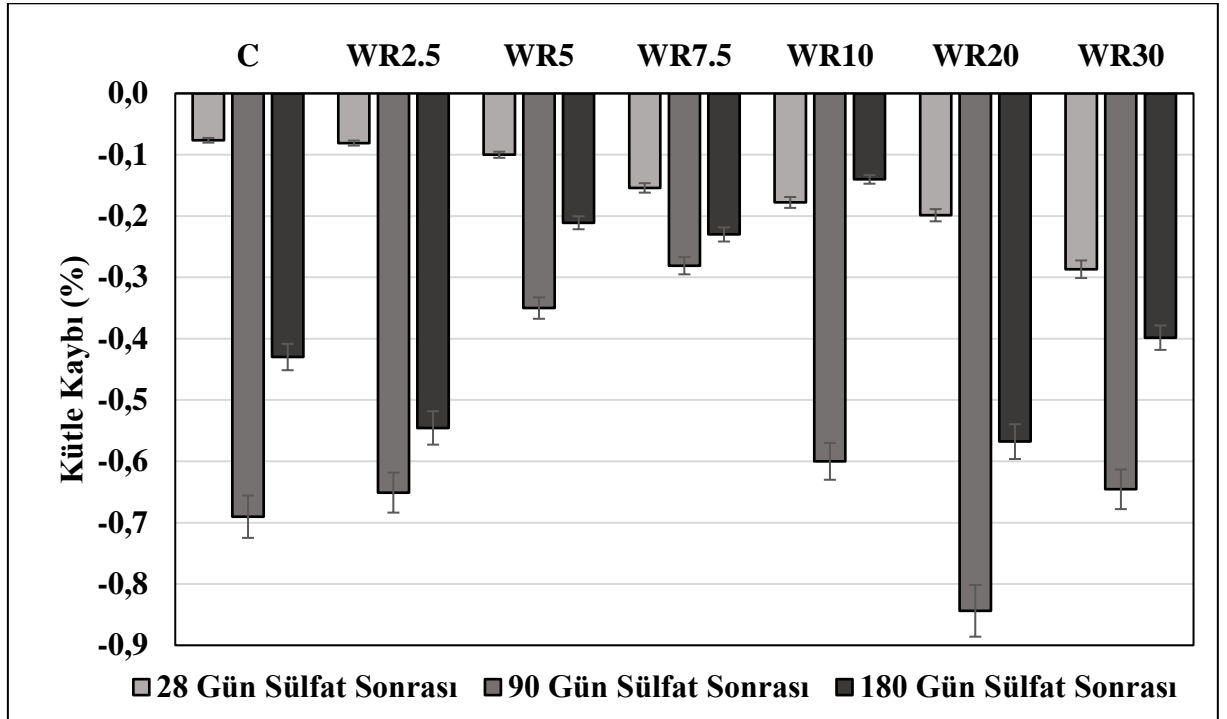
SSB küp numunelerde sülfat etkisi sonrası meydana gelen kütle değişimleri asit etkisindeki sonuçların tersi olarak pozitif kazanım şeklinde gerçekleşmiş olup yüzde olarak sonuçlar Tablo 28 ve Şekil 110'da verilmiştir. Her beton grubu için üç numune test edilmiş ve ortalama değer deneysel sonuç olarak kullanılmıştır.

Tablo 28. SSB Numunelerin Sülfat Etkisi Kütle Kayıpları

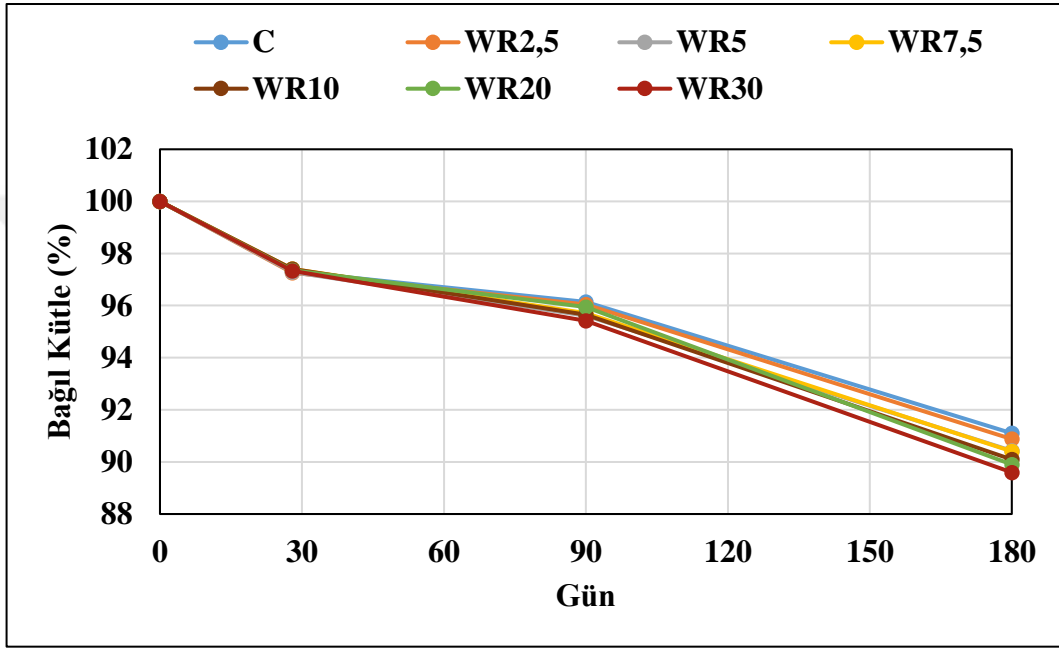
Karışım	Atık Lastik İçeriği	Kütle Kayıpları (%)		
		28 Gün Sülfat Sonrası	90 Gün Sülfat Sonrası	180 Gün Sülfat Sonrası
C	%0	-0,08	-0,69	-0,43
WR2,5	%2,5	-0,08	-0,65	-0,55
WR5	%5	-0,04	-0,35	-0,21
WR7,5	%7,5	-0,15	-0,28	-0,23
WR10	%10	-0,18	-0,17	-0,14
WR20	%20	-0,20	-0,84	-0,57
WR30	%30	-0,29	-0,65	-0,40

Sülfat etkisi sonrası SSB numunelerde meydana gelen kütle kayıpları incelendiğinde, asit etkisinden farklı olarak kütle kaybı yerine bütün numunelerde kütle artışı durumu söz konusu olmuştur. Ancak numunelerde bu kütle artış oranları birbirine çok yakın oranda meydana gelmiş ve %1’den daha düşük oranlarda gerçekleşmiştir.

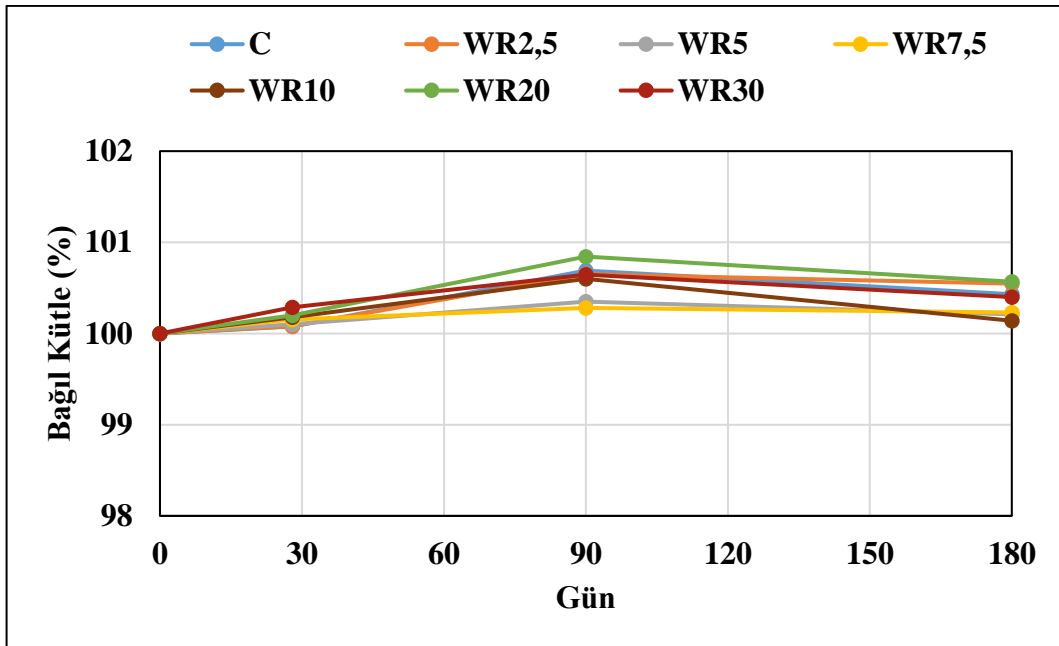
Sülfat etkisi sonrası kütle kaybı sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, kütle değişim değerlerinin birbirlerine çok yakın olması ve bütün değerlerin %1 değerinin altında kümelenmesinden dolayı kesin sonuçlara varılamamıştır. Buna rağmen sonuçlar incelendiğinde karışımların çoğunda 90 günlük sülfat etkisine kadar kütle artışı devam ettiği 180 günlük sülfat etkisinde ise azaldığı görülmüştür.

**Şekil 110.** SSB numunelerin sülfat etkisi kütle değişim oranlarının atık lastik oranına göre değişimi.

Asit ve sülfat etkisi sonrası SSB numunelerin bağıl kütle-gün değişim ilişkileri Şekil 111 ve Şekil 112’de verilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere asit etkisi sonrası numunelerde kütle kaybının yaşandığı, sülfat etkisi sonrası numunelerde ise kütle artışı meydana gelmiştir. Asit çözeltilisine maruz kalan numunelerde kütle kayıpları 28 güne kadar birbirine çok yakın ilerlerken 90 ve 180 gün sonrası kütle kayıpları oranları atık lastik oranının artmasıyla birbirinden ayrılmaktadır. Sülfat çözeltilisine maruz kalan numunelerin kütle artışları ise belirli bir oranda ve düzende değişmediği belirlenmiş ancak 90 günden sonra kütle artışının kısmen azaldığı belirlenmiştir.



Şekil 111. Asit etkisi sonrası SSB numunelerin bağıl kütle oranlarının günlere göre değişimi.



Şekil 112. Sülfat etkisi sonrası SSB numunelerin bağıl kütle oranlarının günlere göre değişimi.

Atık lastiklerin ilavesi düşük yoğunluklarından dolayı karışımların birim ağırlıkları azaltmıştır. Asit çözeltilerine maruz kalma süresi arttıkça numunelerde meydana gelen ağırlık kayıplarını da artmıştır. Sülfat çözeltilerine maruz kalma süresi arttıkça numunelerde ise asit etkisinin aksine numunelerde ağırlık artışı meydana gelmiştir. Atık lastik katkıli betonlarda asit ve sülfat etkisinin kütle değişimine etkisiyle alakalı çalışmalar literatürde mevcuttur.

Dezhampanah *et al.* (2020), atık lastik ve çelik fiber içeren betonun durabilite performansını araştırmıştır. Bu kapsamda %10 ve %20 atık lastikli betonlarda 30, 45, 60 ve 90 gün asit etkisi sonrası numunelerin kütle değişimlerini incelenmiştir. 90 günlük asit etkisi sonrası %10 atık lastik katkıli numunelerde %23,7 %20 atık lastik katkıli numunelerde ise %15,73 ağırlık kaybı yaşanmıştır. Gubta *et al.* (2019), atık lastik tozu katkıli betonun agresif çevre şartlarındaki davranışını incelediği çalışmada, %20' ye kadar atık lastik katılan betonların 7, 28, 56, 90 ve 180 günlük %3'lük asit çözeltisi etkisi sonrası kütle kaybını incelemiştir. %20 katkıli betonlarda 28, 90 ve 180 günlük asit etkisi sonrası meydana gelen kütle kayıp oranları sırasıyla %6, %10 ve %16 şeklinde gerçekleşmiştir. Thomas *et al.* (2015a), yüksek dayanımlı kauçuklu betonun agresif ortam performansını araştırmışlardır. İnce agrega yerine %20'ye kadar kırıntı atık lastik kullanılan çalışmada 28, 54 ve 84 günlük sülfürik asit sonrası kütle değişimi incelenmiştir. %3'lük sülfürik asit çözeltisi sonrası %20 atık lastik katkıli karışımların 28 ve 84 gün sonunda meydana gelen kütle kayıpları sırasıyla %22 ve %38 olarak belirlenmiştir.

Thomas *et al.* (2015b), atık lastik içeren yüksek dayanımlı betonlarda sülfat etkisinin kütle değişimi üzerinde etkisini incelemişlerdir. Bu kapsamda ince agrega yerine %20'ye kadar kırıntı atık lastik kullanılmış ve 28, 56 ve 91 gün sülfat etkisine maruz kalmış karışımların kütle değişimleri incelenmiştir. Tüm numunelerin ağırlıklarında 28 günden 90 güne kadar kademeli bir artış olduğu fark edilmiştir. %20 atık lastik katkıli karışımların 90 gün sülfat etkisi sonrası ağırlığındaki artış %0,65 olarak tespit edilmiştir. Thomas and Gupta (2015), başka bir çalışmalarında 91 güne kadar sülfat etkisine maruz kalan numunelerin ağırlıklarında artış olduğunu, 182 güne kadar sülfat etkisine maruz kalan numunelerde ise %15 atık lastik içeriğine kadar ağırlık artışı, %15, %17,5 ve %20 atık lastik içeren karışımlarda da betonun parçalanma süreci başladığından dolayı ağırlık kaybı meydana geldiğini bildirmişlerdir. Orhan *et al.* (2023), kırıntı kauçuk ile modifiye edilmiş cüruf bazlı geopolimer betonun dayanıklılık özelliklerini incelemişlerdir. Çalışmada ince agrega yerine %15 oranına kadar atık lastik kullanılan beton karışımlar, 4, 8 ve 12 hafta boyunca sülfat etkisine maruz bırakılarak kütle değişimleri incelenmiştir. Numunelerin %5 sodyum sülfat çözeltisindeki ağırlık artışlarının %0,62 ile %1,45 arasında değiştiğini belirlemişlerdir.

Yapılan çalışmada literatürdeki sonuçlarla benzer bulgular elde edilmiş, asit etkisi sonrası kütle kaybı, sülfat etkisi sonrası ise kütle artışı gözlemlenmiştir. Asit etkisi sonrası kütle kaybı şu şekilde açıklanabilmektedir. Sülfürik asit, beton hidrasyon ürünleriyle, özellikle CSH jeliyle reaksiyona girerek sülfalüminatlar oluşturur. Etrenjit gibi sülfalüminatlar yapı olarak iğne şeklindedir ve asit çözeltilerine maruz kaldıkları erken yaşlarda boşluklar oluşturmaya başlar ve daha sonraki yaşlarda büyümeleri CSH jelinin bozulmasına bu da agregalar arasında kohezif bağlayıcı kaybına yol açarak kütle kaybına neden olmaktadır (Bisht and Ramana 2019). Sülfat etkisi sonrası ise kütle artışının nedeni ise numuneler tarafından emilen sülfat çözeltisinin varlığı ile açıklanabilmektedir.

Basınç dayanımı

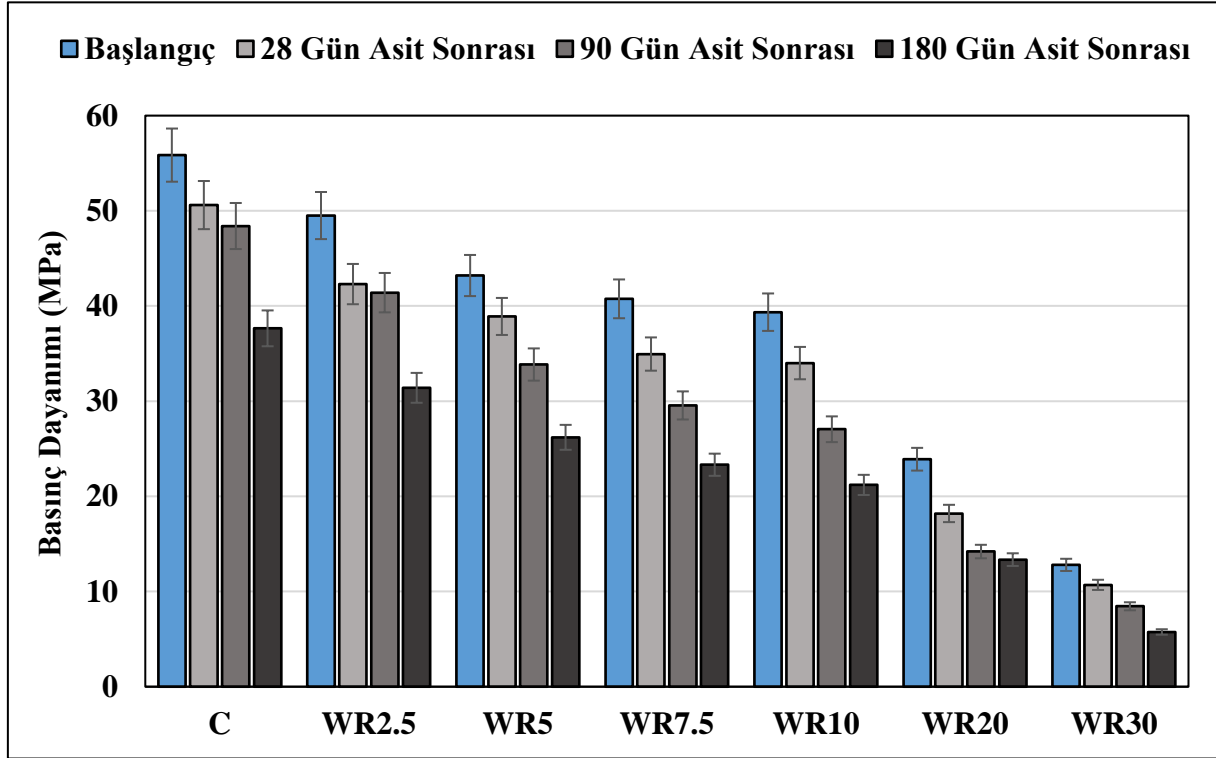
Çalışma kapsamında 150 x 150 x 150 mm boyutlarında küp şeklinde üretilen 28 günlük kür uygulanan SSB numunelerin asit ve sülfat etkisi öncesi ve sonrası basınç dayanımları ASTM C39 (Anonymous 2023d) standardına göre belirlenmiştir. Numunelerin asit ve sülfat etkisi öncesi ve sonrası basınç dayanım sonuçları Tablo 29 ve Tablo 30 ile birlikte Şekil 113 ve Şekil 114’de verilmiştir. Her beton grubu için üç numune test edilmiş ve ortalama değer deneysel sonuç olarak kullanılmıştır.

Tablo 29. SSB Numunelerin Asit Etkisi Basınç Dayanımları

Karışım	Atık Lastik İçeriği	Basınç Dayanımları (MPa)			
		Başlangıç	28 Gün Asit Sonrası	90 Gün Asit Sonrası	180 Gün Asit Sonrası
C	%0	55,85	50,60	48,40	37,65
WR2,5	%2,5	49,50	42,30	41,40	31,4
WR5	%5	43,20	38,90	33,85	26,2
WR7,5	%7,5	40,75	34,95	29,55	23,32
WR10	%10	39,35	34,00	27,05	21,2
WR20	%20	23,90	18,20	14,20	13,35
WR30	%30	12,80	10,70	8,45	5,75

SSB numunelerin asit etkisi öncesi ve sonrası basınç dayanım sonuçları incelendiğinde, asit çözeltisine maruz kalma süreci arttıkça numunelerin basınç dayanımlarında azalma meydana gelmiştir. 28 gün su küründe bekletilmiş başlangıç numuneleriyle kıyaslandığında atık lastik içermeyen kontrol (C) numunelerinde 28, 90 ve 180 gün asit çözeltilerinde bekletilme sonucunda sırasıyla yaklaşık olarak %9, %13 ve %33 oranlarında dayanım kaybı meydana gelmiştir. %30 atık lastik katkılı (WR30) numunelerde ise 28, 90 ve 180 gün asit çözeltilerinde bekletilme sonucunda sırasıyla yaklaşık olarak %16, %34 ve %55 oranlarında dayanım kaybı meydana gelmiştir. En fazla dayanım kaybı %55

oranla %30 atık lastik katkı (WR30) numunelerde 180 gün asit çözeltisinde bekletme süresi sonrasında gerçekleşmiştir. En az dayanım kaybı ise %9 oranla atık lastik içermeyen kontrol (C) numunelerinde 28 gün asit çözeltisinde bekletme süresi sonrasında gerçekleşmiştir. Asit etkisi sonrası basınç dayanım sonuçları atık lastik içeriği açısından incelendiğinde, asit etkisi sonrası numunelerde atık lastik oranı arttıkça dayanım kaybının arttığı gözlemlenmiştir.

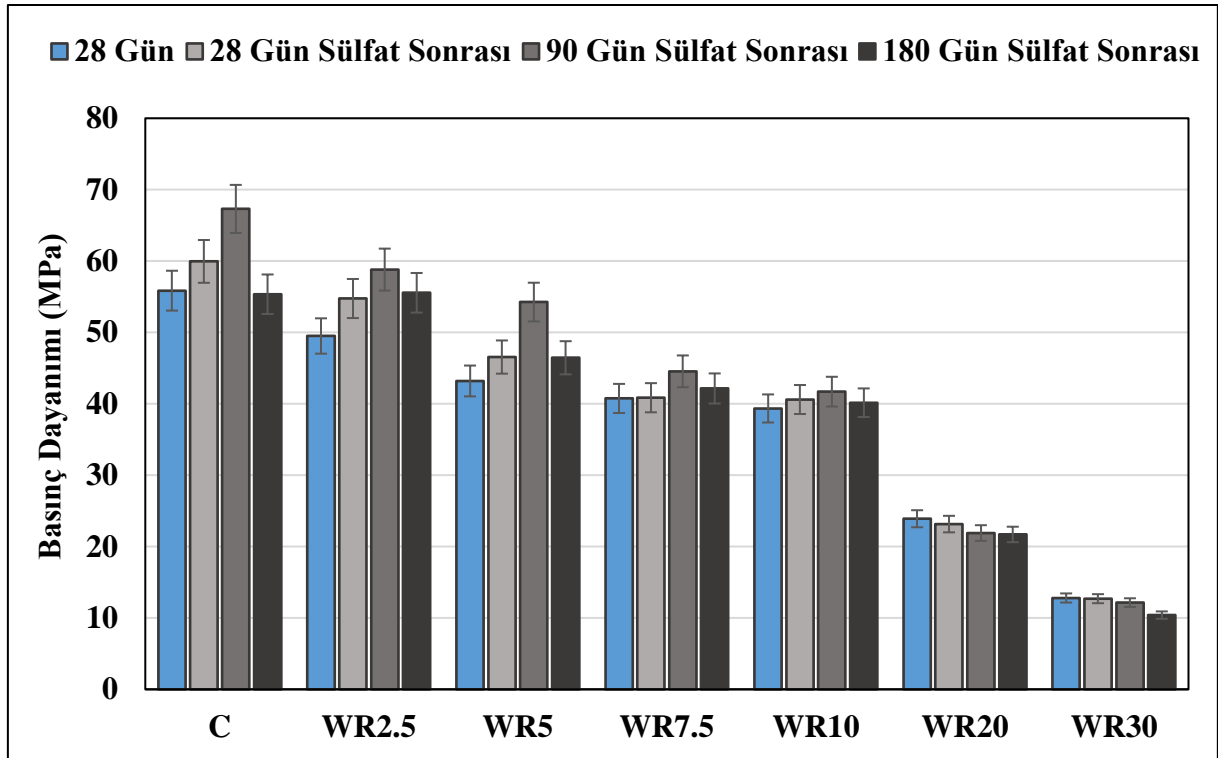


Şekil 113. SSB numunelerin asit etkisi basınç dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.

SSB numunelerin asit etkisi sonrası basınç dayanım sonuçları genel olarak değerlendirildiğinde, 28, 90 ve 180 gün asit çözeltisinde bekletme süresinde dayanım kayıpları sırasıyla ortalama olarak %15, %26 ve %42 oranlarında gerçekleşmiştir. Asit çözeltisinde bekletme süresi uzadıkça numunelerdeki dayanım kaybı daha fazla gerçekleşmiştir. Bununla birlikte atık lastik oranının artması da asit sonrası basınç dayanımlarında daha fazla kayba neden olmuştur. Atık lastik içermeyen ve %30 oranında atık lastik içeren karışımlarda 180 gün asit etkisi sonrası dayanım kayıpları %32 ile %55 oranında değişmektedir.

Tablo 30. SSB Numunelerin Sülfat Etkisi Basınç Dayanımları

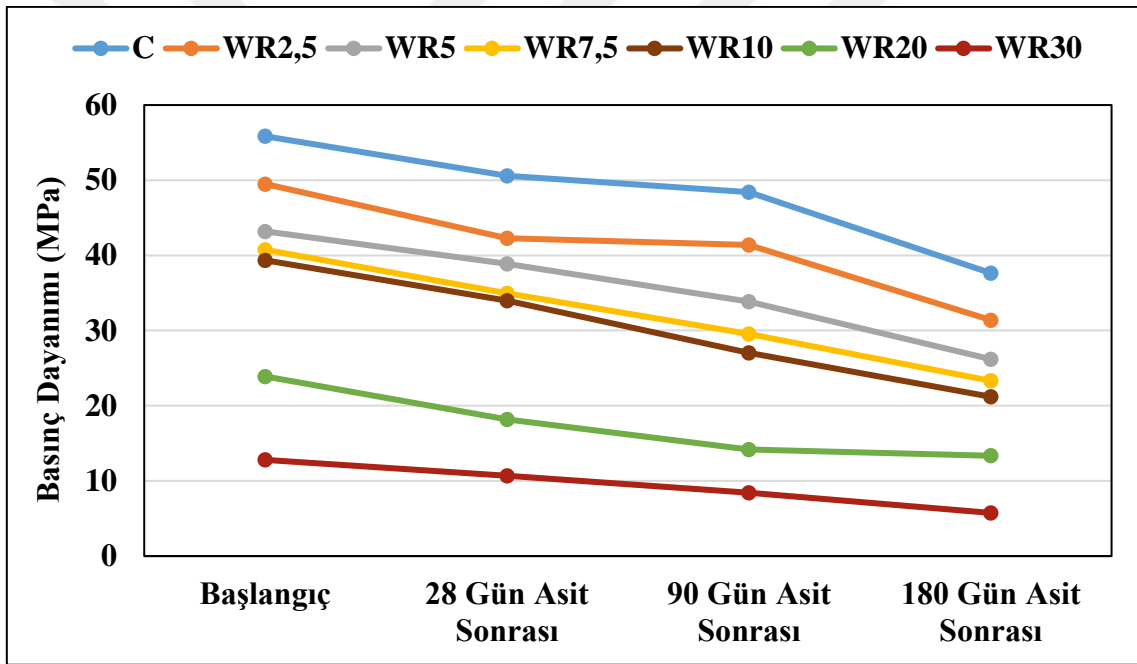
Karışım	Atık Lastik İçeriği	Basınç Dayanımları (MPa)			
		Başlangıç	28 Gün Sülfat Sonrası	90 Gün Sülfat Sonrası	180 Gün Sülfat Sonrası
C	%0	55,85	59,95	67,30	55,35
WR2,5	%2,5	49,50	54,75	58,80	55,55
WR5	%5	43,20	46,55	54,25	46,45
WR7,5	%7,5	40,75	40,85	44,55	42,15
WR10	%10	39,35	40,60	41,70	40,15
WR20	%20	23,90	23,15	21,90	21,7
WR30	%30	12,80	12,70	12,15	10,40

**Şekil 114.** SSB numunelerin sülfat etkisi basınç dayanımlarının atık lastik oranına göre değişimi.

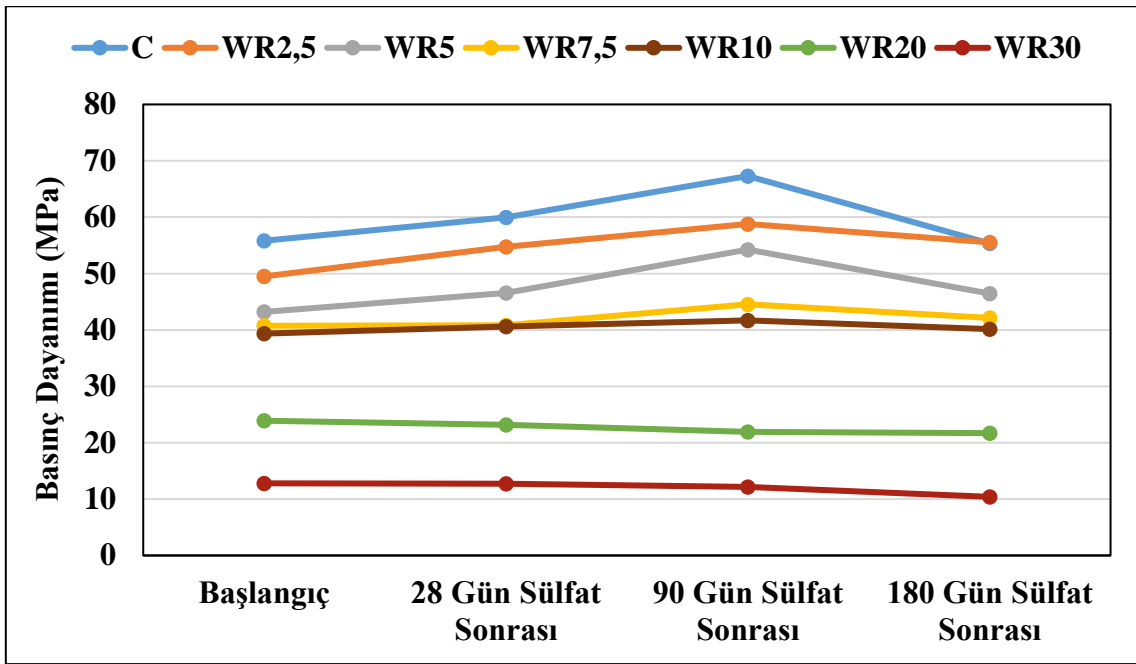
SSB numunelerin sülfat etkisi öncesi ve sonrası basınç dayanım sonuçları incelendiğinde asit etkisinden farklı olarak sürekli bir dayanım kaybı durumu gerçekleşmemiştir. %10'a kadar atık lastik içeren 28, 90 ve 180 gün sülfat çözeltisine maruz SSB karışımlarda dayanım artışı meydana gelmiştir. %20 ve %30 atık lastik içeren karışımlarda (WR20 ve WR30) ise asit etkisindeki benzer şekilde sülfat çözeltisine maruz kalma süreci arttıkça numunelerin basınç dayanımlarında azalma meydana gelmiştir. Sülfat etkisi sonrası en yüksek dayanım artışı 90 gün sülfat etkisi sonrası yaklaşık %25 oranla %5 atık lastik katkılı (WR5) numunelerinde meydana gelmiştir. En fazla dayanım kaybı ise 180 gün sülfat etkisi sonrası %18 oranla %30 atık lastik katkılı (WR30) numunelerde

gerçekleşmiştir. Sülfat etkisi sonrası basınç dayanım sonuçları atık lastik içeriği açısından incelendiğinde, bütün numunelerde atık lastik oranı arttıkça dayanım kaybının arttığı gözlemlenmiştir.

Asit ve sülfat etkisi sonrası SSB numunelerin basınç dayanım-gün değişim ilişkileri Şekil 115 ve Şekil 116'da verilmiştir. Grafiklerden anlaşılacağı üzere hem asit hem de sülfat etkisi sonuçları incelendiğinde numunelerde dayanım kaybının atık lastik oranı arttıkça arttığı belirlenmiştir. Asit çözeltisine maruz kalan numunelerde basınç kayıpları 28 günden 180 güne kadar artarak devam etmiştir. Bu basınç kayıpları atık lastik oranıyla orantılı olarak artmıştır. Sülfat çözeltisine maruz kalan numunelerin basınç dayanımlarındaki değişim asit etkisinden daha farklı olmuştur. 180 gün sülfat etkisi sonrasına kadar karışımların basınç dayanımında artışlar gözlemlenirken, %20 ve %30 atık lastik içeren karışımlarda 28 günlük sülfat etkisinden itibaren 180 güne kadar sürekli dayanım kaybı meydana gelmiştir.



Şekil 115. SSB numunelerin asit etkisi basınç dayanımlarının günlere göre değişimi.



Şekil 116. SSB numunelerin sülfat etkisi basınç dayanımlarının günlere göre değişimi.

Mhaya *et al.* (2020), atık lastik kauçuk kırıntılarının öğütülmüş granül yüksek fırın çürufu (Ground granulated blast-furnace slag – GBFS) modifiyeli betonlarla ikamesinin uzun dönem mekanik ve dayanıklılık özelliklerini incelemişlerdir. Bu kapsamda, atık lastikleri %5 den %30 oranına kadar ince agrega yerine kullanılmış ve 3, 6 ve 12 hafta %10'luk sülfürik asit etkisi sonrası basınç dayanımlardaki değişimi araştırılmıştır. %30 atık lastik katkılı karışımların 12 hafta sonra basınç dayanım kaybı neredeyse %100'e ulaşmıştır. Gupta *et al.* (2019), atık lastik tozu katkılı betonun agresif çevre şartlarındaki davranışını incelediği çalışmada, %20' ye kadar atık lastik katılan betonların 7, 28, 56, 90 ve 180 günlük %3'lük sülfürik asit çözeltisi etkisi sonrası basınç dayanımı kaybını incelemiştir. Kontrol ve %20 atık lastik katkılı karışımlarda 180 gün asit etkisi sonrası meydana gelen dayanım kayıpları sırasıyla %56 ve %61 şeklinde gerçekleşmiştir. Thomas *et al.* (2016), atık lastik kauçuğunun betonda agrega olarak geri dönüştürülmesinde dayanıklılıkla ilgili performansını incelemişlerdir. Çalışmada kırıntı kauçuğu, %2,5'in katları halinde %0'dan %20'ye kadar doğal ince agregalar yerine kullanılmış ve numunelerin 28, 54 ve 84 günlük sülfürik asit sonrası basınç dayanımları araştırılmıştır. Kontrol, %10 ve %20 atık lastik katkılı karışımlarda 84 gün asit etkisi sonrası meydana gelen dayanım kayıpları sırasıyla %78, %66 ve %56 oranında olmuştur. Tiwari and Gangwar (2021), kauçuklaştırılmış betonda asit saldırısının etkisinin değerlendirilmiştir. Çalışmada ince agreganın kısmi ikamesi olarak %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kırıntı kauçuğu kullanılmıştır. Karışımların 28 günlük sülfürik asit etkisi sonrası basınç dayanımları değerlendirilmiştir. Atık lastik katkısız, %5, %10, %15

ve %20 oranlarında atık lastik katkıli karışımların 28 gün asit çözeltisi sonrası dayanım kayıp yüzdeleri sırasıyla yaklaşık %25, %19, %18, %19 ve %21 olarak belirlenmiştir.

Orhan *et al.* (2023), kırıntı kauçuk ile modifiye edilmiş cüruf bazlı geopolimer betonun dayanıklılık özelliklerini incelemiştir. Çalışmada ince agrega yerine %15 oranına kadar atık lastik kullanılan beton karışımlar, 4, 8 ve 12 hafta boyunca %5 sodyum sülfat çözeltisinde maruz bırakılarak dayanım değişimleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar basınç dayanımlarında artış olduğunu göstermiştir. Sülfat etkisine maruz kalmayan kontrol numuneleriyle kıyaslandığında 4, 8 ve 12 haftalık sülfat etkisi sonrası referans karışımlarda sırasıyla %20, %14 ve %6 ve %15 atık lastik katkıli karışımlarda ise sırasıyla %55, %51 ve %49 oranlarında basınç dayanımı artışı elde edilmiştir. Rashad and Sadek (2020), yoğun sülfat saldırısı etkisi altında atık kauçuk tozuyla karıştırılmış betonların davranışını incelemiştir. Bu kapsamda %15'e kadar atık lastik katkıli numuneler ıslak/kuru döngü yöntemi kullanılarak yoğun sülfat saldırısına maruz bırakılmış ve 5, 10, 15 ve 20 ıslak/kuru döngüsü sonrası numunelerin basınç dayanımları araştırılmıştır. 5 ve 10 döngü sonunda numunelerin basınç dayanımları kontrol numunelerine göre daha yüksek çıkmıştır. Xu *et al.* (2015), sülfat atağının neden olduğu kauçuk betondaki bozulmalar adlı çalışmalarında, ince agrega yerine %20'ye kadar (%0, %5, %10, %15 ve %20) atık lastik tozu kullandıkları numuneleri 30, 60, 90 ve 120 gün boyunca %5 Sodyum sülfat çözeltilerine maruz bırakmışlardır. %15'e kadar atık lastik tozu içeren karışımların 30 günlük sülfat etkisi sonrası basınç dayanımları sırasıyla %1, %11, %12, %11 oranında artış göstermişken %20 atık lastik tozu içeren karışımlarda ise %4 düşüş göstermiştir. 60 günlük sülfat etkisi sonrası ise atık lastik katkısiz karışımlarda dayanım neredeyse değişmezken %5, %10 ve %15 atık lastik katkıli karışımlarda basınç dayanım artışı devam etmiştir. 90 ve 120 gün sülfat etkisi sonrası ise tüm karışımlarda dayanım kaybı gözlemlenmiştir.

Sonuçlar literatürdeki sonuçlarla benzer şekilde elde edilmiştir. Asit etkisi sonrası numunelerin basınç dayanımlarında düşüşler gözlemlenmiştir. Sülfat etkisi sonrası ise %10'a kadar atık lastik içeren numunelerin basınç dayanımlarında artış, %10'dan sonra atık lastik içeren numunelerin basınç dayanımlarında da düşüşler gözlemlenmiştir. Asit etkisi sonrası basınç dayanımlarındaki düşüş, kauçuk agregalarının daha düşük bağlanma mukavemetinden kaynaklanabilmektedir. Sülfat etkisi sonrası basınç dayanımlarındaki artış ise sülfat çözeltisinin, betonun gözenek ağındaki etrenjitin çözülmesine ve ardından yeniden büyümesine neden olarak mikroyapıda yoğunlaşmasıyla açıklanabilmektedir.

Ultrases geçiş hızı

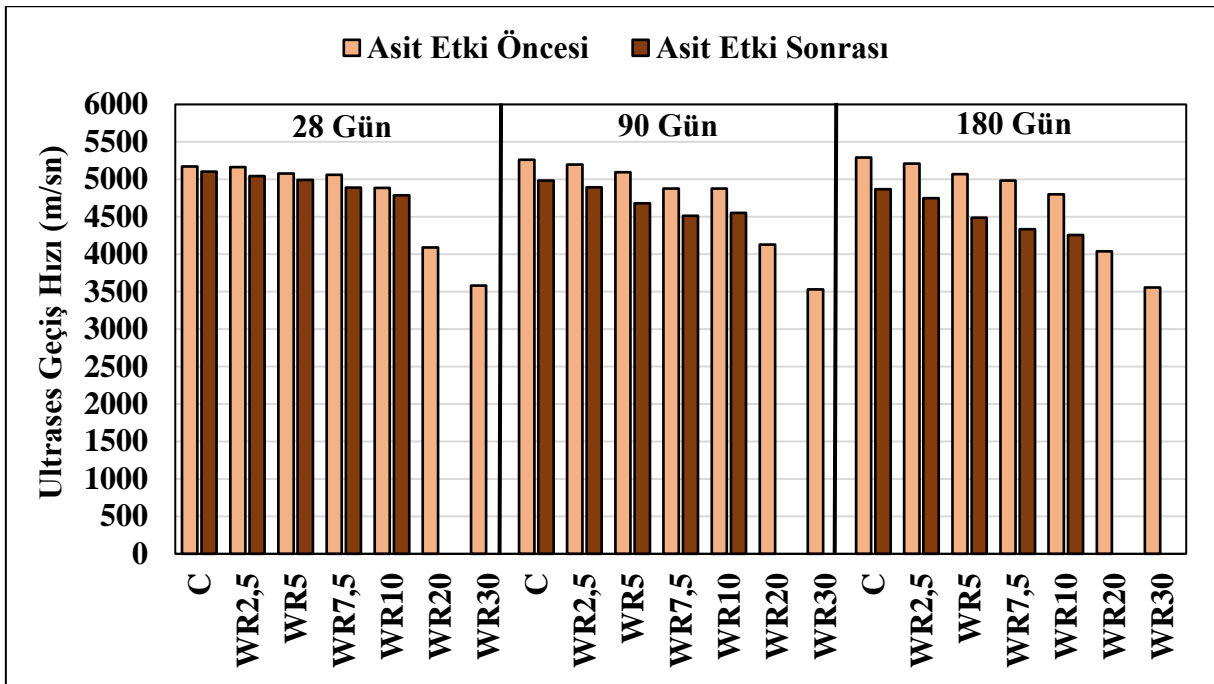
Çalışma kapsamında 150 x 150 x 150 mm boyutlarında küp şeklinde üretilen yapılan 28 günlük SSB numunelerin asit ve sülfat etkisi öncesi ve sonrası UPV değerleri ASTM C597

(Anonymous 2023f) standardına göre ölçülmüştür. Numunelerin asit ve sülfat etkisi öncesi ve sonrası UPV sonuçları Tablo 31 ve Tablo 32 ile birlikte Şekil 117 ve Şekil 118’de verilmiştir. Her beton grubu için üç numune test edilmiş ve ortalama değer deneysel sonuç olarak kullanılmıştır.

Tablo 31. SSB Numunelerin Asit Etkisi UPV Sonuçları

Karışım	Ultrases Geçiş Hızı (m/sn)					
	28 Günlük Asit Etkisi		90 Günlük Asit Etkisi		180 Günlük Asit Etkisi	
	Öncesi	Sonrası	Öncesi	Sonrası	Öncesi	Sonrası
C	5172,41	5102,04	5263,16	4983,39	5291,01	4870,13
WR2,5	5163,51	5043,71	5199,31	4893,96	5208,33	4746,84
WR5	5076,14	4991,68	5093,38	4680,19	5067,57	4489,67
WR7,5	5059,02	4890,77	4878,05	4511,28	4983,39	4335,26
WR10	4885,99	4787,74	4878,05	4552,35	4800,00	4257,73
WR20	4090,54	-	4128,82	-	4037,69	-
WR30	3579,95	-	3529,41	-	3554,50	-

SSB numunelerin asit etkisi öncesi ve sonrası UPV sonuçları incelendiğinde, asit çözeltilisine maruz kalma süreci arttıkça bütün numunelerin UPV değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Ancak %20 ve %30 atık lastik içeren karışımların 28, 90 ve 180 günlük asit etkisi sonucunda numunelerin yüzeylerindeki bozulması sonucu oluşan girinti çıkıntıların fazlalığından dolayı yüzeylerden yapılan UPV ölçümlerinde değerler okunamamıştır. Atık lastik katılmayan kontrol numunelerinin (C) başlangıç UPV değerleri yaklaşık olarak 5291 m/sn iken bu değer 180 günlük asit etkisi sonrası %8 oranında azalarak 4870 m/sn’ye kadar gerilemiştir. Kontrol numunelerindeki bu UPV kaybı oranları 28 ve 90 günlük asit etkisi sonrası sırasıyla %1 ve %5 oranında gerçekleşmiştir. %10 atık lastik katkılı (WR10) numunelerin UPV sonuçları incelendiğinde ise başlangıç UPV değerleri yaklaşık olarak 4800 m/sn iken bu değer 180 günlük asit etkisi sonrası %8 oranında azalarak 4258 m/sn’ye kadar gerilemiştir. WR10 numunelerindeki bu UPV kaybı oranları 28 ve 90 günlük asit etkisi sonrası sırasıyla %2 ve %7 oranında gerçekleşmiştir.

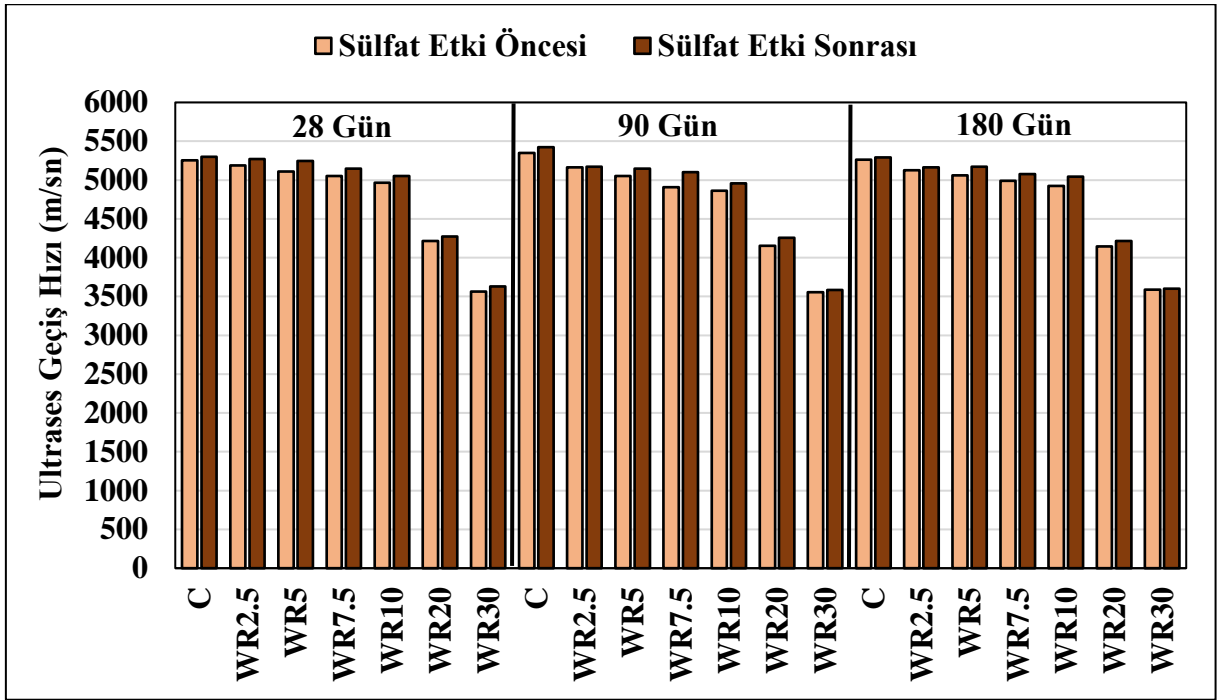


Şekil 117. SSB numunelerin asit etkisi UPV değerlerinin atık lastik oranına göre değişimi.

Tablo 32. SSB Numunelerin Sülfat Etkisi UPV Sonuçları

Karışım	Ultrases Geçiş Hızı (m/sn)					
	28 Günlük Sülfat Etkisi		90 Günlük Sülfat Etkisi		180 Günlük Sülfat Etkisi	
	Öncesi	Sonrası	Öncesi	Sonrası	Öncesi	Sonrası
C	5253,94	5300,35	5347,59	5424,95	5263,16	5291,01
WR2,5	5190,31	5272,41	5163,51	5172,41	5128,21	5163,51
WR5	5110,73	5244,76	5050,51	5145,80	5059,02	5172,41
WR7,5	5050,51	5145,80	4909,98	5102,04	4991,68	5076,14
WR10	4966,89	5050,51	4862,24	4958,68	4926,11	5042,02
WR20	4213,48	4273,50	4155,12	4255,32	4143,65	4213,48
WR30	3562,95	3629,32	3554,50	3584,23	3588,52	3599,71

SSB numunelerin sülfat etkisi öncesi ve sonrası UPV sonuçları incelendiğinde, sülfat çözeltisine maruz kalma süreci arttıkça bütün numunelerin UPV değerlerinde artış meydana gelmiştir. Atık lastik katılmayan kontrol numunelerinin (C) başlangıç UPV değerleri yaklaşık olarak 5263 m/sn iken bu değer 180 günlük sülfat etkisi sonrası %0,5 oranında artarak 5291 m/sn'ye kadar yükselmiştir. Kontrol numunelerindeki bu UPV artış oranları 28 ve 90 günlük sülfat etkisi sonrası sırasıyla %1 ve %1,5 oranında gerçekleşmiştir. %30 atık lastik katılı (WR30) numunelerin UPV sonuçları incelendiğinde ise başlangıç UPV değerleri yaklaşık olarak 3588 m/sn iken bu değer 180 günlük sülfat etkisi sonrası %0,5 oranında artarak 3600 m/sn'ye kadar yükselmiştir. WR30 numunelerindeki bu UPV artış oranları 28 ve 90 günlük sülfat etkisi sonrası sırasıyla %2 ve %1 oranında gerçekleşmiştir.



Şekil 118. SSB numunelerin sülfat etkisi UPV değerlerinin atık lastik oranına göre değişimi.

Mhaya *et al.* (2020), atık lastik kauçuk kırıntılarının GBFS modifiye betonlarla ikamesinin uzun dönem mekanik ve dayanıklılık özelliklerini incelemişlerdir. Bu kapsamda, atık lastikleri %5 den %30 oranına kadar ince agrega yerine kullanılmış ve 3, 6 ve 12 hafta %10'luk sülfürik asit etkisi sonrası UPV değerlerindeki değişim araştırılmıştır. Daha yüksek atık lastik içeriğinde daha fazla UPV değer kaybı olduğu belirlenmiştir. %30 atık lastik katkılı karışımların 12 hafta asit etkisi sonrası UPV değerleri yaklaşık olarak 1200 m/sn'den 1050 m/sn'ye kadar gerileyerek %12 UPV kaybı meydana gelmiştir. Dezhampannah *et al.* (2020), asit saldırısına maruz kalan atık lastik kauçuğu içeren betonun çevresel performansı ve dayanıklılığını incelemişlerdir. Bu kapsamda %10 ve %20 atık lastik içeren betonların 15, 30, 45, 60 ve 90 günlük %5 sülfürik asit çözeltisinde bekletilmesi sonrasında UPV değerleri ele alınmıştır. %10 ve %20 atık lastik katkılı karışımların 90 gün asit etkisi sonrası UPV değer kayıpları sırasıyla %41 ve %40 oranlarında gerçekleşmiştir.

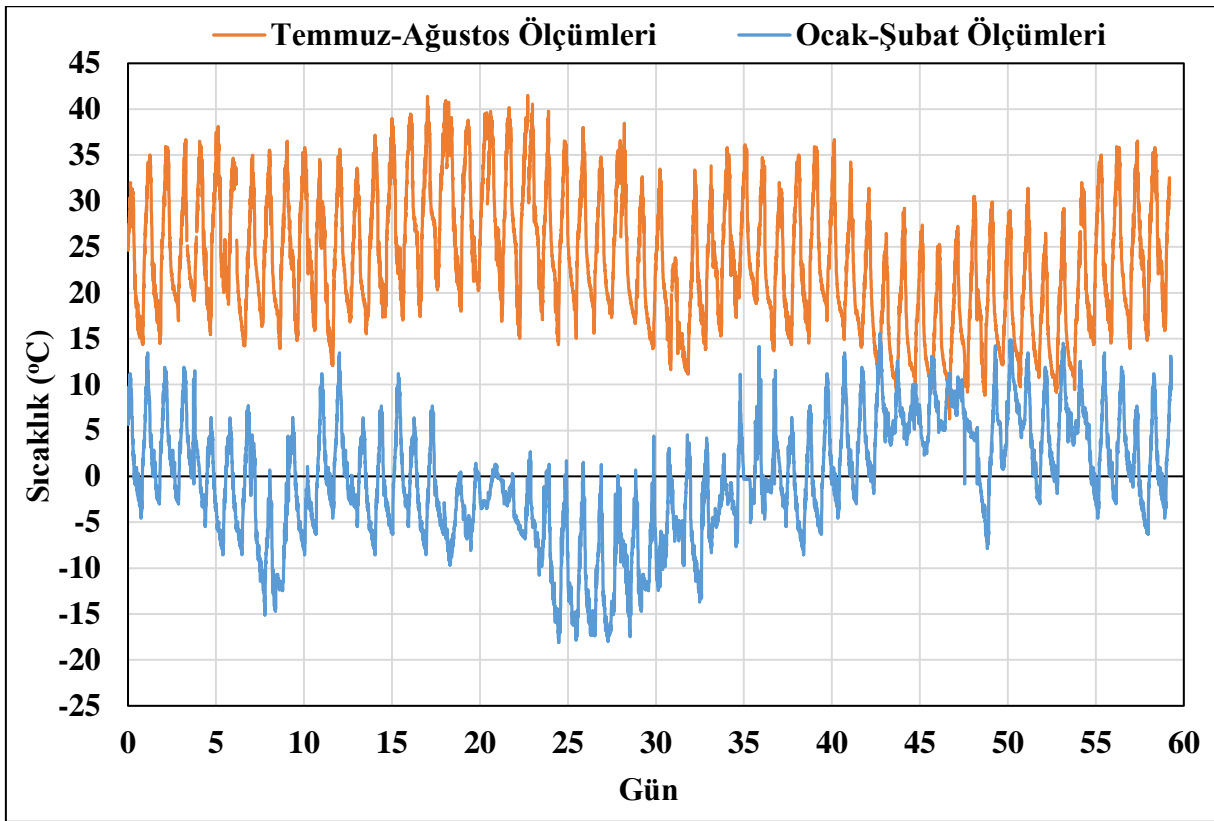
Mhaya *et al.* (2020), agresif ortamlara maruz kalan modifiye kauçuklu betonun performans değerlendirmesi adlı çalışmada, atık lastikleri %30 oranına kadar ince agrega yerine kullanılmış ve 180 ve 365 günlük sülfat çözeltisi sonrası UPV değerlerini incelemişlerdir. Referans ve %30 atık lastik karışımların 180 günlük sülfat etkisi sonrası UPV değerleri birbirlerine çok yakın olmakla birlikte yaklaşık olarak 2800 m/sn olarak belirlenmiştir. Kumar *et al.* (2022), sülfat çözeltisinin modifiye kauçuklu betonun uzun vadeli dayanıklılığına etkisini araştırmışlardır. %15 lastik içeren beton karışımlar, % 5 sodyum sülfat çözeltisinde 4, 8, 12 ve 24 hafta bekletildikten UPV sonuçları incelenmiştir. 24 haftalık sülfat

etkisine maruz kalma sonucunda atık lastik katkıli karışımlarda %3 oranında düşüş yaşanmıştır.

SSB numunelerin asit ve sülfat etkisi öncesi ve sonrası UPV değerleri genel olarak değerlendirdiğinde, asit etkisi sonrası SSB numunelerin UPV değerlerinde azalma, sülfat etkisi sonrası ise bir artış durumu gerçekleşmiştir. Asit etkisi sonrası SSB numunelerin UPV değerleri %10'a kadar atık lastik katkıli numunelerde elde edilebilmiştir. SSB numunelerin UPV değerlerinde 180 günlük asit etkisi sonucunda %13'e kadar kayıp yaşandığı ve atık lastik ile birlikte asit çözeltilisine maruz bırakılan gün sayısı ile orantılı şekilde bu kaybın arttığı belirlenmiştir. Sülfat sonrası SSB numunelerde meydana gelen UPV artışları ise gerek atık lastik içeriği gerekse de sülfat çözeltilisine maruz bırakılan gün sayısı açısından incelendiğinde birbirlerine çok yakın olmakla birlikte %0 ile %2 oranında değişmektedir.

Sonlu Elemanlar Analizi

Atık lastik katkıli SSB karışımların değişen dış çevre ortam sıcaklığı altındaki davranışlarını incelemek amacıyla üretilen 200 x 1000 x 1000 mm boyutlarında plak numunelerden yaz ve kış mevsimlerinin sıcaklık değerlerinin pik olduğu temmuz-ağustos ve ocak-şubat aylarında sıcaklık dağılım verileri 60 kanal kapasiteli Graphtec GL840 M çok kanallı sıcaklık veri kaydedici vasıtasıyla toplanmıştır. Yaz ve kış aylarında yapılan hava sıcaklığı ölçüm sonuçları Şekil 119'da verilmiştir. Ocak ve şubat aylarında maksimum ve minimum sıcaklıklar 15,57 °C ve -18,11 °C olarak ölçülmüştür. Temmuz ve ağustos aylarında ise ölçülen maksimum ve minimum sıcaklıklar 41,46 °C ve 6,28 °C'dir



Şekil 119. Yaz ve kış aylarında ölçülen hava sıcaklığının zamana göre değişimi.

Elde edilen bu hava ölçümlerinin plak üzerindeki etkileri köşe, kenar ve orta noktalardan elde edilen sıcaklık verileri ile kıyaslanmıştır. Plaklarda üst ve alt tabaka sıcaklık değişiminin artması sıcaklık farkından dolayı oluşan gerilmeleri artırmaktadır. Bu yüzden plakların üst ve alt tabaka arasında meydana gelen sıcaklık farkının en fazla olduğu kış ve yaz ölçüm günleri ve saatleri dikkate alınmıştır. SSB plakların üst ve alt tabaklarındaki sıcaklık farkının en fazla olduğu gün ve saat, yaz ölçümü için 3 Temmuz saat 13:09, kış ölçümü için ise 1 Şubat saat 13:50'deki ölçümlerde elde edilmiştir. Bu tarihlerde SSB plakların köşe, kenar ve orta noktaların üst, orta ve alt tabakalarından ölçülen yaz ve kış sıcaklık değerleri Tablo 33 ve Tablo 34'te verilmiştir.

Tablo 33. SSB Plakların Yaz Aylarındaki Sıcaklık Ölçüm Sonuçları

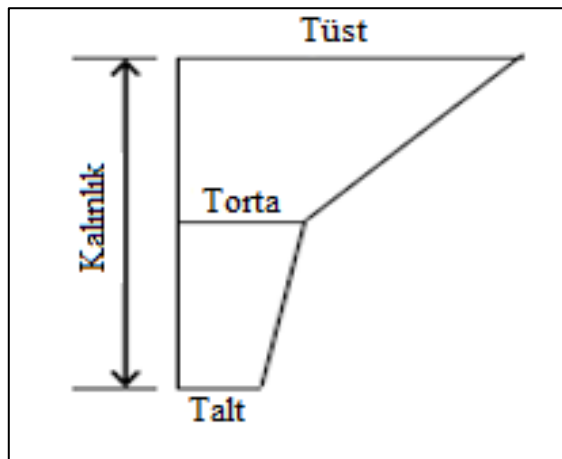
Karışım	Köşe Noktası			Kenar Noktası			Orta Nokta		
	Üst	Orta	Alt	Üst	Orta	Alt	Üst	Orta	Alt
C	41,73	35,73	31,46	44,25	34,57	31,22	40,13	32,72	28,54
WR2,5	48,78	40,33	36,44	41,49	35,24	31,24	40,53	32,66	28,35
WR5	47,17	38,76	34,87	45,56	37,11	33,37	40,89	32,41	28,14
WR10	44,99	39,17	36,67	42,95	32,87	29,07	41,13	32,11	28,01
WR20	45,00	35,67	31,65	39,62	30,41	25,79	41,38	31,87	27,90

Tablo 34. SSB Plakların Kış Aylarındaki Sıcaklık Ölçüm Sonuçları

Karışım	Köşe Noktası			Kenar Noktası			Orta Nokta		
	Üst	Orta	Alt	Üst	Orta	Alt	Üst	Orta	Alt
C	8,30	8,85	7,04	20,51	12,68	9,13	15,96	9,69	5,48
WR2,5	26,09	19,25	14,85	18,14	13,35	9,09	16,12	9,74	5,40
WR5	22,57	15,84	12,27	21,74	14,58	10,79	16,88	9,41	5,42
WR10	20,53	15,33	13,58	18,44	10,39	7,50	16,91	8,56	5,21
WR20	21,07	12,31	8,50	16,75	7,77	3,69	17,23	8,49	4,72

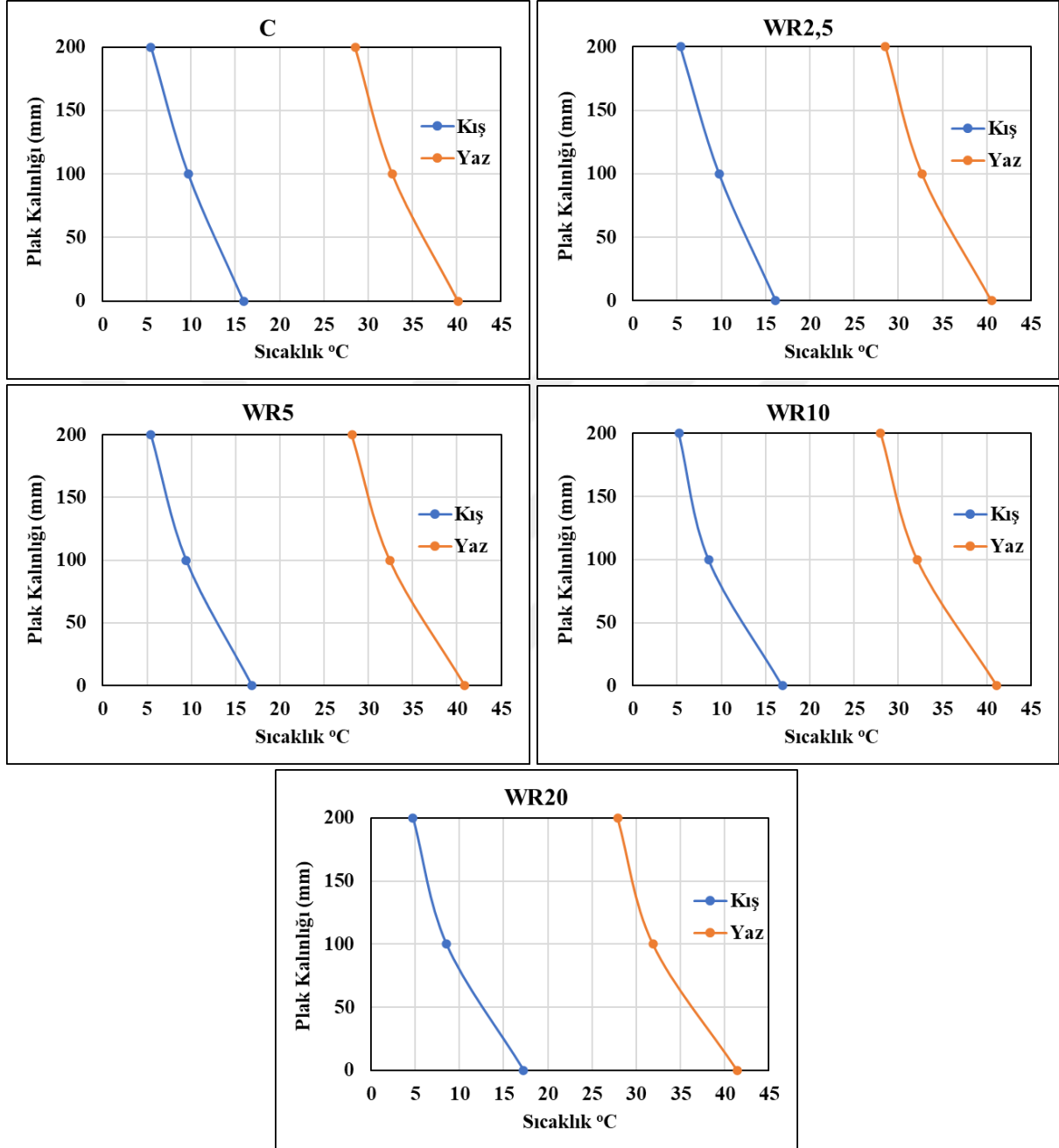
SSB plaklardan elde edilen sıcaklık ölçümleri incelendiğinde, plakların orta noktalarındaki üst ve alt tabaka arasındaki sıcaklık farkının diğer kenar ve köşe noktalarında ölçülen değerlerden fazla olduğu belirlenmiştir. Sıcaklık farkının daha fazla olması, daha fazla gerilmelere yol açtığından dolayı sonlu eleman modellemelerinde plakların orta noktasından elde edilen sıcaklık ölçüm değerleri kullanılmıştır. Yaz ve kış ölçümleri dikkate alındığında, sonlu elemanlar modellemesinde daha fazla sıcaklık farkının elde edildiği yaz ölçümleri girdi verisi olarak kullanılmıştır.

Westergaard'ın (1926) plaklardaki lineer sıcaklık dağılımı hipotezinin aksine, beton plak kalınlığı boyunca ölçülen sıcaklık profilleri doğrusal olmamaktadır (Baş *et al.* 2022). Choubane and Tia (1992), beton plaklarda kalınlık boyunca doğrusal olmayan sıcaklık dağılımının dikkate alınmasını önermiştir. Beton plaklarda kalınlık boyunca sıcaklık dağılımı ile ilgili yapılan çalışmalarda doğrusal olmayan sıcaklık değişimi Şekil 120'de gösterildiği gibi bilineer değişim ile hesaplanmıştır. Pozitif ve negatif sıcaklık farkları altında beton plak ortasında meydana gelen sıcaklık değerlerinin hesaplanabilmesi amacıyla farklı formüllerin kullanılması önerilmiştir (Baş *et al.* 2022).

**Şekil 120.** Beton plaklardaki bilineer sıcaklık değişimi.

Bu çalışmada, plak ortasındaki sıcaklık değerleri, üst ve alt katmanlarla birlikte ölçülerek elde edilmiştir. Yaz aylarında maksimum sıcaklık farkının elde edildiği zamandaki

SSB plakların orta noktasından ölçülen sıcaklığın plak kalınlığına göre değişimleri Şekil 121'de verilmiştir. Sonlu elemanlar modellemesinde SSB kaplamalar, dört eşit kalınlığa bölünerek üst ve orta kısım arası ile orta ve alt kısım arasındaki sıcaklık ataması lineer olarak değerlendirip atamalar bu şekilde yapılmıştır.



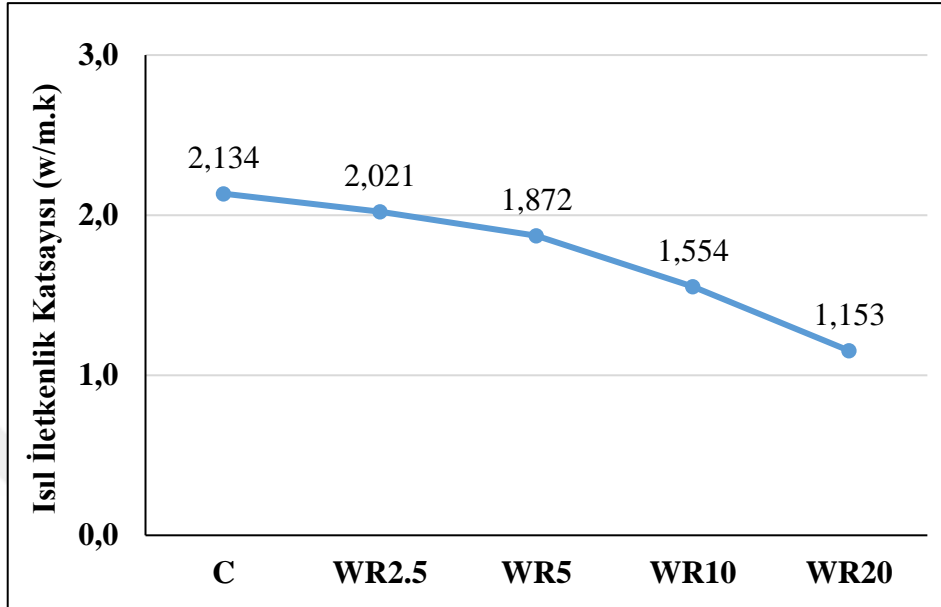
Şekil 121. SSB plakların orta noktasından ölçülen sıcaklığın plak kalınlığına göre değişimi.

200 mm kalınlığındaki SSB kaplamalar için kaplama kalınlığı boyunca ölçülen ve hesaplanan, ANSYS sonlu eleman modellerine atanan sıcaklık dağılımları Tablo 35'de verilmiştir.

Tablo 35. SSB'nin Kaplama Kalınlığı Boyunca Ölçülen ve Hesaplanan Sıcaklık Dağılımları

Karışım	Sıcaklık (°C)	Tabaka Konumu	Tabaka Kalınlığı (mm)	SSB Kalınlığı (mm)	
C	40,13	Üst		200	
	36,42	Orta			50
	31,72				50
	30,63				50
	28,54	Alt			50
WR2,5	40,53	Üst		200	
	36,59	Orta			50
	32,66				50
	30,5				50
	28,35	Alt			50
WR5	40,89	Üst		200	
	36,65	Orta			50
	32,41				50
	30,27				50
	28,14	Alt			50
WR10	41,13	Üst		200	
	36,62	Orta			50
	32,11				50
	30,06				50
	28,01	Alt			50
WR20	41,38	Üst		200	
	36,62	Orta			50
	31,87				50
	29,88				50
	27,9	Alt			50

Çalışma kapsamında sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak SSB plaklarda sıcaklık farkından dolayı meydana gelen gerilmeleri belirlemek için gerekli parametrelerden biri olan numunelerin ısı iletkenlik katsayısı ASTM C177 (Anonymous 2023g) standardına göre belirlenmiştir. Numunelerin ısı iletkenlik katsayısı sonuçları Şekil 122’de verilmiştir.



Şekil 122. SSB numunelerin ısı iletkenlik katsayılarının atık lastik oranına göre değişimi.

Sonlu elemanlar modeli üstten aşağı doğru sırasıyla SSB kaplama ve temel tabakalarından oluşturulmuştur. SSB kaplama ile temel tabakası arasındaki temas yüzeyi bağ kurulmuş (bonded) olarak modellenmiştir. Temel tabakası element tipi olarak granüler malzemeyi yansıtan Solid186 kullanılmıştır. Temel tabakası elastisite modülü 245 MPa, birim hacim ağırlığı 2100 kg/m³, poisson oranı ise 0,3 olarak alınmıştır. Kalınlık ise 150 mm olarak alınmıştır. Bununla birlikte plakların sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi için gerekli olan diğer veriler, önceki bölümlerde anlatılan yöntemlerle belirlenmiş olup Tablo 36’da verilmiştir.

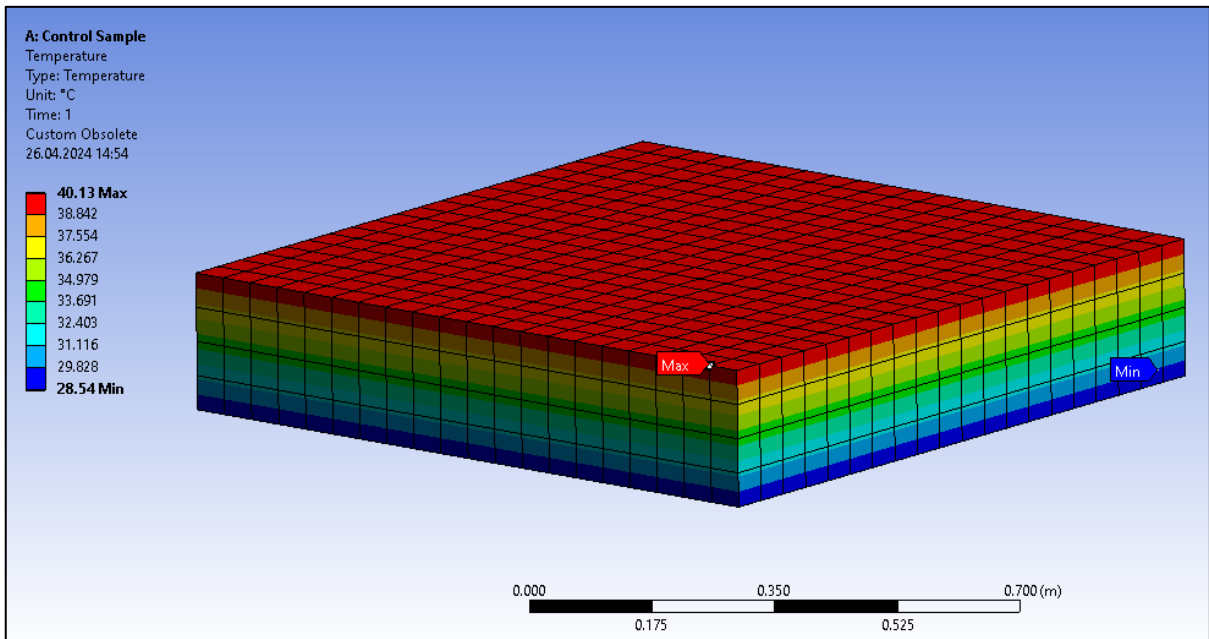
Tablo 36. Plak ve Yol Modellemeleri İçin Sonlu Elemanlar Analizinde Kullanılan Veriler

Karışım	Basınç Dayanımı (Mpa)	Eğilme Dayanımı (Mpa)	Y. Çekme Dayanımı (Mpa)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı	Birim Ağırlık (kg/m ³)	Isıl İletkenlik Katsayısı (w/m.k)
C	46,37	8,83	3,47	37,43	0,2	2442,73	2,134
WR2,5	41,67	8,16	3,17	28,86	0,2	2422,52	2,021
WR5	33,07	7,32	2,97	21,80	0,21	2383,15	1,872
WR10	29,07	6,21	2,45	13,48	0,23	2310,56	1,554
WR20	17,26	4,96	2,10	4,25	0,27	2209,78	1,153

Sıcaklık model doğrulaması

Plak ölçümlerinden elde edilen sıcaklık verilerinin ANSYS modellemesinde girdi olarak atanmasıyla birlikte modellenen 1000 x 1000 x 200 mm boyutlarında plaklardaki ısı akışı ve termal şekil değiştirmelerin doğrulanması gerekmektedir. Bu kapsamda literatürde yer alan ısı akışı ve termal şekil değiştirme matematiksel formülleri kullanılarak elde edilen sonuçlar sonlu elemanlar yönteminde modelleme sonucu elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

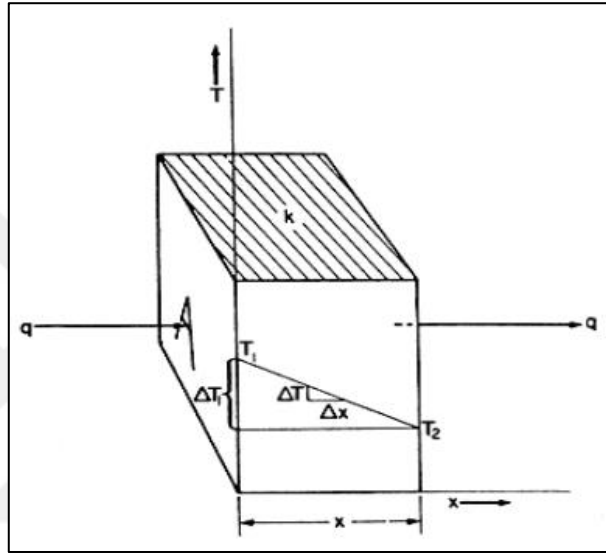
Model doğrulamasında bütün numunelerin verileri kullanılarak doğrulama gerçekleştirilmiştir. Örnek olarak atık lastik içermeyen kontrol numunelerin doğrulama işlemi detaylı olarak aşağıda açıklanmıştır. Yaz aylarında ölçümü yapılan, plak üst ve altında en fazla sıcaklık farkını oluşturan gün ve saatteki sıcaklık değerleri Şekil 123'te gösterildiği gibi plak kalınlığı boyunca atanmıştır.

**Şekil 123.** SSB plaktaki sıcaklık dağılımı.

Isı akışı, ısının bir cisimden daha soğuk başka bir cisme kendiliğinden aktarıldığı dinamik bir süreçtir. Isı transferi oranı, vücutlar arasındaki sıcaklık farklarına bağlıdır;

sıcaklık farkı ne kadar büyükse ısı transferi oranı da o kadar büyük olmaktadır. Bu nedenle ısı kaynağı ile ısı alıcısı arasındaki sıcaklık farkı ısı transferinde itici güçtür. Sıcaklık farkının artması itici gücü artırır ve dolayısıyla ısı transferi hızını artırır. Bir cisimden diğerine geçen ısı, genel olarak ısı akışına direnç gösteren bir ortamdan geçer. Bu faktörlerin her ikisi de, sıcaklık farkı ve ısı akışına karşı direnç, ısı transferi hızını etkiler. Diğer hız süreçlerinde olduğu gibi, bu faktörler genel denklem ile birbirine bağlıdır (Earle 1983).

Şekil 124'de gösterildiği gibi bir malzeme levhasının farklı T1 ve T2 sıcaklıklarında iki yüzü varsa, ısı daha yüksek T1 sıcaklığındaki yüzden daha düşük T2 sıcaklığındaki diğer yüze akacaktır (Earle 1983).



Şekil 124. Bir levha boyunca ısı iletimi (Earle 1983)

Isı akış oranı Fourier denklemi ile aşağıdaki gibi verilmektedir.

$$dQ/dt = kA dT/dx$$

Sabit sıcaklık koşulları altında $dQ/dt = \text{sabittir}$ ve bu Q olarak adlandırılabilir. Ancak birim yol uzunluğu başına sıcaklık değişim oranı olan dT/dx , $(T1 - T2)/L$ ile verilir; burada L levhanın kalınlığı, A yüzey alanı, k ise ısıl iletkenlik katsayısıdır.

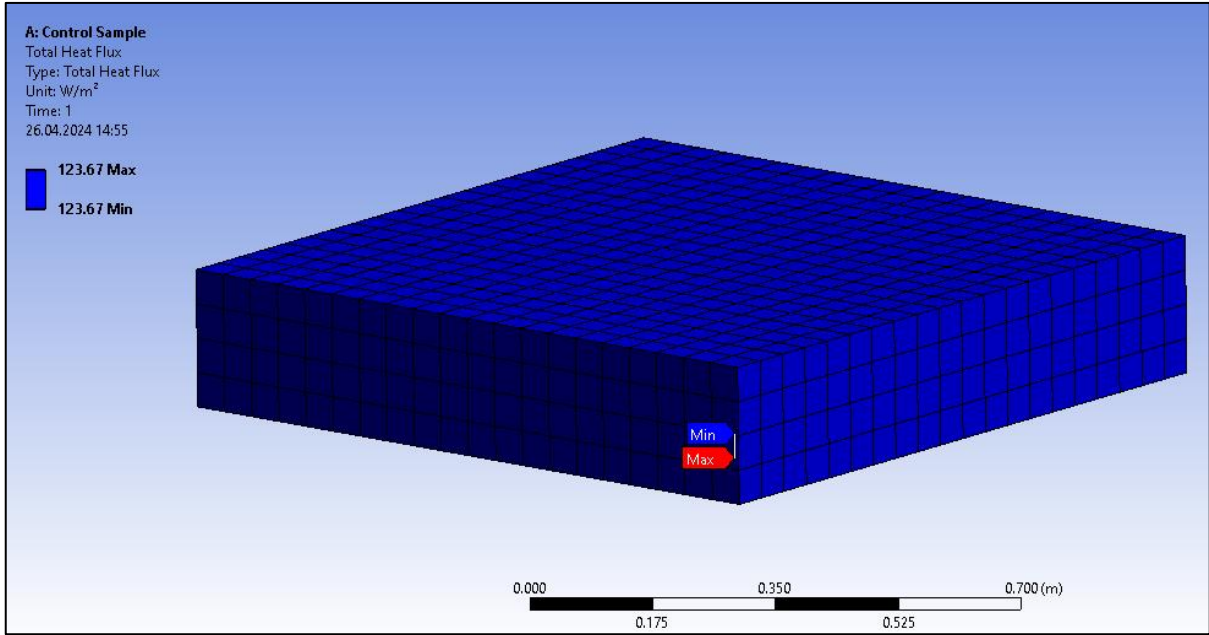
$$Q = kA(T2 - T1)/L$$

Bu, basit ısı akışı için temel denklem olarak kabul edilebilir. Üzerindeki sıcaklık farkı ve malzemenin ısıl iletkenliği biliniyorsa, düzgün malzemedan geçen ısı transfer oranını hesaplamak için kullanılabilir (Earle 1983).

Çalışmadaki kontrol plak numunesinin ısı akış oranı hesaplamak için ısıl iletkenlik katsayısı $2,134 \text{ w/m.k}$, yüzey alanı 1 m^2 , $T2$ ve $T1$ sıcaklıkları sırasıyla $40,13 \text{ }^\circ\text{C}$ ve $28,54 \text{ }^\circ\text{C}$, plak kalınlığı da $0,2 \text{ m}$ alınmıştır. Buna göre kontrol numunesi için ısı akış oranı aşağıdaki şekilde $123,67 \text{ W/m}^2$ olarak hesaplanmıştır.

$$Q=kA(T2-T1)/L = 2,134 \times 1 \times (40,13-28,54) / 0,2= -123,67 \text{ W/m}^2$$

Yukarıdaki değerler, kontrol numunesi için sonlu elamanlar yönteminde girildiğinde, Şekil 125’de gösterildiği aynı sonuçlar elde edilerek ısı akış oranı için sonlu elemanlar modelinin doğrulaması yapılmıştır.



Şekil 125. SSB plaktaki toplam ısı akışı.

Termal şekil değiştirme, sıcaklıktaki değişikliklerden dolayı bir malzemenin içinde meydana gelen gerilimi ifade eder. Başka bir ifadeyle, sıcaklık değişikliklerinin bir sonucu olarak bir nesnenin yaşadığı genişleme veya büzülme şeklindeki deformasyondur (Anonymous 2024f). Termal koşullar altında bir yapının deformasyon miktarı malzemenin özelliğine bağlıdır. Farklı malzemeler farklı miktarlarda deforme olmaktadır (Anonymous 2024g). Termal şekil değiştirme denklemi, aşağıdaki gibi verilmektedir.

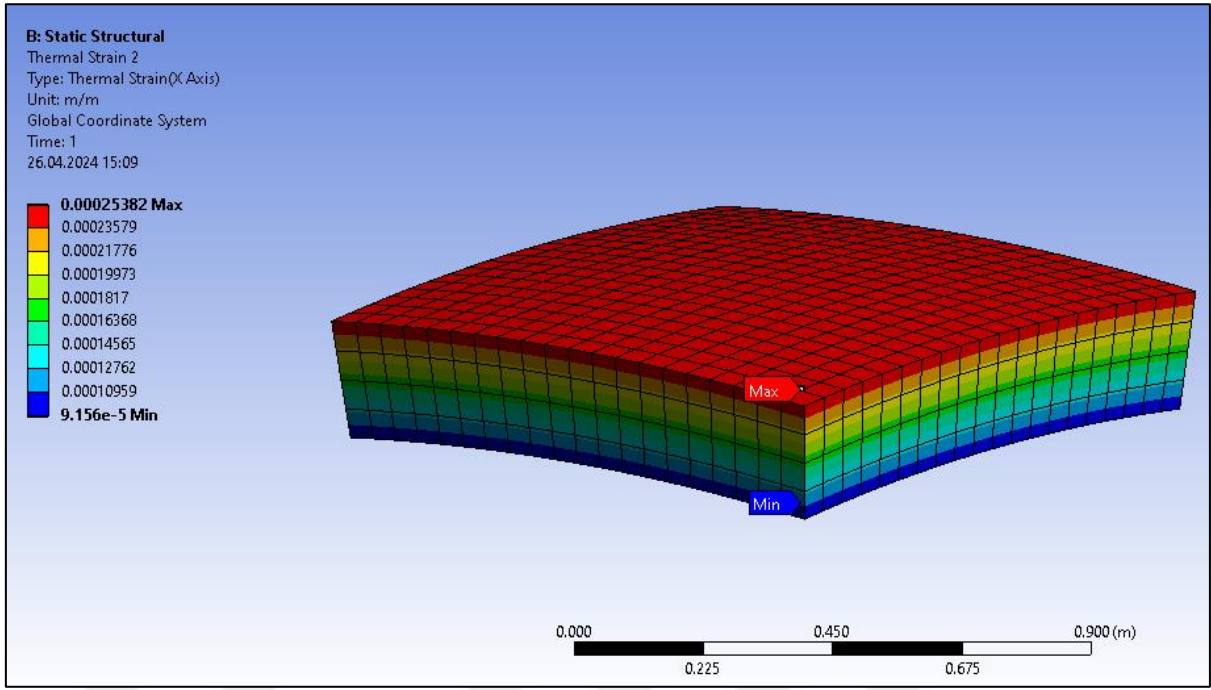
$$\mathcal{E} = \alpha \Delta t = \alpha (T - T_{ref})$$

Burada α ısı genleşme katsayısı, T malzeme sıcaklığı T_{ref} ise referans sıcaklıktır. Çalışmadaki kontrol plak numunesinin maksimum ve minimum termal şekil değiştirmelerini hesaplamak için beton ısı iletkenlik katsayısı $1,4 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, referans sıcaklık $22 \text{ }^\circ\text{C}$, minimum termal şekil değiştirme için sıcaklık $28,54 \text{ }^\circ\text{C}$, maksimum termal şekil değiştirme için sıcaklık da $40,13 \text{ }^\circ\text{C}$ alınmıştır.

$$\mathcal{E}_{T_{min}} = \alpha \Delta t = 1.4E - 05 \times (28,54 - 22) = 0,00009156$$

$$\mathcal{E}_{T_{max}} = \alpha \Delta t = 1.4E - 05 \times (40,13 - 22) = 0,00025382$$

Kontrol numunesi için kurulan sonlu elemanlar modelinde Şekil 126’da gösterildiği gibi analitik yöntemlerle elde edilen aynı sonuçlar elde edilerek maksimum ve minimum termal şekil değiştirmeler için kurulan modelin doğrulaması yapılmıştır.

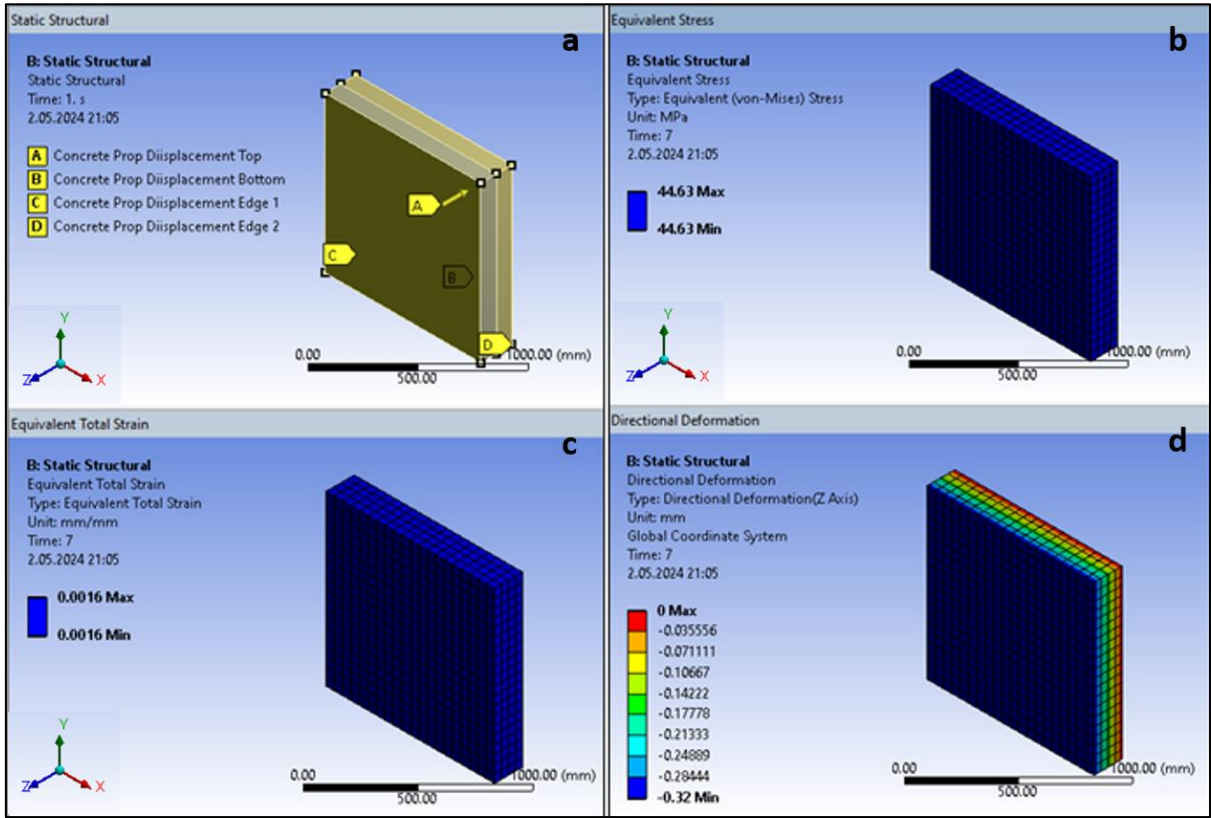


Şekil 126. SSB plaktaki termal şekil değıştirme.

Statik (yapısal) model doğrulaması

Laboratuvar çalışmalarından elde edilen verilerin ANSYS modellemesinde girdi olarak atanmasıyla birlikte modellenen 1000 x 1000 x 200 mm boyutlarında plakların statik modelinin doğrulanması gerekmektedir. Bu kapsamda, numunelere uygulanan tek eksenli basınç testinden elde edilen gerilme ve şekil değıştirme verileri kullanılarak oluşturulan ANSYS statik modelinin doğrulamaları yapılmıştır. rnek model doğrulamasında atık lastik içermeyen kontrol numune verileri kullanılarak doğrulama aşağıdaki gibi gerçekleştirmiştir.

Kontrol betonu için elastisite modülü tek eksenli basınç deneyi ile elde edilmiş olup 37430 MPa olarak alınmıştır. ANSYS'de oluşturulan plak model için sınır şartları Şekil 127a'da verilmiştir. Plağın st yüzeyine Tablo 37'de verilen ve deneysel olarak elde edilen şekil değıştirme verileri uygulanmıştır. Plak alt yüzeyi için Z yönündeki yer değıştirmeleri kısıtlanmıştır.



Şekil 127. SSB plağın statik (yapısal) doğrulanması.

Tablo 37. Kontrol Numunesi İçin Basınç Testi ve Statik Yapısal Analiz İçin Gerilme-Şekil Değiştirme Eğrisi Karşılaştırması

ANSYS Yer Değiştirme (mm)	Kontrol Numunesi Basınç Deneyi		ANSYS	
	Şekil Değiştirme (mm/mm)	Dayanım (MPa)	Şekil Değiştirme (mm/mm)	Dayanım (MPa)
0,000	0,00000	0,000	0,00	0,000
0,002	0,00001	0,374	0,00001	0,374
0,040	0,00020	7,480	0,0002	7,480
0,080	0,00040	14,952	0,0004	14,952
0,120	0,00060	22,412	0,0006	22,412
0,160	0,00080	29,875	0,0008	29,875
0,200	0,00100	37,330	0,0010	37,330
0,320	0,00160	44,630	0,0016	44,630

Deneysel yöntemler sonucu elde edilen veriler girdi olarak girilip statik analiz yapılmıştır. Analiz sonucunda Şekil 127b'den görüleceği üzere maksimum basınç gerilmesi 44,63 MPa olarak elde edilmiştir. Toplam şekil değiştirme Şekil 127c ve Şekil 128'de verildiği üzere 0,0016 mm/mm olarak bulunmuştur. Tek eksenli basınç testi ve statik analiz sonucu elde edilen gerilme-şekil değiştirme verileri Tablo 37'de karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Deney sonucu elde edilen değerlerle sonlu elemanlar analizi sonucu elde edilen

değerler aynı bulunmuş olup R^2 değeri 1,0 olarak elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlarla plakların statik model doğrulaması sağlanmıştır.

Tabular Data					
	Steps	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> [B] Equivalent Stress (Max) [MPa]	<input checked="" type="checkbox"/> Equivalent Total Strain (Max) [mm/mm]	
1	1	1.	0.3743	1.e-005	
2	2	2.	7.48	2.e-004	
3	3	3.	14.952	4.e-004	
4	4	4.	22.412	6.e-004	
5	5	5.	29.875	8.e-004	
6	6	6.	37.33	1.e-003	
7	7	7.	44.63	1.6e-003	

Şekil 128. Kontrol numunesi için statik yapısal analiz gerilme-şekil değiştirme verileri

SSB plakların sonlu elemanlar analiz sonuçları

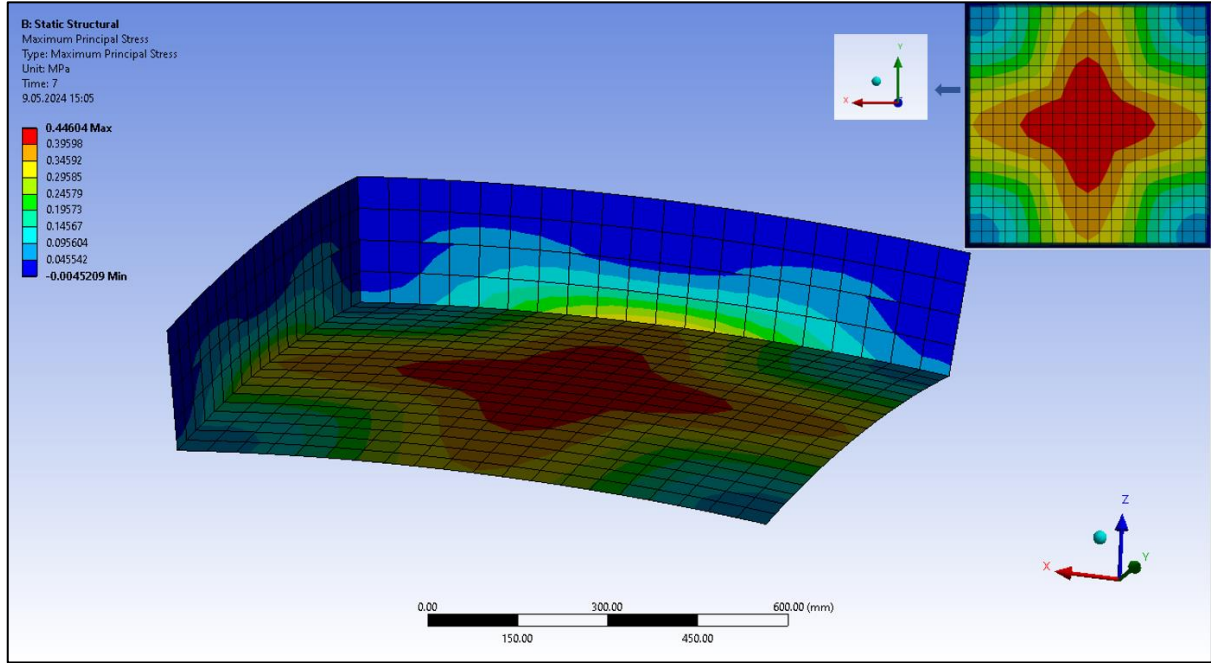
Sonlu elemanlar analizini yapabilmek için model doğrulaması gereken plakların, statik ve sıcaklık model doğrulamalarının yapılmasının ardından sonlu elemanlar analizleri gerçekleştirilmiştir. Bütün karışımların analiz sonrası elde edilen maksimum asal gerilme, X-Y-Z yönlerindeki deformasyonlar, termal ve toplam şekil değiştirme sonuçları Tablo 38’de verilmiştir. Modelleme sonrası yapılan analiz sonucu görüntüleri Şekil 129, Şekil 130, Şekil 131 ve Şekil 132’de de ayrıca verilmiştir.

Tablo 38. SSB Plakların Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

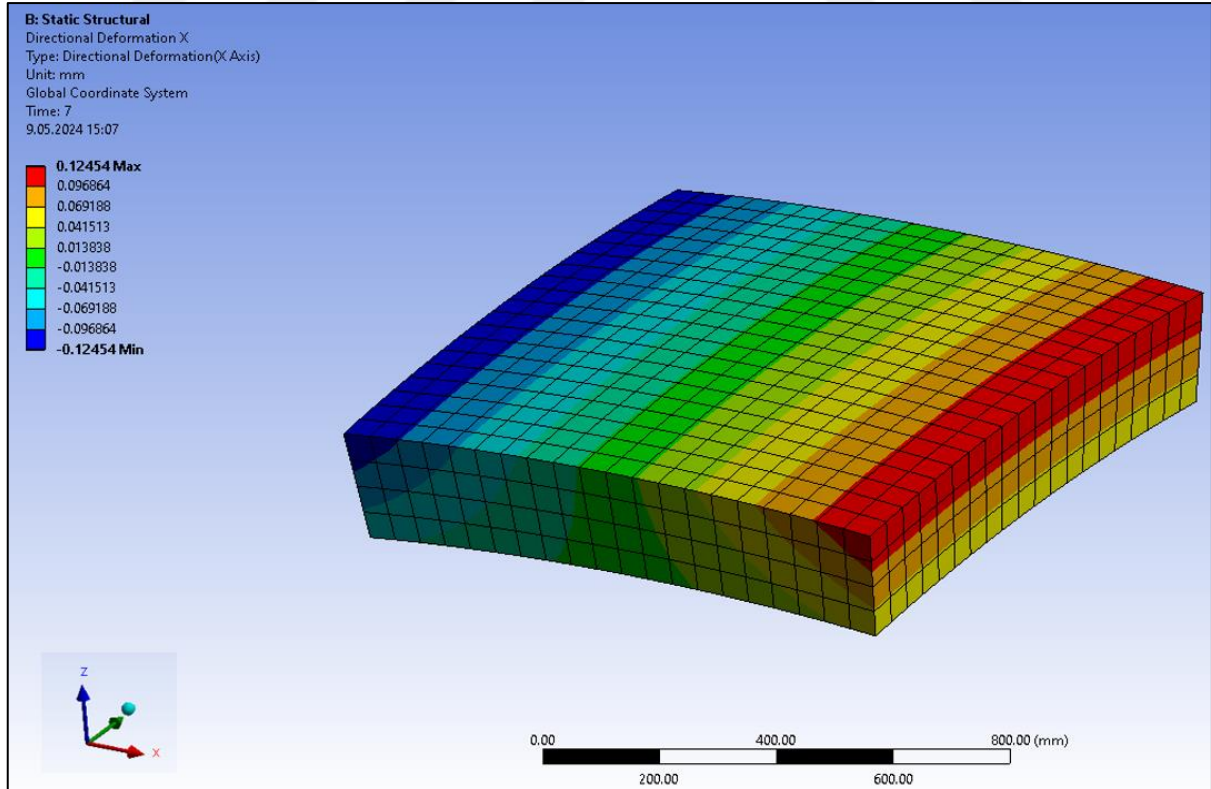
Karışım	Maksimum Asal Gerilme (MPa)	Doğrusal Deformasyon (mm)			Termal Şekil Değiştirme (mm/mm)	Toplam Şekil Değiştirme (mm/mm)
		X Ekseni	Y Ekseni	Z Ekseni		
C	0,44604	0,12454	0,12454	-0,12801	0,00025382	1,25E-05
WR 2,5	0,44337	0,12654	0,12654	-0,13046	0,00025942	1,65E-05
WR 5	0,41095	0,12807	0,12807	-0,13138	0,00026446	2,21E-05
WR 10	0,41183	0,12797	0,12797	-0,12547	0,00026782	3,31E-05
WR 20	0,20655	0,12448	0,12448	-0,10153	0,00027132	6,99E-05

Atık lastik katkılı SSB yollarda, sıcaklık değişimi sonrası sıcaklık farkından dolayı meydana gelen gerilmeleri incelemek amacıyla yapılan sonlu elemanlar analiz sonuçları incelendiğinde, %0, %2,5, %5, %10 ve %20 atık lastik katkılı SSB plaklarda oluşan maksimum gerilmeler sırasıyla yaklaşık olarak 0,45, 0,44, 0,41, 0,41 ve 0,20 MPa olarak elde edilmiştir. Atık lastik içeriğinin artması, sıcaklık etkisiyle plaklarda meydana gelen gerilmeleri azaltmıştır. En fazla oluşan maksimum gerilme kontrol numunesinde meydana gelirken, en az gerilme ise %20 atık lastik katkılı WR20 numunesinde meydana gelmiştir. Plaklarda meydana gelen deformasyonlar incelendiğinde, bütün karışımlarda modellenen plak kenar boyutlarının eşit olmasından dolayı X ve Y ekseni boyunca oluşan deformasyonlar da

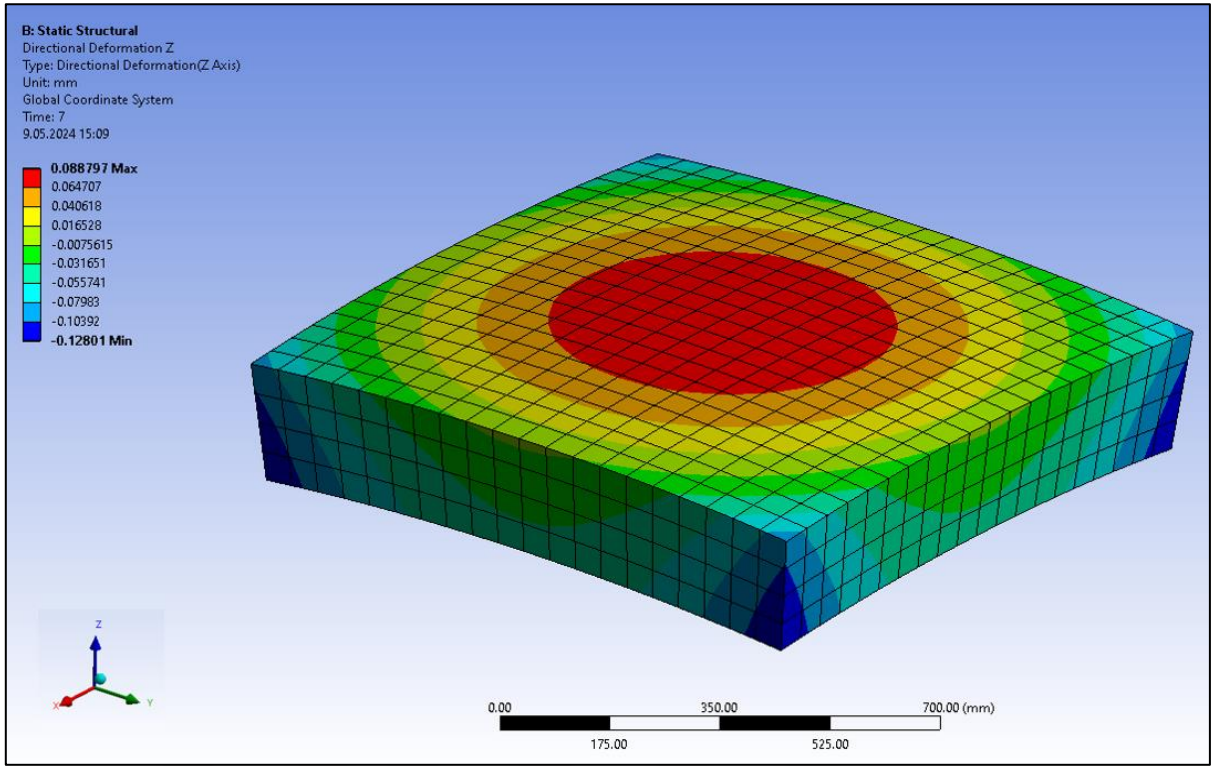
aynı olmuştur. Sonuçlar, atık lastik içeriğinin artmasıyla plaklarda meydana gelen deformasyonların bütün yönlerde (X, Y ve Z) azaldığını göstermiştir. Termal şekil değiştirme sonuçları incelendiğinde sonuçların birbirine çok yakın olduğu ve atık lastik oranının artmasıyla da az da olsa artış gösterdiği görülmektedir. Toplam şekil değiştirmenin de atık lastik oranının artmasıyla arttığı görülmektedir.



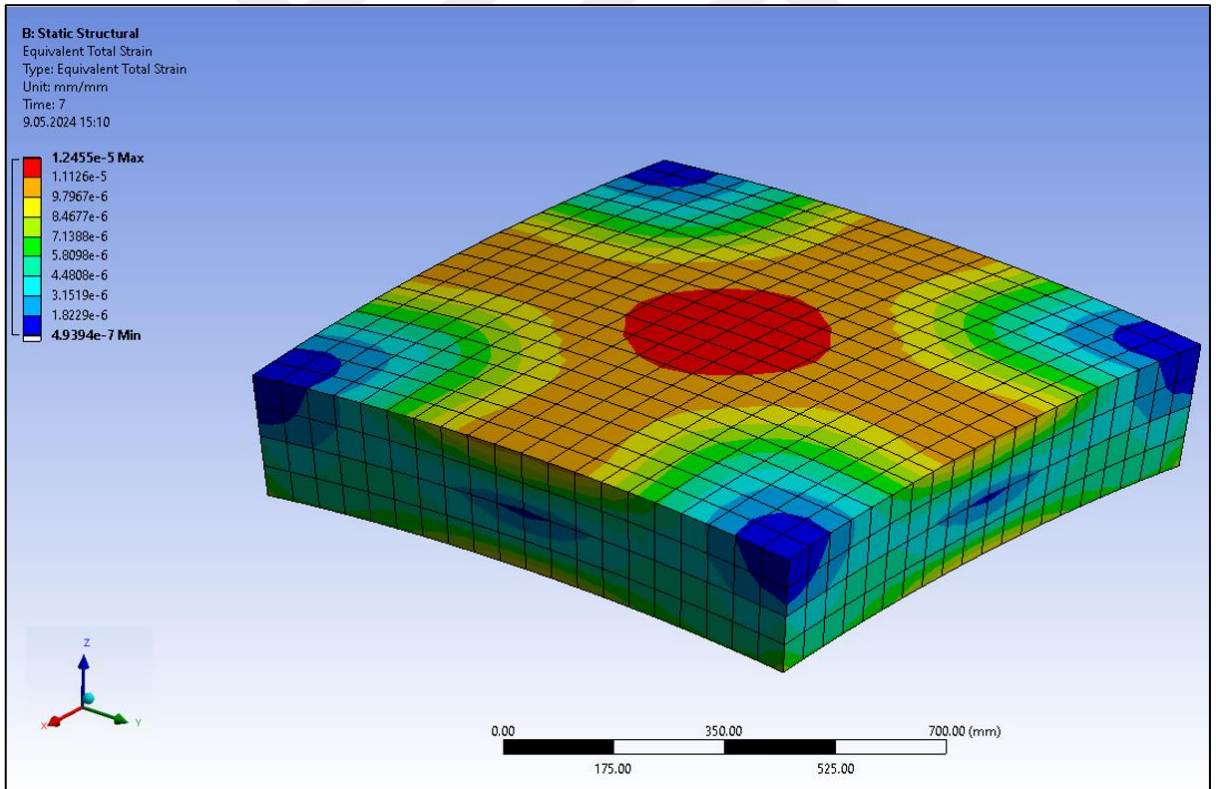
Şekil 129. SSB kontrol plak numunesinde meydana gelen maksimum asal gerilme.



Şekil 130. SSB kontrol plak numunesinde X ve Y yönlerindeki deformasyon.



Şekil 131. SSB kontrol plak numunesinde Z yönündeki deformasyon.

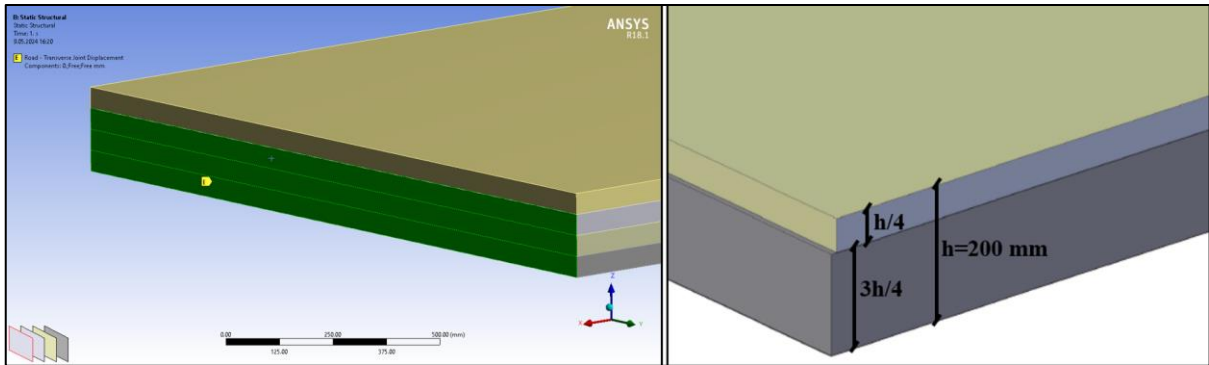


Şekil 132. SSB kontrol plak numunesinde meydana gelen toplam şekil değiştirme.

SSB yolların modellenmesi ve sonlu elemanlar analiz sonuçları

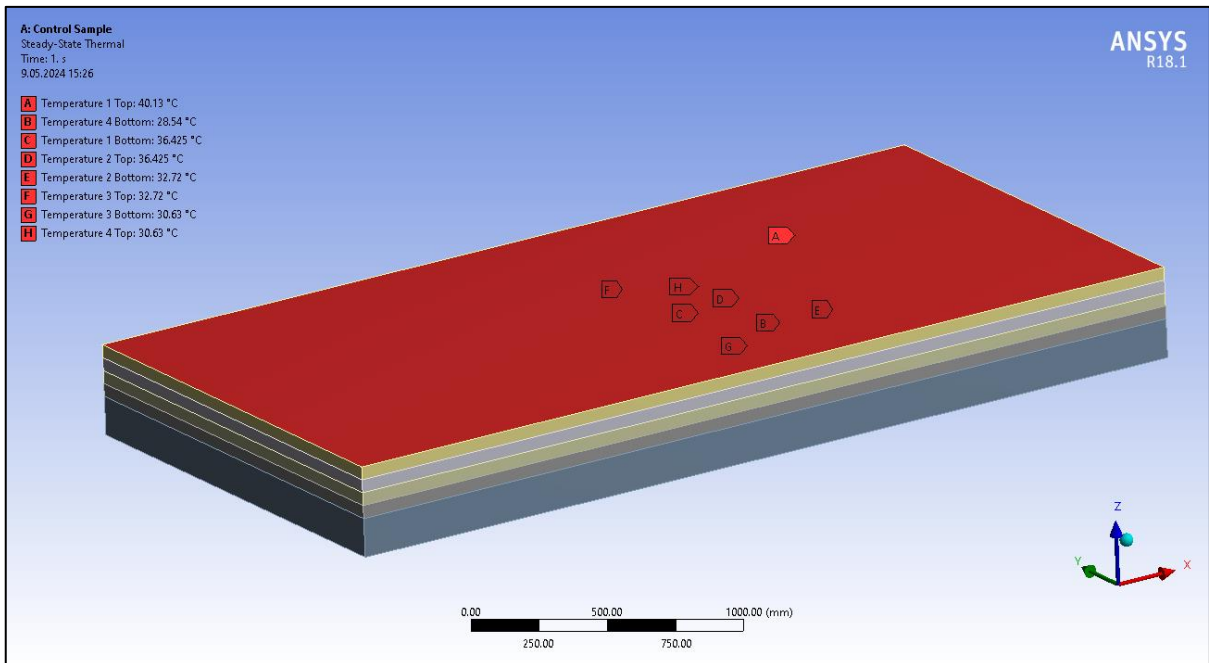
1000 x 1000 x 200 mm boyutlarında plakların modellenmesi, doğrulanması ve analizlerinin ardından sıcaklık değişimi etkisinin gerçek yol boyutları üzerinde etkisini incelemek amacıyla bütün SSB karışımlarına ait 3500 x 7000 x 200 mm boyutlarında SSB

yollar modellenmiştir. Modelleme yapılırken yer değiştirmelerin daha iyi görülmesi amacıyla zemin tabakası hesaptan çıkarılmış ve temel tabakasının alt yüzeyinde bütün serbestlikler kısıtlanmıştır. Bununla birlikte enine kesilen derzleri modellemek adına X yönündeki yer değiştirmeler de belirli kalınlığa kadar kısıtlanmıştır. Bu belirli kalınlık derz kesim derinliğine göre belirlenmiştir. SSB yollarda derz yapımında testere kesimlerinin derinliği kaplama derinliğinin 1/4'ü kadar olmalıdır (Harrington *et al.* 2010). Bu kapsamda Şekil 133'te gösterildiği gibi yol kaplamasının tabandan 150 mm yukarı kadar X yönündeki yer değiştirmesi sınırlandırılmış, 50 mm'lik üst kısmı serbest bırakılmıştır.

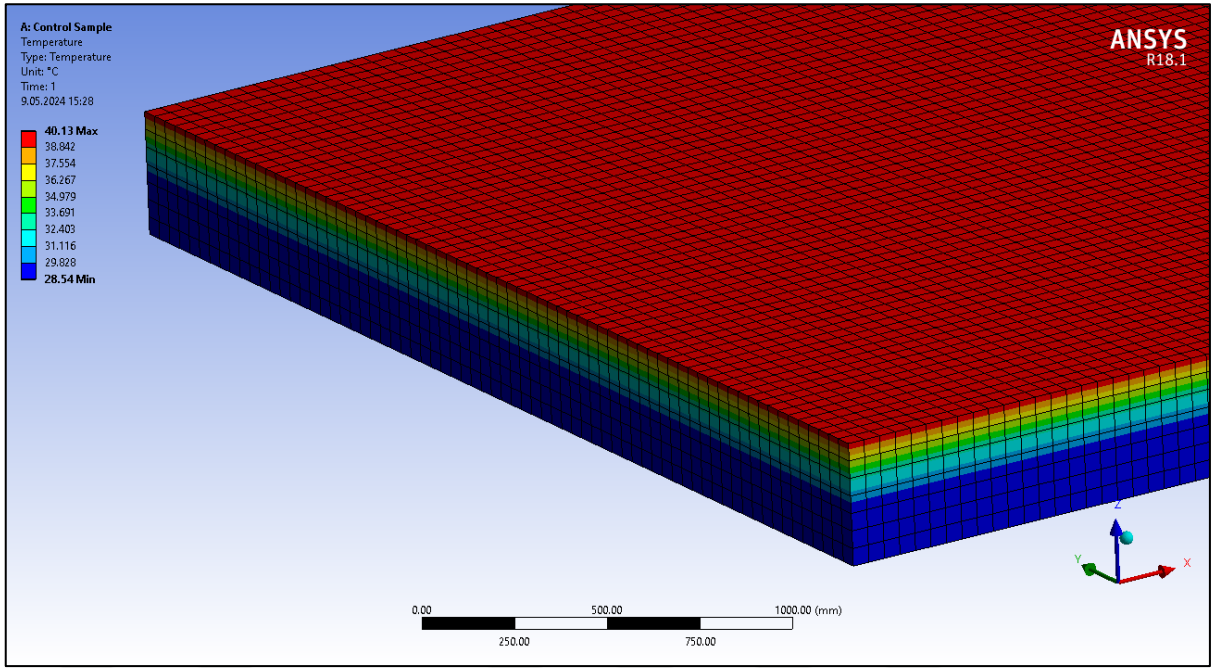


Şekil 133. SSB yol modeli için derz kesimi ve derz sınır şartları.

Derz kesimi işlemi yapılan modellerde, yaz aylarında ölçümü yapılan, plak üst ve altında en fazla sıcaklık farkını oluşturan gün ve saatteki sıcaklık değerleri bütün karışımlar için yol tabaka kalınlığı boyunca atanmıştır. Örnek olarak atık lastik içermeyen SSB yol modeli için uygulanan sıcaklık sınır şartları Şekil 134'te gösterilmiştir. Sıcaklık ataması sonrası atık lastik içermeyen SSB yoldaki sıcaklık dağılımı da Şekil 135'te verilmiştir.



Şekil 134. SSB yol modeli için sıcaklık sınır şartları.



Şekil 135. SSB yol numunesindeki sıcaklık dağılımı.

Statik ve sıcaklık model doğrulamaları da yapılan SSB yol modellerinin sonlu elemanlar analizi gerçekleştirilmiştir. Bütün karışımların analiz sonrası elde edilen maksimum asal gerilme, X-Y-Z yönlerindeki deformasyonlar, termal ve toplam şekil değiştirme sonuçları Tablo 39’de verilmiştir. Kontrol numunesi için modelleme sonrası yapılan analiz sonucu görüntüleri Şekil 136, Şekil 137, Şekil 138 ve Şekil 139’da da ayrıca verilmiştir.

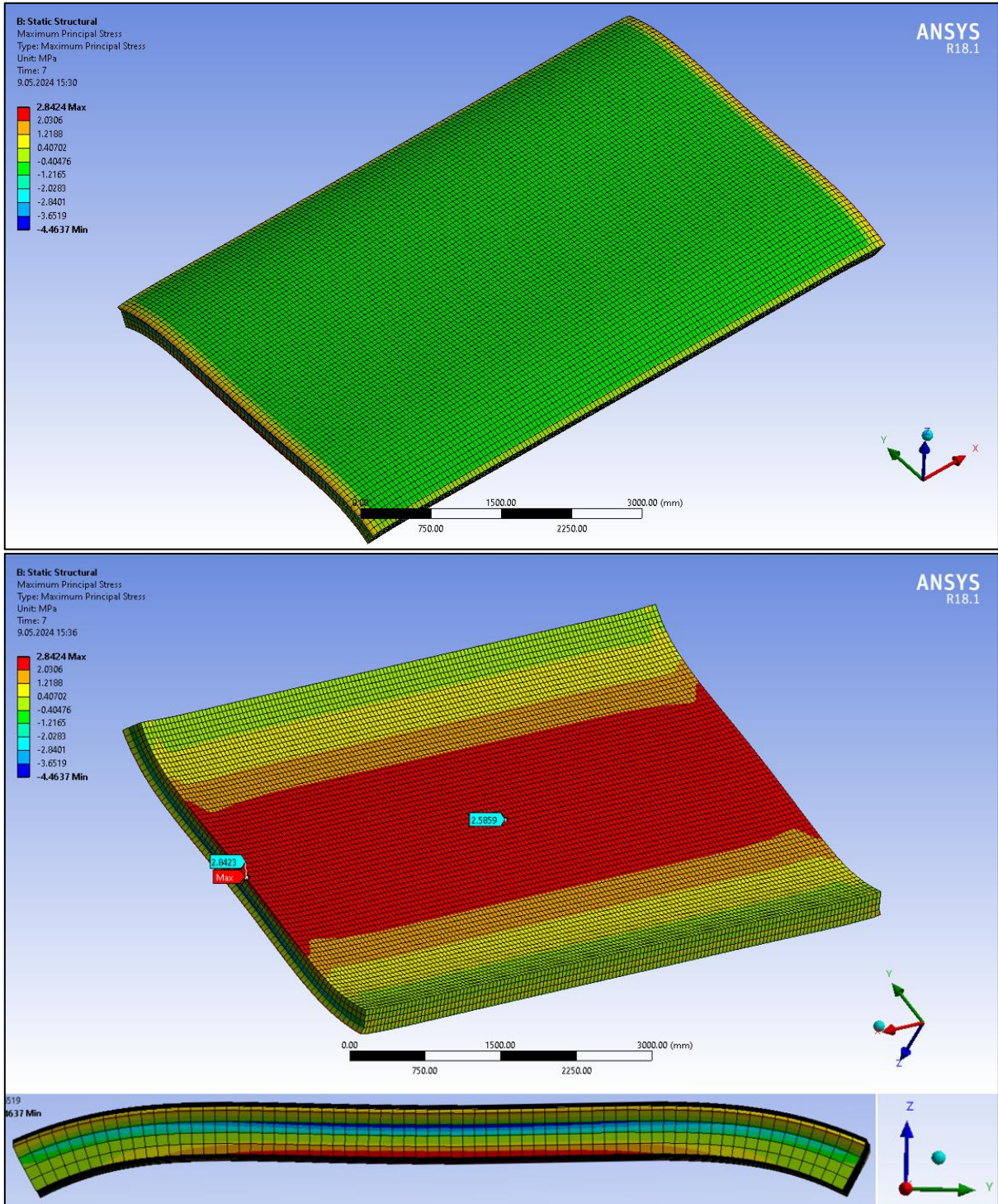
Tablo 39. 3,5x7,0 m Boyutlarındaki SSB Yolların Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Karışım	Maksimum Asal Gerilme (MPa)	Doğrusal Deformasyon (mm)			Termal Şekil Değiştirme (mm/mm)	Toplam Şekil Değiştirme (mm/mm)
		X Eksen	Y Eksen	Z Eksen		
C	2,8424	3,51E-02	3,75E-01	-1,53E-01	2,43E-04	1,80E-03
WR 2,5	2,1142	3,58E-02	3,71E-01	-1,46E-01	2,48E-04	1,74E-03
WR 5	1,5207	3,66E-02	3,64E-01	-1,39E-01	2,52E-04	1,66E-03
WR 10	0,80378	3,73E-02	3,49E-01	-1,24E-01	2,54E-04	1,52E-03
WR 20	0,23009	4,09E-02	2,90E-01	-9,09E-02	2,57E-04	1,12E-03

Farklı atık lastik katkılı SSB karışım yollarının modelleme sonucu elde edilen sonlu elemanlar analiz sonuçları genel olarak incelendiğinde, karışımlardaki atık lastik içeriğinin artmasıyla birlikte maksimum asal gerilme, toplam şekil değiştirme ile birlikte Y ve Z eksenleri boyunca oluşan deformasyon değerlerinde azalmalar meydana gelirken, X ekseninde oluşan deformasyon ve termal şekil değiştirme verilerinde ise artış gözlemlenmiştir.

Sonlu elemanlar analizi ardından SSB yollarda sıcaklık farkından dolayı oluşan maksimum asal gerilme sonuçları incelendiğinde, %0, %2,5, %5, %10 ve %20 atık lastik

katkılı SSB yollarda oluşan maksimum gerimler sırasıyla yaklaşık olarak 2,84, 2,11, 1,52, 0,80 ve 0,23 MPa olarak elde edilmiştir. En fazla oluşan maksimum gerilme 2,84 MPa'lık değerle atık lastik içermeyen kontrol (C) yolunda meydana gelirken, en az gerilme ise 0,23 MPa'lık değerle %20 atık lastik katkı (WR20) SSB yolda meydana gelmiştir. %20 oranında atık lastik kullanımı, SSB yollarda sıcaklık farkından dolayı meydana gelen maksimum gerilmeyi yaklaşık olarak %92 oranında düşürmüştür. Şekil 136'da kontrol numunesi için SSB yolda meydana gelen maksimum asal gerilme görüntüleri verilmiştir.



Şekil 136. SSB yolda meydana gelen maksimum asal gerilme.

Atık lastik içeriğinin artması, sıcaklık etkisiyle SSB yollarda meydana gelen gerilmeleri azaltmıştır. Atık lastik içeriğinin artması yol yüzeyi ile tabanı arasında meydana gelen sıcaklık farkını artırmasına rağmen, meydana gelen maksimum gerilmeyi azaltması bir çelişki gibi görünse de bu şu şekilde açıklanabilmektedir. Westergaard (1926), plağın alt ve üst yüzeylerindeki sıcaklık farklarından dolayı meydana gelen gerilmeler için denklemler önermiştir. Bradbury (1938) ise Westergaard'ın denklemlerine poisson oranının etkisini dahil ederek yeni denklemler geliştirmiştir. Bu denklemlere göre, sıcaklık farkından dolayı bir plak içinde oluşan gerilme şu şekilde hesaplanmaktadır.

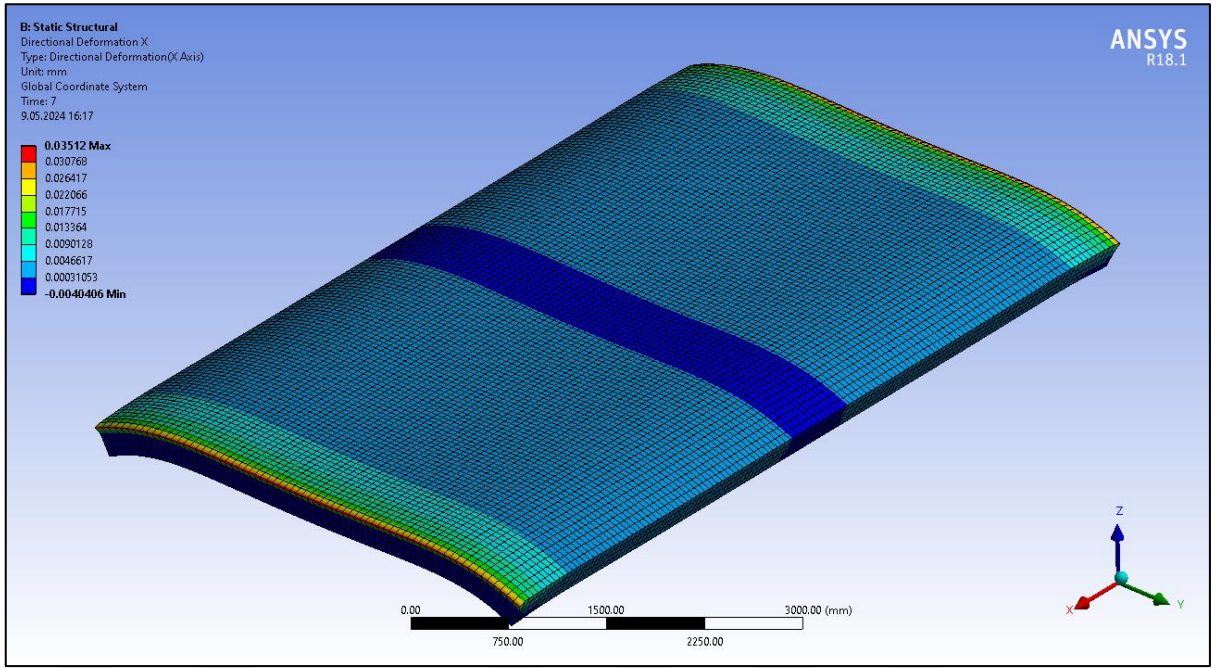
$$\sigma_x = \frac{Ee\Delta t}{2} \left[\frac{C_x + \mu C_y}{1 - \mu^2} \right]$$

Denklemden de anlaşılacağı üzere sıcaklık farkının (Δt) artmasıyla doğru orantılı olarak gerilmenin artacağı bilinmektedir. Bu durum denklemde yer alan elastisite modülü (E) için de geçerli bir durum olmaktadır. Karışımlardaki atık lastik miktarının artması elastisite modülünü önemli oranda düşürmüştür. Sıcaklık farkının artması, yollarda oluşan gerilmeyi artırsa da elastisite modülü değerlerinin çok fazla azalması, meydana gelen gerilme üzerinde daha fazla etkiye sahip olduğundan dolayı maksimum gerilmeyi azaltmıştır.

Şekil 136'dan örnek kontrol karışımı SSB yol tabakası boyunca meydana gelen gerilmeler incelendiğinde, maksimum asal gerilmenin enine derzin alt kenarında meydana geldiği belirlenmiştir.

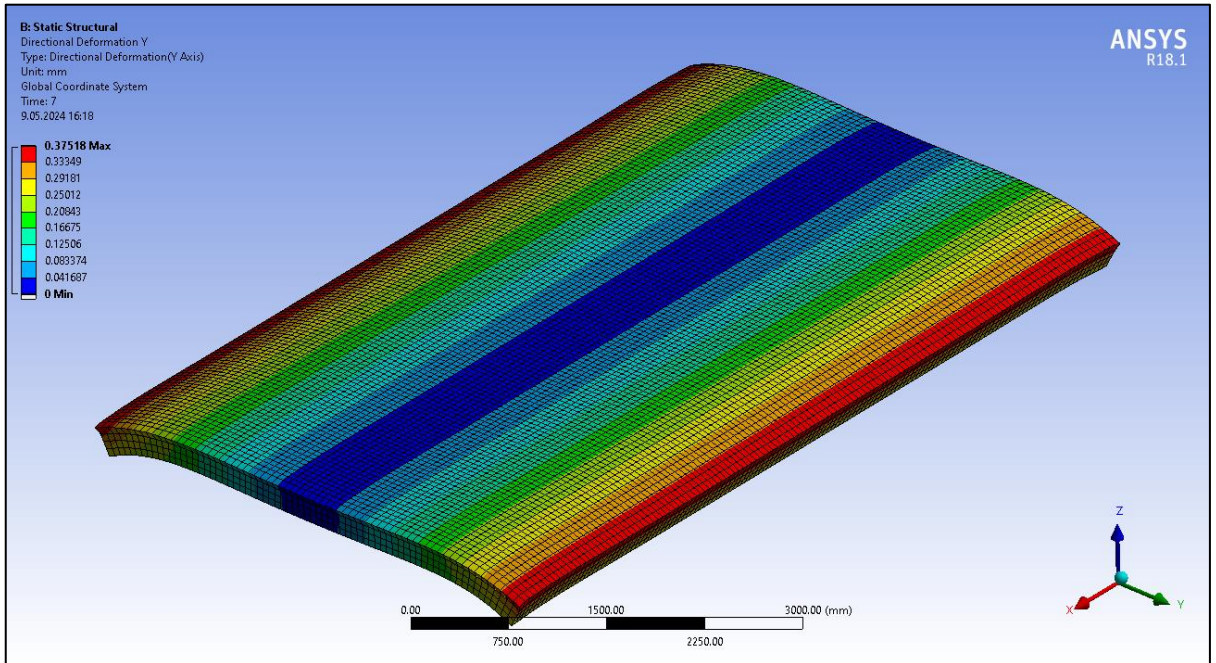
Analiz sonucu modellenen SSB yollarda meydana gelen deformasyonlar incelendiğinde, karışımların atık lastik içeriğinin artmasıyla SSB yol modellerinde X yönünde meydana gelen deformasyonlar artarken Y ve Z yönlerinde meydana gelen deformasyonlarda azalma meydana gelmiştir. Şekil 137'de kontrol numunesi için SSB yolda X yönünde meydana gelen doğrusal deformasyon görüntüleri verilmiştir.

X yönünde meydana gelen doğrusal deformasyonlar incelendiğinde, %0, %2,5, %5, %10 ve %20 atık lastik katkılı SSB yollarda oluşan deformasyonlar sırasıyla yaklaşık olarak $3,51 \times 10^{-2}$, $3,58 \times 10^{-2}$, $3,66 \times 10^{-2}$, $3,73 \times 10^{-2}$ ve $4,09 \times 10^{-2}$ mm olarak elde edilmiştir. En fazla oluşan deformasyon $4,09 \times 10^{-2}$ mm'lik değerle %20 atık lastik katkılı (WR20) yolda oluşurken, en az deformasyon $3,51 \times 10^{-2}$ mm'lik değerle atık lastik içermeyen kontrol (C) yolunda oluşmuştur. Atık lastik kullanımı X eksen yönünde meydana gelen deformasyonların yaklaşık olarak %16'ya kadar artmasına neden olmuştur.



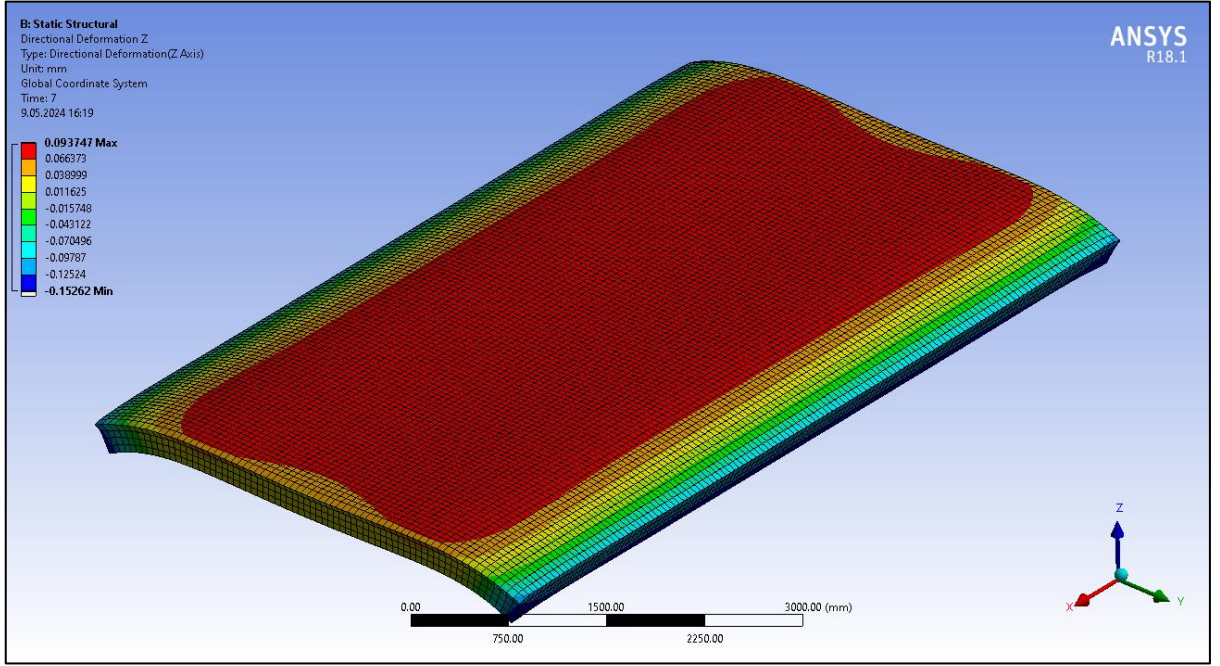
Şekil 137. SSB yolda X yönünde meydana gelen doğrusal deformasyon.

Y yönünde meydana gelen doğrusal deformasyonlar incelendiğinde, %0, %2,5, %5, %10 ve %20 atık lastik katkılı SSB yollarda oluşan deformasyonlar sırasıyla yaklaşık olarak $3,75 \times 10^{-1}$, $3,71 \times 10^{-1}$, $3,64 \times 10^{-1}$, $3,49 \times 10^{-1}$ ve $2,90 \times 10^{-1}$ mm olarak elde edilmiştir. En fazla oluşan deformasyon $3,75 \times 10^{-1}$ mm'lik değerle atık lastik içermeyen kontrol (C) yolunda, en az deformasyon $2,90 \times 10^{-1}$ mm'lik değerle %20 atık lastik katkılı (WR20) yolda oluşmuştur. Atık lastik kullanımı Y eksen yönünde meydana gelen deformasyonların yaklaşık olarak %23'e kadar düşürmüştür.



Şekil 138. SSB yolda Y yönünde meydana gelen doğrusal deformasyon.

Z yönünde meydana gelen doğrusal deformasyonlar incelendiğinde ise %0, %2,5, %5, %10 ve %20 atık lastik katkıli SSB yollarda oluşan deformasyonlar sırasıyla yaklaşık olarak $1,53 \times 10^{-1}$, $1,46 \times 10^{-1}$, $1,39 \times 10^{-1}$, $1,24 \times 10^{-1}$ ve $9,09 \times 10^{-2}$ mm olarak elde edilmiştir. En fazla oluşan deformasyon $1,53 \times 10^{-1}$ mm'lik değerle atık lastik içermeyen kontrol (C) yolunda, en az deformasyon ise $9,09 \times 10^{-2}$ mm'lik değerle %20 atık lastik katkıli (WR20) yolda oluşmuştur. Atık lastik kullanımı Z eksenı yönünde meydana gelen deformasyonların yaklaşık olarak %40'a kadar düşürmüştür.



Şekil 139. SSB yolda Z yönünde meydana gelen doğrusal deformasyon.

SSB yol modellemesi sonucu termal şekil değıştirme sonuçları incelendiğinde sonuçların birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. Atık lastik eklenmesiyle termal şekil değıştirme en fazla %5 oranında değışmiştir. Yol tabakasında meydana gelen toplam şekil değıştirmelerde ise atık lastik içeriğinin artmasıyla azalma meydana gelmiştir. En fazla toplam şekil değıştirme $1,80 \times 10^{-3}$ mm'lik değerle atık lastik içermeyen kontrol (C) yolunda, en az şekil değıştirme ise $1,12 \times 10^{-3}$ mm'lik değerle %20 atık lastik katkıli (WR20) yolda oluşmuştur. Atık lastik kullanımı oluşan toplam şekil değıştirme yaklaşık olarak %38'e kadar düşürmüştür.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, agrega yerine kullanılan üç farklı tipteki (toz, kırıntı ve parçalanmış) atık lastiğin, silindire sıkıştırılmış beton yolun fiziksel, mekanik, durabilite ve termal özellikleri üzerindeki etkisi kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Test sonuçlarına ve yapılan analizlere dayanarak elde edilen sonuçlar aşağıdaki verilmiştir.

- SSB karışımlara eklenen atık lastik miktarı artması, optimum su içeriğinin artmasına dolayısıyla karışım için daha fazla su ihtiyacının ortaya çıkmasına yol açmıştır. %30 atık lastik katkılı SSB'lerde yaklaşık olarak %7 daha fazla karışım suyu kullanılmaktadır. Ayrıca atık lastiğin düşük özgül ağırlığa ve boşluklu yapıya sahip olması nedeniyle SSB'de %30 oranına kadar kullanımıyla %15 daha hafif karışım elde edilmesi sağlanmıştır.
- Atık lastiğin agrega yerine SSB'de kullanılması basınç, eğilme ve yarmada çekme dayanımlarında düşüğe sebep olmasına rağmen %20 atık lastik katkısıyla yaklaşık olarak 5 MPa eğilme dayanımına sahip karışım elde edilmiştir. Böylece yüksek oranda atık lastik içeriğinin kaplamalarda kullanımları mümkün kılınmıştır.
- Atık lastik katkılı SSB numunelerin, kontrol SSB numunelerine kıyasla daha sünek davranış gösterdiği gözlemlenmiştir. Kaba ve ince agreganın kısmen atık lastiklerle değiştirmesiyle birlikte elastisite modülünde yaklaşık olarak %90 gibi önemli bir gerileme belirlenmiştir.
- Atık lastiğin hem kendi gözenekli yapısı hem de SSB üretim aşamasında sıkıştırma işleminde oluşan hava, boşluklu beton oluşmasına sebep olmaktadır. Böylece bu boşluklar, ultrasonik darbenin seyahat süresini arttırarak UPV değerlerini düşürmüştür. Kontrol karışımlarla kıyaslandığında, %30 katkılı SSB karışımların kırış ve silindir numunelerdeki UPV değerleri sırasıyla 5085 m/sn ve 5020 m/sn'den 3990 m/sn ve 3810 m/sn'ye kadar gerilemiştir. Bu düşüslere rağmen %10'a kadar atık lastik katkılı SSB karışımların UPV değerleri, mükemmel seviye UPV sınırları içerisinde, atık lastik oranı %20 ve %30 katkılı SSB karışımlar, iyi seviyede UPV sınırları içerisinde kalabilmişlerdir.
- Karışımların SEM ile elde edilen mikroyapı analizleri incelendiğinde, atık lastik ile çimento hamuru ara yüzeyinde çatlaklar ve boşluklar gözlemlenmiştir. Ayrıca

karışımlardaki atık lastik SSB'nin dayanımının azalmasına yol açan zayıf arayüz (ITZ) kalınlığının yaklaşık 25 µm değerine çıkararak artmasına neden olmuştur.

- SSB karışımların kılcallık katsayıları %7,5'e kadar atık lastik içeren numunelerde birbirine çok yakın olmakla birlikte azalma gösterirken %10 atık lastik içeriğinden itibaren kılcallık katsayılarında %76 gibi önemli artışlar belirlenmiştir.
- SSB küp numunelerin yüksek sıcaklık etkisiyle meydana gelen kütle kayıpları genel olarak incelendiğinde atık lastik içeriğinin artması kütle kayıpları artırmış, karışımların 200 °C'lik yakım sıcaklığında kütle kayıp oranları birbirlerine çok yakın olup en fazla %0,5'e kadar ulaşmıştır. 600 °C'lik yakım sonrası numunelerin kütle kayıp oranlarında, kontrol numunesiyle kıyaslandığında %145 oranında bir fark oluşmuştur. Yüksek sıcaklık etkisi sonrası dayanım sonuçları birlikte değerlendirildiğinde atık lastik içeriğinin artmasıyla dayanımlarda düşüş gözlemlenmiştir. Hedef sıcaklıklara çıkıldıkça en çok dayanım kayıp oranlarının meydana geldiği sonuçların sırasıyla eğilme, yarmada çekme ve basınç dayanımlarında olduğu belirlenmiştir. Atık lastik içermeyen kontrol (C) karışımlarında 600 °C hedef sıcaklık sonrası basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanım kayıp oranları sırasıyla %25, %48 ve %61 oranlarında gerçekleşmiştir. Bu kayıplar aynı hedef sıcaklığında %10 atık lastik katkılı karışımlarda sırasıyla %39, %49 ve %87 oranlarında ve %30 atık lastik katkılı karışımlarda sırasıyla %62, %71 ve %97 oranlarında gerçekleşmiştir.
- SSB karışımların donma-çözünme etkisiyle meydana gelen kütle kayıpları genel olarak incelendiğinde atık lastik içeriği arttıkça numunelerde meydana gelen kütle kayıplarının daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Donmaçözünme etkisi sonrası basınç dayanım kaybı oranları incelendiğinde atık lastik içeriğinin artmasıyla numunelerin basınç dayanımlarında azalmalar meydana gelmiştir. En fazla basınç dayanım kaybı %21 oranla %30 atık lastik katkılı (WR30) numunelerde meydana gelmiştir. Yarmada çekme dayanım sonuçları incelendiğinde, basınç dayanımı sonuçlarıyla benzer olarak 300 döngü sonunda bütün numunelerde dayanım kayıpları meydana gelmiştir.
- SSB karışımların asit ve sülfat etkisi sonucu kütle kayıpları incelendiğinde, asit etkisi sonrası numunelerde kütle kaybının yaşandığı, sülfat etkisi sonrası numunelerde ise kütle artışı meydana geldiği belirlenmiştir. Asit etkisi sonrası sonuçlar, asit çözeltisine maruz kalma süreci arttıkça numunelerde basınç dayanımlarında azalma meydana geldiğini göstermiştir. Sülfat etkisi sonrası basınç dayanım sonuçları incelendiğinde asit etkisinden farklı olarak %10'a kadar atık lastik içeren SSB karışımlarda dayanım artışı meydana gelmiştir. %20 ve %30 atık lastik içeren karışımlarda ise asit

etkisine benzer şekilde sülfat çözeltisine maruz kalma süreci arttıkça numunelerin basınç dayanımlarında azalma meydana gelmiştir.

- SSB karışımlardan üretilen plaklardan elde edilen sıcaklık verileri ile yapılan sonlu elemanlar analiz sonuçları incelendiğinde, karışımlardaki atık lastik içeriğinin artmasıyla birlikte, yol tabakasının alt ve üst yüzeylerindeki sıcaklık farklarından dolayı meydana gelen gerilmelerin azaldığı belirlenmiştir. Karışımlardaki atık lastik içeriğinin %20'lere kadar çıkarılması kaplamalardaki sıcaklık farkıyla oluşan gerilmeleri yaklaşık olarak %90 oranında düşürmüştür.

Yapılan çalışma kapsamında elde edilen bulgular neticesinde bu konu hakkında yapılacak sonraki çalışmalara yararlı olması için yapılan öneriler aşağıda sunulmuştur;

- Plakların üst ve alt katmalarında oluşan sıcaklık farkının etkisini incelemek amacıyla yapılan sonlu elemanlar analizi sonucu ile teorik olarak elde edilen sonuçlar, dış çevre koşullarında saha ortamında deneysel olarak ölçülerek elde edilen sonuçların sonlu elemanlar analiz sonuçları ile karşılaştırılması yapılabilir.
- Laboratuvar koşullarında üretilen SSB karışımlardan elde edilen bulgular, gerçekte dış ortam koşullarında sahada üretilen ve çevre şartlarına maruz kalan karışımlardan elde edilen bulgularla aynı sonuçları vermemektedir. Bu amaçla saha sonuçlarını tam anlamıyla yansıtmak ve daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için çevre şartları ve trafik yüklerinin var olduğu şartlarda SSB üretimi yapılarak deney ve analizler gerçekleştirilebilir.

KAYNAKLAR

- Abebe, Y.A. and Lohaus, L., 2017. Rheological characterization of the structural breakdown process to analyze the stability of flowable mortars under vibration. *Construction and Building Materials*, 131, 517-525.
- Adamu, M., Mohammed, B.S., Shafiq, N., and Shahir Liew, M., 2018. Effect of crumb rubber and nano silica on the fatigue performance of roller compacted concrete pavement. *Cogent engineering*, 5 (1), 1436027.
- Adamu, M., Mohammed, B.S., and Shafiq, N., 2017. Flexural performance of nano silica modified roller compacted rubbercrete. *International Journal of Advances in Applied Sciences*, 4 (9), 6-18.
- Adamu, M., Mohammed, B.S., and Liew, M.S., 2018. Mechanical properties and performance of high volume fly ash roller compacted concrete containing crumb rubber and nano silica. *Construction and Building Materials*, 171, 521-538.
- Adamu, M., Mohammed, B.S., Shafiq, N., and Liew, M.S., 2020. Durability performance of high volume fly ash roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(12), 1437-1444.
- Akın, M.H. and Polat, R., 2022. The effect of vehicle waste tires on the mechanical, hardness and stress – strain properties of polyester-based polymer concretes. *Construction and Building Materials*, 325, 126741.
- Al-Qadi, I.L., Elseifi, M. and Leonard, D., 2003. Development of an overlay design model for reflective cracking with and without steel reinforcing nettings. *Asphalt Paving Technology*, 72, 388–423.
- Al-Khuzai, M.G., Al-Humeidawi, B.H., and Ra'id, F., 2020. Assessment of the mechanical properties of concrete pavement containing crumb rubber of tires. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 737 (1), 012141).
- Alsaif, A., Albidah, A., Abadel, A., Abbas, H., Almusallam, T. and Al-salloum, Y., 2022. Behavior of ternary blended cementitious rubberized mixes reinforced with recycled tires steel fibers under different types of impact loads. *Structures*, 45, 2292–2305.
- Alsaif, A., Bernal, S.A., Guadagnini, M. and Pilakoutas, K., 2019. Freeze-thaw resistance of steel fibre reinforced rubberised concrete. *Construction and Building Materials*, 195, 450-458.
- Anderson, R., 1986. *Roller-Compacted Concrete Pavements - Physical Properties*, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm.
- Anonymous 2000: *Cement and concrete terminology*. American Concrete Institute.
- Anonymous 2001: *Report on roller-compacted concrete pavements*. American Concrete Institute.
- Anonymous 2004: *Guide specification for construction of roller-compacted concrete pavements*. Portland Cement Association, <https://www.chaneyenterprises.com/files/productdocs/Guidetorcc.PDF> (10.03.2024).
- Anonymous 2006: *Production of roller-compacted concrete*. Portland Cement Association, https://www.cement.org/docs/default-source/cement-concrete-applications/is332.pdf?sfvrsn=14bfbdf_2 10.03.2024).
- Anonymous 2007: *Concrete equipment & products*. PNA Construction Tech. Inc., <https://www.forconstructionpros.com/> (10.03.2024).

- Anonymous 2009: Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete. American Concrete Institute.
- Anonymous 2010a: ASTM C1157, Standard Performance Specification for Hydraulic Cement. ASTM International, West Conshohocken.
- Anonymous 2010b: ASTM C78, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading). ASTM International, West Conshohocken.
- Anonymous 2011: RCC Success on an Ohio industrial loop road. GOMACO, https://www.gomaco.com/resources/worldstories/world39_2/complete.html (10.03.2024).
- Anonymous 2012: ASTM C150, Standard Specification for Portland Cement. ASTM International, West Conshohocken.
- Anonymous 2013a: Guide to roller compacted concrete for pavements. European Ready Mixed Concrete Organization, <https://www.thbbakademi.org/wp-content/uploads/2020/12/ermco-guide-rcc-18-march-2013.pdf> (10.03.2024).
- Anonymous 2013b: Britpave guide to roller compacted concrete pavements. British Cementitious Paving Association.
- Anonymous 2014: Roller-compacted concrete pavements as exposed wearing surface. ACPA Guide Specification, <https://www.acpa.org/wp-content/uploads/2021/06/ACPA-Roller-Compacted-Concrete-Guide-Specification-Version-1.2.pdf> (10.03.2024).
- Anonymous 2017a: Roller compacted concrete - background to the development of highways england's design guidance and specification. AECOM's Pavement and Materials Team, Nottingham, UK.
- Anonymous 2017b: ASTM C1170, Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table. ASTM International, West Conshohocken.
- Anonymous 2017c: ASTM C1435, Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer. ASTM International, West Conshohocken.
- Anonymous 2017d: ASTM C496, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken
- Anonymous 2017e: ASTM C666, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. ASTM International, West Conshohocken.
- Anonymous 2018: Ülkemizin yeni yolu silindirle sıkıştırılmış beton yollar. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB), <https://www.turkcimento.org.tr/tr/yayinlarimiz/beton-yol> (10.03.2024).
- Anonymous 2019a: Styrene Butadiene Rubber (SBR) Commodity Report, Beroe Advantage Procurement.
- Anonymous 2019b: Silindirle sıkıştırılmış beton: Beton kaplamaları ulaştırma sektörünün kullanımına sunan bir yöntem. Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB), <https://www.turkcimento.org.tr/tr/yayinlarimiz/beton-yol> (10.03.2024).
- Anonymous 2019c: Methodology for subgrade construction. Highway Guide, <https://www.highwayguide.co.in/methodology-for-subgrade-construction/> (10.03.2024).

Anonymous 2019d: ASTM C309, Standard Specification for Liquid Membrane-Forming Compounds for Curing Concrete. ASTM International, West Conshohocken.

Anonymous 2020a: ASTM C171, Standard Specification for Sheet Materials for Curing Concrete. ASTM International, West Conshohocken.

Anonymous 2020b: ASTM C1240, Standard Specification for Silica Fume Used in Cementitious Mixtures. ASTM International, West Conshohocken.

Anonymous 2020c: AASHTO T 180, Standard Method of Test for Moisture–Density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.) Drop. American Association of State Highway and Transportation Officials, USA.

Anonymous 2020d: ASTM C1585, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic-Cement Concretes. ASTM International, West Conshohocken.

Anonymous 2021a: The many benefits and applications of roller compacted concrete (RCC). Pro Crew Schedule, <https://procrewschedule.com/the-many-benefits-and-applications-of-roller-compacted-concrete-rcc/> (10.03.2024).

Anonymous 2021b: ASTM D1557, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m<sup>3

Anonymous 2022a: ASTM C989, Standard Specification for Slag Cement for Use in Concrete and Mortars. ASTM International, West Conshohocken.

Anonymous 2022b: ASTM C1602, Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete, West Conshohocken.

Anonymous 2022c: ASTM C94, Standard Specification for Ready-Mixed Concrete. ASTM International, West Conshohocken.

Anonymous 2022d: ASTM C469, Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression. ASTM International, West Conshohocken.

Anonymous 2023a: ASTM C33, Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM International, West Conshohocken.

Anonymous 2023b: ASTM D128, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM International, West Conshohocken.

Anonymous 2023c: ASTM C138, Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete. ASTM International, West Conshohocken.

Anonymous 2023d: ASTM C39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken.

Anonymous 2023e: ASTM C1231, Standard Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, West Conshohocken.

Anonymous 2023f: ASTM C597, Standard Test Method for Ultrasonic Pulse Velocity Through Concrete. ASTM International, West Conshohocken.

Anonymous 2023g: ASTM C177, Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus. ASTM International, West Conshohocken.</sup>

- Anonymous 2024a: Roller compacted concrete pavement council. <https://rccpavementcouncil.org/about-the-rcc-pavement-council/membership/> (10.03.2024).
- Anonymous 2024b: Roller compacted concrete installation Specialists. RCC- Paving-UK Limited. <https://www.rccpaving.uk/roller-compacted-concrete> (10.03.2024).
- Anonymous 2024c: Concrete Texture Curing Machine. Apollo Inffratech Private Limited, <https://www.apolloinffratech.com/product/texture-cure> (10.03.2024).
- Anonymous 2024d: Pavements & Structures Protection. International chem-crete, <https://www.chem-crete.com/product/chem-crete-pavix-ccc100/> (10.03.2024).
- Anonymous 2024e: ASTM C127, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM International, West Conshohocken
- Anonymous 2024f: Engineering-Solid Mechanics-Thermal Strain. StudySmarter, <https://www.studysmarter.co.uk/explanations/engineering/solid-mechanics/> (10.03.2024).
- Anonymous 2024g: Intro to Thermal Strain. Ansys Innovation Courses, <https://courses.ansys.com/wp-content/uploads/2020/10/Lesson-1-Introduction-of-Thermal-Strain.pdf> (10.03.2024).
- Araujo-Morera, J., Verdejo, R., López-Manchado, M.A. and Santana, M.H., 2021. Sustainable mobility: The route of tires through the circular economy model. *Waste Management*, 1 (126), 309–322.
- Ashrafian, A., Gandomi, A.H., Rezaie-Balf, M. and Emadi, M., 2020. An evolutionary approach to formulate the compressive strength of roller compacted concrete pavement. *Measurement*, 152, 107309.
- Bangaru, S.S., Wang, C., Zhou, X. and Hassan, M., 2022. Scanning electron microscopy (SEM) image segmentation for microstructure analysis of concrete using U-net convolutional neural network. *Automation in Construction*, 144, 104602.
- Baş, F.İ., 2020. Bozulmuş BSK Yol Üzeri Derzli Donatısız Beton Yolların Mekanistik Değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Baş, F.İ., Bayrak, O.Ü. and Bayata, H.F., 2022. A practical design guide for unbonded jointed plain concrete roads over deteriorated HMA roads: Realistic traffic loading. *Coatings*, 12 (12), 1817.
- Bayraktar, O.Y., Soylemez, H., Kaplan, G., Benli, A., Gencel, O. and Turkoglu, M., 2021. Effect of cement dosage and waste tire rubber on the mechanical, transport and abrasion characteristics of foam concretes subjected to H₂SO₄ and freeze–thaw. *Construction and Building Materials*, 302, 124229.
- Bisht, K. and Ramana, P.V., 2017. Evaluation of mechanical and durability properties of crumb rubber concrete. *Construction and building materials*, 155, 811-817.
- Bisht, K. and Ramana, P.V., 2019. Waste to resource conversion of crumb rubber for production of sulphuric acid resistant concrete. *Construction and Building Materials*, 194, 276-286.
- Bom, N.M., Usuda, É.O., Gigliotti, M.D.S., de Aguiar, D.J.M., Imamura, W., Paixão, L. S. and Carvalho, A.M.G., 2019. A Novel Option for Waste Tire Rubber Reutilization: Refrigerant in Solid-State Cooling Devices. arXiv preprint arXiv:1907.02113.

- Bradbury, R.D., 1938. Reinforced concrete pavements, Wire Reinforcement Institute, 190 p, Washington, USA.
- Chan, S., Lane, B., Kazmierowski, T., and Lee, W., 2011. Pavement preservation: A solution for sustainability. *Transportation Research Record*, 2235 (1), 36-42.
- Chen, M., Sun, J., Zhang, T., Shen, Y. and Zhang, M., 2023. Enhancing the dynamic splitting tensile performance of ultra-high performance concrete using waste tyre steel fibres. *Journal of Building Engineering*, 80, 108102.
- Choubane, B. and Tia, M., 1992. Nonlinear temperature gradient effect on maximum warping stresses in rigid pavements. *Transportation research record*, 1370 (1), 11.
- Corinaldesi, V., Mazzoli, A. and Moriconi, G., 2011. Mechanical behaviour and thermal conductivity of mortars containing waste rubber particles. *Materials & Design*, 32(3), 1646-1650.
- Çolak, M.A., Zorlu, E., Çodur, M.Y., Baş, F.İ., Yalçın, Ö. and Kuşkapan, E., 2023. Investigation of physical and chemical properties of bitumen modified with waste vegetable oil and waste agricultural ash for use in flexible pavements. *Coatings*, 13 (11), 1866.
- Derakhshan, Z., Ghaneian, M.T., Mahvi, A.H., Conti, G.O., Faramarzian, M., Dehghani, M. and Ferrante, M., 2017. A new recycling technique for the waste tires reuse. *Environmental Research*, 158, 462–469.
- Dezhampanah, S., Nikbin, I., Charkhtab, S., Fakhimi, F., Bazkiaei, S.M. and Mohebbi, R., 2020. Environmental performance and durability of concrete incorporating waste tire rubber and steel fiber subjected to acid attack. *Journal of cleaner production*, 268, 122216.
- Earle R.L., 1983. Unit operations in food processing. Pergamon Press, 207 p, United Kingdom.
- Fakhri, M., Amoosoltani, E., and Aliha, M.R.M., 2017. Crack behavior analysis of roller compacted concrete mixtures containing reclaimed asphalt pavement and crumb rubber. *Engineering Fracture Mechanics*, 180, 43-59.
- Fakhri, M. and Amoosoltani, E., 2017. The effect of reclaimed asphalt pavement and crumb rubber on mechanical properties of roller compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 137, 470-484.
- Fakhri, M. and Saberi, F., 2016. The effect of waste rubber particles and silica fume on the mechanical properties of roller compacted concrete pavement. *Journal of cleaner production*, 129, 521-530.
- Galobardes, I., Cavalaro, S.H., Aguado, A. and Garcia, T., 2014. Estimation of the modulus of elasticity for sprayed concrete. *Construction and Building Materials*, 53, 48-58.
- Ganjian, E., Khorami, M., and Maghsoudi, A. A., 2009. Scrap-tyre-rubber replacement for aggregate and filler in concrete. *Construction and building materials*, 23 (5), 1828-1836.
- Gáspár, L. and Bencze, Z., 2020. Roller compacted cement concrete (RCC) pavement. *Dorogi i mosti [Roads and bridges]*, 21, 120-129.
- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G. and İpek, S., 2014a. Investigating properties of pervious concretes containing waste tire rubbers. *Construction and Building Materials*, 63, 206-213.

- Gesoğlu, M., Güneyisi, E., Khoshnaw, G. and İpek, S., 2014b. Abrasion and freezing–thawing resistance of pervious concretes containing waste rubbers. *Construction and Building Materials*, 73, 19-24.
- Ghaleh, M.B., Asadi, P. and Eftekhari, M.R., 2022. Enhancing mechanical performance of waste tire concrete with surface double pre-coating by resin and micro-silica. *Journal of Building Engineering*, 50, 104084.
- Guelmine, L., 2022. The freeze-thaw durability of concrete containing the rubber aggregate of tire waste. *Research on Engineering Structures and Materials*, 8, 253-264.
- Gupta, T., Chaudhary, S. and Sharma, R.K., 2016. Mechanical and durability properties of waste rubber fiber concrete with and without silica fume. *Journal of cleaner production*, 112, 702-711.
- Gupta, T., Siddique, S., Sharma, R.K. and Chaudhary, S., 2017. Effect of elevated temperature and cooling regimes on mechanical and durability properties of concrete containing waste rubber fiber. *Construction and Building Materials*, 137, 35-45.
- Gupta, T., Siddique, S., Sharma, R.K. and Chaudhary, S., 2019. Behaviour of waste rubber powder and hybrid rubber concrete in aggressive environment. *Construction and Building Materials*, 217, 283-291.
- Guyer, J.P., 2023. Introduction to roller-compacted concrete pavements. Continuing Education and Development, <https://www.cedengineering.com/userfiles/C03-036%20-%20Introduction%20to%20Roller-Compacted%20Concrete%20Pavements%20-%20US.pdf> (10.03.2024).
- Güneyisi, E., Gesoğlu, M. and Özturan, T., 2004. Properties of rubberized concretes containing silica fume. *Cement and concrete research*, 34(12), 2309-2317.
- Harrington, D., Abdo, F., Adaska, W. and Hazaree, C., 2010. Guide for roller compacted concrete pavements. National Concrete Pavement Technology Center, Institute for Transportation, Iowa State University, Ames, IA.
- Hasselwander, M., Bigotte, J.F., Antunes, A.P. and Sigua, R.G., 2022. Towards sustainable transport in developing countries: Preliminary findings on the demand for mobility-as-a-service (MaaS) in Metro Manila. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 155, 501–518,
- Hatami, F. and Amiri, M., 2022. Experimental study of mechanical properties and durability of green concrete containing slag, waste rubber powder and recycled aggregate with artificial neural network. *Cleaner Materials*, 5, 100112.
- Helmy, S.H., Tahwia, A.M., Mahdy, M.G. and Abd Elrahman, M., 2023. Development and characterization of sustainable concrete incorporating a high volume of industrial waste materials. *Construction and Building Materials*, 365, 130160.
- Herrera-Sosa, E.S., Martínez-Barrera, G., Barrera-Díaz, C., Cruz-Zaragoza, E. and Ureña-Núñez, F., 2015. Recovery and modification of waste tire particles and their use as reinforcements of concrete. *International Journal of Polymer Science*, 2015, 234690.
- Hilal, N.N., 2017. Hardened properties of self-compacting concrete with different crumb rubber size and content. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(1), 191-206.
- Huang, X., Wang, T., Pang, J. and Song, F., 2022. Experimental Study on the Effect of Freeze–Thaw Cycles on the Apparent and Mechanical Properties of Rubber Concrete Under Chloride Environment. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-21.

- Islam, M.M.U., Li, J., Roychand, R. and Saberian, M., 2023. Microstructure, thermal conductivity and carbonation resistance properties of sustainable structural lightweight concrete incorporating 100% coarser rubber particles. *Construction and Building Materials*, 408, 133658.
- Janotka, I. and Nürnbergerová, T., 2005. Effect of temperature on structural quality of the cement paste and high-strength concrete with silica fume. *Nuclear Engineering and design*, 235(17-19), 2019-2032.
- Jingfu, K., Chuncui, H., and Zhenli, Z., 2009. Strength and shrinkage behaviors of roller-compacted concrete with rubber additives. *Materials and structures*, 42, 1117-1124.
- Kardos, A.J. and Durham, S.A., 2015. Strength, durability, and environmental properties of concrete utilizing recycled tire particles for pavement applications. *Construction and Building Materials*, 98, 832-845.
- Karger-Kocsis, J., Mészáros, L., and Bárány, T., 2013. Ground tyre rubber (GTR) in thermoplastics, thermosets, and rubbers. *Journal of Materials Science*, 48, 1-38.
- Kaur, P.J., Kaushik, G., Hussain, C.M. and Dutta, V., 2021. Management of waste tyres: properties, life cycle assessment and energy generation. *Environmental Sustainability*, 4, 261–271.
- Kazmi, S.M.S., Munir, M.J. and Wu, Y.F., 2021. Application of waste tire rubber and recycled aggregates in concrete products: A new compression casting approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 167, 105353.
- Keleş, Ö.F. and Akpınar, M.V., 2022. Strength properties of roller compacted concrete pavement (RCCP) under different curing methods. *Construction and Building Materials*, 324, 126530.
- Khaloo, A.R., Dehestani, M. and Rahmatabadi, P., 2008. Mechanical properties of concrete containing a high volume of tire–rubber particles. *Waste management*, 28(12), 2472-2482.
- Khelil, N., Ouali, M.O. and Meziane, L., 2023. On the use of fine dune sand in Reactive Powder Concrete: Effect on resistance, water absorption and UPV properties. *Construction and Building Materials*, 388, 131684.
- Khern, Y.C., Paul, S.C., Kong, S.Y., Babafemi, A.J., Anggraini, V., Miah, M. J. and Šavija, B., 2020. Impact of chemically treated waste rubber tire aggregates on mechanical, durability and thermal properties of concrete. *Frontiers in Materials*, 7, 90.
- Kuang, F., Long, Z., Kuang, D., Guo, R. and Sun, J., 2023. Experimental study on high temperatures performance of rubberized geopolymer mortar. *Journal of Building Engineering*, 76, 107091.
- Kumar, R., Verma, M., Dev, N. and Lamba, N., 2022. Influence of chloride and sulfate solution on the long-term durability of modified rubberized concrete. *Journal of Applied Polymer Science*, 139 (37), e52880.
- Li, L.J., Tu, G.R., Lan, C. and Liu, F., 2016. Mechanical characterization of waste-rubber-modified recycled-aggregate concrete. *Journal of Cleaner Production*, 124, 325-338.
- Liu, H.W., Tian, B., Hou, R.G. and Li, S., 2014. Research on Roller compacted concrete pavement Graduation with Vibration Liquefaction. *Advanced Materials Research*, 857, 166–172.
- Luhr, D.R. 2006. Frost durability of roller-compacted concrete pavements: research synopsis, Portland Cement Association.

- Ma, Q., Mao, Z., Lei, M., Zhang, J., Luo, Z., Li, S., Du, G., and Li, Y. 2023a. Experimental investigation of concrete prepared with waste rubber and waste glass. *Ceramics International*, 49 (11), 16951-16970.
- Ma, Q., Mao, Z., Zhang, J., Du, G., and Li, Y., 2023b. Behavior evaluation of concrete made with waste rubber and waste glass after elevated temperatures. *Journal of Building Engineering*, 78, 107639.
- Marchand, J., Gagne, R., Ouellet, E. and Lepage, S., 1997. Mixture proportioning of roller-compacted concrete: A review. From Proceedings of the Third CANMET/ACI International Conference: ACI Special Publication SP-171. Auckland, New Zealand.
- Meddah, A., Beddar, M. and Bali, A., 2014. Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement. *Journal of Cleaner Production*, 72, 187–192.
- Meddah, A., Bensaci, H., Beddar, M., and Bali, A., 2017. Study of the effects of mechanical and chemical treatment of rubber on the performance of rubberized roller-compacted concrete pavement. *Innovative Infrastructure Solutions*, 2, 1-5.
- Mhaya, A.M., Huseien, G.F., Abidin, A.R.Z. and Ismail, M., 2020. Long-term mechanical and durable properties of waste tires rubber crumbs replaced GBFS modified concretes. *Construction and Building Materials*, 256, 119505.
- Miah, M.J., Babafemi, A.J., Paul, S.C., Kong, S.Y., Li, Y. and Jang, J.G., 2022. Eco-friendly concrete with chemically treated end-of-life tires: Mechanical strength, shrinkage, and flexural performance of RC beams. *Construction and Building Materials*, 351, 128970.
- Miah, M.J., Huaping, R., Paul, S.C., Babafemi, A.J., Sharma, R. and Jang, J.G., 2023. Performance of eco-friendly concrete made from recycled waste tire fine aggregate as a replacement for river sand. *Structures*, 58, 105463.
- Mohammed, B.S., Adamu, M., and Liew, M.S., 2018. Evaluating the effect of crumb rubber and nano silica on the properties of high volume fly ash roller compacted concrete pavement using non-destructive techniques. *Case studies in construction materials*, 8, 380-391.
- Mohammed, B.S. and Adamu, M., 2018. Mechanical performance of roller compacted concrete pavement containing crumb rubber and nano silica. *Construction and building materials*, 159, 234-251.
- Mohammed, B.S., Awang, A.B., San Wong, S. and Nhavene, C.P., 2016. Properties of nano silica modified rubbercrete. *Journal of cleaner production*, 119, 66-75.
- Mohammed, B.S., Azmi, N.J. and Abdullahi, M., 2011. Evaluation of rubbercrete based on ultrasonic pulse velocity and rebound hammer tests. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1388-1397.
- Moradi, S. and Shahnoori, S., 2021. Eco-friendly mix for Roller-Compacted Concrete: Effects of Persian-Gulf-Dredged marine sand on durability and resistance parameters of concrete. *Construction and Building Materials*, 281, 122555.
- Olak, Ö., 2022. Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yol Kaplaması İle Geleneksel Yol Kaplamalarının Karşılaştırılması. Doktora Tezi, İstanbul Aydın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Onuaguluchi, O., 2015. Effects of surface pre-coating and silica fume on crumb rubber-cement matrix interface and cement mortar properties. *Journal of cleaner Production*, 104, 339-345.

- Orhan, T.Y., Karakoç, M.B. and Özcan, A., 2023. Durability characteristics of slag based geopolymer concrete modified with crumb rubber. *Construction and Building Materials*, 404, 132851.
- Pranav, S., Lahoti, M., Muthukumar, G. and Yang, E., 2023. A comprehensive review on applications of engineered cementitious composites in pavements. *Construction and Building Materials*, 409 134056.
- Pittman, D., 2012. U.S. Army Corps of Engineers Experience with Roller Compacted Concrete Pavements, American Concrete Institute.
- Rashad, A.M., 2022. Behavior of steel slag aggregate in mortar and concrete - a comprehensive overview. *Journal of Building Engineering*, 53, 104536.
- Rashad, A. M. and Sadek, D.M., 2020. Behavior of alkali-activated slag pastes blended with waste rubber powder under the effect of freeze/thaw cycles and severe sulfate attack. *Construction and Building Materials*, 265, 120716.
- Reda Taha, M.M., El-Dieb, A.S., Abd El-Wahab, M.A. and Abdel-Hameed, M.E., 2008. Mechanical, fracture, and microstructural investigations of rubber concrete. *Journal of materials in civil engineering*, 20(10), 640-649.
- Richardson, A., Coventry, K., Dave, U. and Pienaar, J., 2011. Freeze/thaw performance of concrete using granulated rubber crumb. *journal of green building*, 6 (1), 83-92.
- Romeo, E., Freddi, F. and Montepara, A., 2014, Mechanical behaviour of surface layer fibreglass-reinforced flexible pavements. *International Journal of Pavement Engineering*, 15 (2), 95–109
- Selvam, M., Debbarma, S., Singh, S. and Shi, X., 2022. Utilization of alternative aggregates for roller compacted concrete pavements – a state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 317, 125838.
- Shao, R., Wu, C., and Li, J., 2022. A comprehensive review on dry concrete: application, raw material, preparation, mechanical, smart and durability performance. *Journal of Building Engineering*, 55, 104676.
- Shao, R., Wu, C., Li, J., Liu, Z., Wu, P., and Y. Yang, 2023. Mechanical behaviour and environmental benefit of eco-friendly steel fibre-reinforced dry UHPC incorporating high-volume fly ash and crumb Rubber. *Journal of Building Engineering*, 65, 105747.
- Shin, K-J. and Carboneau, N., 2010. The Indiana Local Technical Assistance Program Roller Compacted Concrete Pavement Manual for Local Government Agencies. Purdue University School of Civil Engineering, Indiana.
- Sidhu, A.S. and Siddique, R., 2023. Durability assessment of sustainable metakaolin based high strength concrete incorporating crumb tire rubber. *Journal of Building Engineering* 72, 106660.
- Symeonides, D., Loizia, P. and Zorpas, A.A., 2019. Tire waste management system in Cyprus in the framework of circular economy strategy. *Environmental Science and Pollution Research*, 26 (35), 35445–35460.
- Tang, Y., Feng, W., Chen, Z., Nong, Y., Guan, S. and Sun, J., 2021. Fracture behavior of a sustainable material: Recycled concrete with waste crumb rubber subjected to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 318, 128553.
- Tavakoli, D., Dehkordi, R.S., Divandari, H. and Brito, J., 2020. Properties of rollercompacted concrete pavement containing waste aggregates and nano SiO₂. *Construction and Building Materials*, 249, 118747.

- Thakur, A., Senthil, K., Sharma, R. and Singh, A.P., 2020. Employment of crumb rubber tyre in concrete masonry bricks. *Materials Today: Proceedings*, 32, 553-559.
- Thomas, B.S., and Gupta, R.C., 2016. A comprehensive review on the applications of waste tire rubber in cement concrete. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 54, 1323-1333.
- Thomas, B.S., Gupta, R.C. and Panicker, V.J., 2016. Recycling of waste tire rubber as aggregate in concrete: durability-related performance. *Journal of Cleaner Production*, 112, 504-513.
- Thomas, B.S., Gupta, R.C., Mehra, P. and Kumar, S., 2015a. Performance of high strength rubberized concrete in aggressive environment. *Construction and Building Materials*, 83, 320-326.
- Thomas, B.S., Gupta, R.C. and Panicker, V.J., 2015b. Experimental and modelling studies on high strength concrete containing waste tire rubber. *Sustainable Cities and Society*, 19, 68-73.
- Tiwari, S. and Gangwar, P., 2021. Evaluate the effect of acid attack on rubberised concrete using crumb tyre rubber and replacement of cement by alccofine. *Materials Today: Proceedings*, 47, 3778-3782.
- Turki, M., Zarrad I., Quéneudec, M. and Bouaziz, J., 2017. Prediction performance of compressive strength of cementitious materials containing rubber aggregates and filler using fuzzy logic method. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 13 (2).
- Wang, Q.Z., Chen, Z.D., Lin, K.P., and Wang, C.H., 2018. Estimation and analysis of energy conservation and emissions reduction effects of warm-mix crumb rubber-modified asphalts during construction period. *Sustainability*, 10 (12), 4521.
- Westergaard, H., 1926. Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis. *Public roads*, 7(2), 25-35.
- Whitehurst, E.A., 1951. Sonoscope tests concrete structures. In *Journal Proceedings* 47 (2), 433-444.
- Williams, S.G. and McFarland, A.M., 2013. Roller compacted concrete for roadway pavement, final report, Transportation Research Committee.
- Xu, J., Chen, S., Yu, H. and Wang, Y., 2015. Crumb rubber concrete deterioration caused by sulphate attack. In *3rd International Conference on Material, Mechanical and Manufacturing Engineering (IC3ME 2015)*, 539-542.
- Yildizel, S.A., Timur, O. and Ozturk, A.U., 2018. Abrasion resistance and mechanical properties of wasted-glass-fiber-reinforced roller-compacted concrete. *Mechanics of Composite Materials*, 54 (2), 251–256.
- Yilmaz, A. and Degirmenci, N., 2009. Possibility of using waste tire rubber and fly ash with Portland cement as construction materials. *Waste management*, 29 (5), 1541-1546.
- Yung, W.H., Yung, L.C. and Hua, L.H., 2013. A study of the durability properties of waste tire rubber applied to self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 41, 665-672.
- Zhang, W., Gong, S., and Zhang, J., 2018. Effect of rubber particles and steel fibers on frost resistance of roller compacted concrete in potassium acetate solution. *Construction and Building Materials*, 187, 752-759.

- Zhao, Z., Xiao, F., and Amirkhanian, S., 2020. Recent applications of waste solid materials in pavement engineering. *Waste management*, 108, 78-105.
- Zhou, W., Mo, J., Xiang, S. and Zeng, L., 2023. Impact of elevated temperatures on the mechanical properties and microstructure of waste rubber powder modified polypropylene fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 392, 131982.
- Zollinger, D., 2016. Roller-compacted concrete pavement. The Federal Highway Administration (FHWA), <https://www.fhwa.dot.gov/pavement/concrete/pubs/hif16003.pdf> (10.03.2024).
- Zrar, Y.J., Younis, K.H. and Sherwani, A.F.H., 2023. Properties of sustainable self-compacted concrete with recycled concrete and waste tire crumb rubber aggregates. *Construction and Building Materials*, 407, 133524.



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Ömer Faruk KELEŞ
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
Adres:	
E-Mail:	
Eğitim	
Lisans:	Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü (2015)
Yüksek lisans:	Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı / Ulaştırma Bilim Dalı (2019)
Doktora:	Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı / Ulaştırma Bilim Dalı (2024)
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	İyi
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	
Tezden Üretilmiş Makaleler	
Keleş, Ö.F., Bayrak, O.Ü. and Bayata H.F., 2024. Experimental investigation on mechanical properties of sustainable roller compacted concrete pavement (RCCP) containing waste rubbers as alternative aggregates. Construction and Building Materials, 424, 135930. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135930	