

**YÜKSEK ORANDA UÇUCU KÜL İÇEREN SİLİNDİRLE
SIKIŞTIRILMIŞ BETONLARDA KATMANLAR ARASI
SOĞUK DERZ OLUŞUMUNUN İNCELENMESİ**

Sultan Husein BAYQRA



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK ORANDA UÇUCU KÜL İÇEREN SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ
BETONLARDA KATMANLAR ARASI SOĞUK DERZ OLUŞUMUNUN
İNCELENMESİ**

Sultan Husein BAYQRA
0000-0001-6889-2584

Doç. Dr. Ali MARDANI
(Danışman)

DOKTORA TEZİ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2023
Her Hakkı Saklıdır

B.U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

17/04/2023

Sultan Husein BAYQRA

ÖZET

Doktora Tezi

YÜKSEK ORANDA UÇUCU KÜL İÇEREN SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILMIŞ BETONLARDA KATMANLAR ARASI SOĞUK DERZ OLUŞUMUNUN İNCELENMESİ

Sultan Husein BAYQRA

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Ali MARDANI

Katmanlar halinde uygulanan silindirle sıkıştırılmış betonların (SSB) en temel problemlerinden biri katmanların birbirlerine tam kenetlenmemesi birbirini takip eden katmanların yerleştirme sürelerinin farklılığından dolayı soğuk derzin oluşmasıdır. Katmanlar arasında oluşan soğuk derz SSB'lerin mekanik, geçirgenlik ve durabilite performanslarını olumsuz yönde etkilemektedir. Bu çalışmada çimento ağırlığının %0, 20, 40 ve 60 oranlarında uçucu külün çimento ve agrega ile ikame edilmesiyle hazırlanan SSB karışımlarında soğuk derz oluşumunun mekanik, geçirgenlik ve donma-çözülme özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Soğuk derz oluşumunu incelemek için numunelerin ilk katmanı yerleştirilip sıkıştırıldıktan sonra ikinci katmanı 0, 60, 120 ve 180 dakika gecikmeli yerleştirilerek sıkıştırılmıştır. Ayrıca soğuk derz oluşumunun önlenmesi için karışıma priz geciktirici katkı katılması, yataklama harcı uygulanması ve ara katmana aderans artırıcı kimyasal katkı püskürtülmesi şeklinde üç farklı yöntem uygulanmıştır. 28 günlük numuneler üzerinde basınç dayanımı, yarmada çekme ve basınçlı su altında su işleme derinliği deneyi yapılarak katmanlar arası en iyi bağı sağlayan yöntem seçilmiştir. En iyi yöntemle üretilen SSB numunelerinin 28 ve 90 günlük basınç, yarmada çekme, eğilme dayanımları, elastisite modülü, poisson oranı, basınçlı su altında su işleme derinliği, su emme ve donma-çözülme dayanımları katmanlar arası işlem uygulanmayan karışımlarla kıyaslanmıştır. Deney sonuçlarına göre, katmanlar arası harç uygulamasının soğuk derzi engellemede en etkili yöntem olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, katmanlar arası yerleştirme süresinin uzaması soğuk derz oluşumundan dolayı SSB'lerin mekanik ve durabilite özelliklerini olumsuz etkilemiştir. Bu olumsuz etki, su işleme derinliğinde, yarmada-çekme ve eğilme dayanımlarında daha belirgin olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Silindirle sıkıştırılmış beton, donma-çözülme dayanımı, uçucu kül, soğuk derz, geçirgenlik özellikleri

2023, xiii+ 151 sayfa.

ABSTRACT

PhD Thesis

ASSESSMENT OF COLD JOINT FORMATION BETWEEN LAYERS IN HIGH
FLY ASH ROLLER COMPACTED CONCRETE

Sultan Husein BAYQRA

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Ali MARDANI

One of the main problems of roller compacted concrete (RCC) applied in layers is that the layers do not fully bonded with each other and cold joint occurs because of the difference in time of placing of the consequent layers. The cold joint formed between the layers negatively affects the mechanical, permeability and durability performances of RCCs. In this study, the effect of cold joint formation on the mechanical, permeability and freeze-thaw properties of RCC mixtures prepared by replacing 0, 20, 40 and 60% of cement and aggregate (by weight of cement) with fly ash were investigated. In order to promote cold joint formation, after placing and compacting of the first layer of the specimens, the second layer was prepared with 0, 60, 120, and 180 minutes delay. In addition, three different methods, i.e., adding a set retarder admixture to the mix, applying a bedding mortar and spraying an adhesion enhancing chemical admixture to the interlayer and were applied to prevent the formation of cold joints. The best method, i.e., application of interlayer bedding mortar, was selected regarding the compressive and splitting-tensile strengths and depth of water penetration under pressure of the 28-day specimens. The 28 and 90-day compressive, splitting-tensile and flexural strengths, modulus of elasticity, poisson ratio, depth of water penetration under pressure, water absorption and freeze-thaw resistance of RCC specimens produced with the best method were compared with those of the control mixtures with no interlayer treatment. According to the experimental results, it was determined that the application of interlayer mortar is the most effective method in terms of preventing cold joints. Furthermore, the prolongation of the interlayer placement time negatively affected the mechanical and permeability properties of RCC due to the formation of cold joints. This negative effect was more pronounced on depth of water penetration under pressure, splitting-tensile and flexural strengths.

Key words: Roller compacted concrete, freeze-thaw resistance, fly ash, cold joint, permeability properties

2023, xiii+ 151 pages.

TEŞEKKÜR

Çalışma sürecince bilgi ve deneyimlerinden faydalandığım, tez konumun belirlenmesi, kaynak toplanması ve deneysel çalışmalarımın bütün aşamalarında destek ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam saygıdeğer Doç. Dr. Ali MARDANI'ye,

Çalışma boyunca değerli görüşleri ve tecrübeleri ile araştırmama yön veren hoşgörüsünü eksik etmeyen tez izleme komitesi üyelerim Prof. Dr. Kambiz RAMYAR'a ve Dr. Süleymana ÖZEN'e,

Deneysel çalışmalarımda yardımlarını esirmeyen Ayvaz EMİN, Ziya Ahmad FAQIRI, Mujebullah LATIFI, Veysel KOBYA ve Kemal KARAKUZU'ya

Deneyde kullanılan su azaltıcı katkı, priz geciktirici katkı ve aderans artırıcı katkı temini için Polisan Kimya A.Ş.'e,

Deneylerde kullanılan çimento ve agregaları temin eden başta AR-GE Müdürü Ahmet Hilmi AYTAÇ olmak üzere Bursa Beton A.Ş.'ye,

Doktora eğitimim süresince 217M408 nolu Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı kapsamında aldığım burstan dolayı TÜBİTAK'a,

Tez çalışmam sırasında bana motivasyon ve manevi yönden destek veren sevgili aileme ve eşim Ziada BAYQRA'ya, teşekkürlerimi sunarım.

Sultan Husein BAYQRA
10/04/2023

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
TEŞEKKÜR.....	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	5
2.1. Genel Bilgi.....	5
2.2. Silindirle Sıkıştırılmış Betonlarda Kullanılan Malzemeler.....	10
2.2.1. Bağlayıcı malzemeler.....	10
2.2.2. Agregası.....	12
2.2.3. Su.....	16
2.2.4. Kimyasal katkıları.....	17
2.3. SSB'lerin Tasarım Yöntemleri.....	17
2.3.1. Yüksek bağlayıcı yöntemi.....	17
2.3.2. Silindirle sıkıştırılmış baraj yöntemi.....	19
2.3.3. Mühendisler topluluğu yöntemi.....	19
2.3.4. Maksimum yoğunluk yöntemi.....	20
2.4. Silindirle Sıkıştırılmış Betonun Özellikleri.....	22
2.4.1. Mekanik özellikler.....	22
2.4.2. Elastisite modülü.....	24
2.4.3. Hacim değişimi.....	24
2.4.4. Katmanlar arası bağ dayanımı.....	25
2.4.5. Geçirgenlik.....	27
2.4.6. Aşınma.....	29
2.4.7. Donma ve çözülme.....	29
2.4.8. Su Emme.....	32
2.4.9. Yoğunluk.....	33
2.4.10. Yüzey özellikleri.....	34
2.5. SSB'lerde Kürleme.....	35
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	36
3.1. Malzemeler.....	36
3.1.1. Çimento.....	36
3.1.2. Uçucu kül.....	37
3.1.3. Agregası.....	38
3.1.4. Su.....	39
3.2. Karışımların Optimum Su Muhtevasının Belirlenmesi.....	39
3.3. Numunelerin Hazırlanması.....	48
3.3.1. Küp numunelerin hazırlanması.....	48
3.3.2. Silindir numunelerin hazırlanması.....	49
3.3.3. Kiriş numunelerin hazırlanması.....	49

3.4. Katmanlar Arası Oluşan Soğuk Derzin İncelemesi.....	50
3.4.1. Priz geciktirici kimyasal katkıların kullanılması.....	50
3.4.2. Aderans artırıcı kimyasal yapıştırıcı uygulaması.....	51
3.4.3. Katmanlar arası harç uygulanması.....	52
3.5. Çalışmada Uygulanan Deneyler ve Yöntemler.....	55
3.5.1. Vebe deneyi.....	55
3.5.2. Su emme.....	56
3.5.3. Basınç deneyi.....	56
3.5.4. Yarmada çekme deneyi.....	56
3.5.5. Eğilme deneyi.....	58
3.5.6. Elastisite modülü deneyi.....	60
3.5.7. Basınç altından su işleme derinliği deneyi.....	61
3.5.8. Donma-çözülme deneyi.....	63
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	66
4.1. SSB karışımların kıvamı.....	66
4.2. Katmanlar Arası Herhangi Bir İşlem Uygulanmamış Karışımlarda Soğuk Derz Oluşumu.....	67
4.3. Priz Geciktirici Kimyasal Katkı Kullanımının SSB'lerin Katmanlar Arası Soğuk Derzin Oluşumuna ve Mekanik Özelliklerine Etkisi.....	71
4.3.1. Basınç dayanımı sonuçları.....	71
4.3.2. Yarmada-çekme dayanımı sonuçları.....	74
4.3.3. Geçirimsizlik deneyi sonuçları.....	78
4.4. SSB Karışımlarda Katmanlar Arası Harç Uygulamasının Soğuk Derz Oluşumu ve SSB'nin Mekanik Özelliklerine Etkisi.....	82
4.4.1. Basınç dayanımı.....	82
4.4.2. Yarmada-çekme dayanımı sonuçları.....	83
4.4.3. Geçirimsizlik deneyi sonuçları.....	85
4.5. SSB'lerin Katmanları Arasında Kullanılan Aderans Arttırıcı Kimyasal katkıının Soğuk Derzin Oluşumuna ve Mekanik Özelliklerine Etkisi.....	88
4.5.1. Basınç dayanımı sonuçları.....	88
4.5.2. Yarmada-çekme dayanımı sonuçları.....	89
4.5.3. Basınçlı su altında su işleme derinliği deneyi sonuçları.....	91
4.6. Katmanlar Arası İyileştirmede En Başarılı Yöntemin Seçilmesi.....	93
4.7. Katmanlar Arası Harç Uygulanan SSB Karışımların Mekanik Özellikleri.....	94
4.7.1. Basınç dayanımı.....	94
4.7.2. Elastisite modülü ve poisson oranı.....	106
4.7.3. Geçirgenlik özellikleri.....	111
4.7.4. Donma-Çözülme Direnci.....	119
5. SONUÇ.....	140
KAYNAKLAR.....	143
ÖZGEÇMİŞ.....	151

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

w	Optimum su muhtevası (%)
γ_{kuru}	Numunenin kuru birim hacim ağırlığı
m_{islak}	Islak beton numunenin kütlesi (g)
m_{kuru}	Değişmez kütleyle ulaşan beton örneğinin kütlesi(g)
K	Uçucu kül içermeyen kontrol karışımı
A	Uçucu külün çimento yerine kullanıldığı SSB serisi
B	Uçucu külün agrega yerine kullanıldığı SSB serisi
V	Hacim
S/B	Su/Bağlayıcı

Kısaltmalar

SSB	Silindirle Sıkıştırılmış Beton
RCC	Roller Compacted Concrete
ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
USACE	United States Army Corps of Engineers
PCA	Portland Cement Association
YFC	Yüksek Fırın Cürufu
C/F	Coarse aggregate/Fine aggregate
TS	Türk Standartları
Ç	Çimento
UK	Uçucu kül
MP	Modifiye Proktor

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 2.1.	SSB sıkıştırma ekipmanları 6
Şekil 2.2.	San Diago’da bulunan SSB’den yapılan Olivenhain barajı..... 7
Şekil 2.3.	Endüstriyel zeminlerde SSB uygulaması..... 9
Şekil 2.4.	C/F oranı ve basınç dayanımı ilişkisi..... 15
Şekil 2.5.	C/F oranı ve yarmada çekme dayanımı ilişkisi..... 15
Şekil 2.6.	C/F oranı ve eğilme dayanımı ilişkisi..... 16
Şekil 2.7.	SSB karışımların tipik kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası eğrisi..... 21
Şekil 2.8.	Su muhtevası ve sıkıştırma enerjisinin kuru birim ağırlık üzerine etkisi..... 22
Şekil 2.9.	90 gün kür uygulanmış numunelerde cüruf miktarına göre su işleme derinliği..... 27
Şekil 2.10.	150 günlük numunelerde cüruf miktarına göre su işleme derinliği..... 28
Şekil 2.11.	C/F oranı ve porozite ilişkisi..... 29
Şekil 2.12.	SSB’de donma-çözülme çevrim sayısı- dinamik elastisite modülü ilişkisi..... 30
Şekil 2.13.	Donma-çözülme çevrimleri sırasında SSB karışımlarının ağırlık değişimi..... 31
Şekil 2.14.	%12 ve %15 oranında bağlayıcı malzeme içeren numunelerin su emme oranları..... 33
Şekil 2.15.	Yoğunluk kontrol cihazı..... 34
Şekil 3.1.	Deneylerde kullanılan agregaların gradasyon eğrisi..... 39
Şekil 3.2.	SSB karışımı için Hazırlanan malzemeler..... 40
Şekil 3.3.	SSB karışımı hazırlamasında kullanılan Pan tipi mikser..... 40
Şekil 3.4.	İlave halka ve çelik bastırma plakası..... 41
Şekil 3.5.	Çelik bastırma plakasına ait kesit ve görünüş..... 42
Şekil 3.6.	SSB’nin su muhtevasını belirlemek için alınan numune ve 105 °C sıcaklığındaki etüvde kurutulması..... 42
Şekil 3.7.	Kalıba sıkıştırılarak yerleştirilen taze betonun ağırlığı..... 43
Şekil 3.8.	Kontrol (K) karışımına ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi..... 44
Şekil 3.9.	A1 karışıma ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi..... 45
Şekil 3.10.	A2 karışıma ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi..... 45
Şekil 3.11.	A3 karışıma ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi..... 46
Şekil 3.12.	B1 karışıma ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi..... 46
Şekil 3.13.	B2 karışıma ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi..... 47

Şekil 3.14.	B3 karışıma ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi.....	47
Şekil 3.15.	Hazırlanan kiriş numuneleri.....	49
Şekil 3.16.	Kür havuzunda standart koşullar altında beklenen numuneler.....	50
Şekil 3.17.	Katmanlar arası aderans artırıcı kimyasal katkının uygulanması.....	52
Şekil 3.18.	Harç karışımının hazırlanması.....	54
Şekil 3.19.	SSB numunelerinde katmalar arası harç uygulaması.....	55
Şekil 3.20.	Vebe deneyi.....	56
Şekil 3.21.	Beton yarmada çekme dayanımı belirleme yönteminin şematik gösterimi.....	57
Şekil 3.22.	Yarmada-çekme deneyi.....	58
Şekil 3.23.	Kiriş numunelerinde çentik açma işlemi.....	59
Şekil 3.24.	Eğilmede çekme dayanımı deney cihazı.....	60
Şekil 3.25.	Elastisite modülü deneyi	60
Şekil 3.25.	Çalışmada kullanılan su geçirimsizlik cihazı.....	62
Şekil 3.26.	Basınçlı su altında su işleme derinliği testinden sonra yapılan ölçüm.....	63
Şekil 3.27.	Donma-çözülme için kullanılan deney cihazı ve numunelerin yerleştirilmesi.....	64
Şekil 3.28.	Deneylerde kullanılan ultrases cihazı.....	65
Şekil 4.1.	SSB karışımların Vebe deneyi sonuçları.....	67
Şekil 4.2.	28 günlük karışımların basınç dayanımı, uçucu kül oranı ve katmanlar arası yerleştirme aralığının ilişkisi.....	68
Şekil 4.3.	28 günlük yarmada çekme dayanımı, uçucu kül oranı ve katmanlar arası yerleştirme aralığının ilişkisi.....	69
Şekil 4.4.	Karışımların su işleme derinliği, uçucu kül oranı ve ikinci katmanın yerleştirme zamanı arasındaki ilişki.....	70
Şekil 4.5.	Katmanlar arasında özel harç uygulanan numunelerin 28 günlük basınç dayanımı sonuçları.....	82
Şekil 4.6.	Katmanlar arasına harç uygulanan numunelerin katmanlar arası yerleştirme aralığına göre 28 günlük yarmada-çekme dayanımı sonuçları.....	84
Şekil 4.7.	Katmanlar arasına harç uygulanan karışımların basınç altında su işleme derinliği.....	86
Şekil 4.8.	Katmanlar arasında aderans artırıcı kimyasal yapıştırıcı uygulanan SSB'lerin 28 günlük basınç dayanımı.....	88
Şekil 4.9.	Katmanlar arasında aderans artırıcı kimyasal katkı uygulanan numunelerin 28 günlük yarmada çekme dayanımı	90
Şekil 4.10.	Katmanlar arasında aderans artırıcı kimyasal katkı uygulanan numunelerin 28 günlük basınç altında su işleme derinliği.....	92
Şekil 4.11.	Karışımların ikinci katmanın yerleştirme zamanına göre 28 günlük bağıl basınç dayanım(%).....	98
Şekil 4.12.	Karışımların ikinci katmanın yerleştirme zamanına göre 28 günlük bağıl yarmada-çekme dayanım (%). (a) katmanlar	98

	arası herhangi bir işlem uygulanmamış. (b) Katmanlar arası harç uygulanmış.....	
Şekil 4.13.	Karışımların ikinci katmanın yerleştirme zamanına göre 28 günlük bağıl eğilme dayanım kaybı (%). (a) katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmamış. (b) Katmanlar arası harç uygulanmış.....	99
Şekil 4.14.	Basınç deneyi uygulanmış SSB numuneler. İkinci katmanı; a) 0. dk gecikme ile yerleştirilen numune, b) 60. dk gecikme ile yerleştirilen numune, c) 120. dk gecikme ile yerleştirilen numune, d) 180. dk gecikme ile yerleştirilen numune.....	100
Şekil 4.15.	Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan SSB karışımlarının yük-sehim eğrileri.....	101
Şekil 4.16.	Katmanlar arası harç uygulanan SSB karışımlarının yük-sehim eğrileri.....	101
Şekil 4.17.	İkinci katmanı 180 dakika sonra yerleştirilen numunelerin eğilme deneyi sonrası görünümü. a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan numune, b) Katmanlar arası 1 cm harç uygulanan numune, c) Eğilme deneyi sonrası çatlak gelişimi.....	102
Şekil 4.18.	SSB karışımların basınç ve yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki.....	103
Şekil 4.19.	SSB karışımların basınç ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki.....	104
Şekil 4.20.	28 günlük numunelerin 0 dakikaya göre bağıl elastisite modülü değerleri (%)	108
Şekil 4.21.	90 günlük numunelerin 0 dakikaya göre bağıl elastisite modülü değerleri (%); a) katmanlar arası işlem görmemiş. b) katmalar arası harç uygulanmış.....	108
Şekil 4.22.	Katmanlar arası gecikme olmayan numunelerin 28 günlük deneysel elastisite modülü değerlerinin farklı standartların önerdiği ampirik formüller ile kıyaslanması.....	109
Şekil 4.23.	İkinci katmanı 60 dakika sonra yerleştirilen numunelerin 28 günlük elastisite modülü değerlerinin farklı standartların önerdiği ampirik formüller ile kıyaslanması.....	110
Şekil 4.24.	İkinci katmanı 120 dakika sonra yerleştirilen numunelerin 28 günlük elastisite modülü değerlerinin farklı standartların önerdiği ampirik formüller ile kıyaslanması.....	110
Şekil 4.25.	İkinci katmanı 180 dakika sonra yerleştirilen numunelerin 28 günlük elastisite modülü değerlerinin farklı standartların önerdiği ampirik formüller ile kıyaslanması.....	111
Şekil 4.26.	Katmanlar arası harç kullanılmayan 28 günlük bağıl su işleme derinliği.....	113
Şekil 4.27.	Katmanlar arası harç kullanılan 28 günlük bağıl su işleme derinliği.....	113
Şekil 4.28.	Basınç dayanımı ve su işleme derinliği arasındaki ilişki.....	115
Şekil 4.29.	Katmanlar arası harç uygulanan ve katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan 90 günlük karışımların su emme oranları.....	117

Şekil 4.30.	90 günlük SSB'lerin basınç dayanımı (0 DÇ).....	119
Şekil 4.31.	90 günlük SSB'lerin 100 DÇ çevrimi sonrası basınç dayanımı.....	120
Şekil 4.32.	90 günlük SSB'lerin 200 DÇ çevrimi sonrası basınç dayanımı.....	120
Şekil 4.33.	90 günlük SSB'lerin 300 DÇ çevrimi sonrası basınç dayanımı.....	121
Şekil 4.34.	İkinci katmanı 180 dakika sonra yerleştirilen ve katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan numunelerin 100 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki görüntüsü: a) K karışımı, b) A1 karışımı, c) A2 karışımı, d) A3 karışımı....	123
Şekil 4.35.	Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımların a) 100 b) 200 ve c) 300 donma-çözülme çevrimi sonrası basınç dayanımı kaybı.....	124
Şekil 4.36.	Katmanlar arası harç kullanılan karışımların a) 100 b)200 ve c) 300 donma-çözülme çevrimi sonrası basınç dayanımı kaybı.....	124
Şekil 4.37.	300 donma-çözülme maruz kalan katmanlar arası harç uygulanan K karışımının görünümü.....	125
Şekil 4.38.	100 donma-çözülme çevrimi sonrası ağırlık kaybı. a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların	127
Şekil 4.39.	200 donma-çözülme çevrimi sonrası ağırlık kaybı. a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların..	127
Şekil 4.40.	300 donma-çözülme çevrimi sonrası ağırlık kaybı. a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların..	128
Şekil 4.41.	100 donma-çözülme çevrimi sonrası ultrases geçiş hızı kaybı. a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların.....	130
Şekil 4.42.	200 donma-çözülme çevrimi sonrası ultrases geçiş hızı kaybı. a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların.....	130
Şekil 4.43.	300 donma-çözülme çevrimi sonrası ultrases geçiş hızı kaybı. a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların.....	131
Şekil 4.44.	İkinci katmanı gecikme olmadan (0 dakika) yerleştirilen numunelerde ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	133
Şekil 4.45.	İkinci katmanı 60 dakika sonra yerleştirilen numunelerde ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	133
Şekil 4.46.	İkinci katmanı 120 dakika sonra yerleştirilen numunelerde ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	134

Şekil 4.47.	İkinci katmanı 180 dakika sonra yerleştirilen numunelerde ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki.....	134
Şekil 4.48.	Katmanlar arası yerleştirme aralığı olmayan karışımların ultrases geçiş hızı kaybı ve ağırlık kaybı arasındaki ilişki....	135
Şekil 4.49.	Donma-çözülme çevrimi öncesi dinamik elastisite modülü, a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların.....	136
Şekil 4.50.	100 Donma-çözülme çevrimi sonrası dinamik elastisite modülü. a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların.....	136
Şekil 4.51.	200 Donma-çözülme çevrimi sonrası dinamik elastisite modülü. a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların.....	137
Şekil 4.52.	300 Donma-çözülme çevrimi sonrası dinamik elastisite modülü. a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların.....	137
Şekil 4.53.	300 DÇ çevrimi sonrası durabilite faktörü.....	139

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 2.1. Beton numunelerinin karışım miktarları (kg / m3).....	12
Çizelge 2.2. Karışım oranları ve Vebe zamanı	14
Çizelge 2.3. Upper Stillwater Barajının yapımında SSB malzeme miktarları.....	19
Çizelge 2.4. Amerika'daki SSB projelerinde kullanılan betonların eğilme ve yarmada çekme dayanımları.....	23
Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal bileşimi.....	36
Çizelge 3.2. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri.....	36
Çizelge 3.3. Uçucu külün kimyasal bileşimi.....	37
Çizelge 3.4. Uçucu külün fiziksel ve mekanik özellikleri.....	37
Çizelge 3.5. Beton karışımlarında kullanılan agregaların fiziksel özellikleri.....	38
Çizelge 3.6. Karışımlarda kullanılan agregaların elek analizi.....	38
Çizelge 3.7. Karışımlara ait olan optimum su muhtevası, maksimum kuru birim ağırlık, karışım su miktarı, bağlayıcı miktarı ve su/ bağlayıcı oranı.....	48
Çizelge 3.8. 1 m3 SSB üretiminde kullanılan malzeme miktarları (kg)..	48
Çizelge 3.9. Priz geciktirici kimyasal katkının özellikleri.....	51
Çizelge 3.10. Katmanlar arasına uygulanan aderans artırıcı kimyasal katkının özellikleri.....	52
Çizelge 3.11. Katmanlar arası uygulanacak harç karışım miktarları.....	53
Çizelge 4.1. Farklı oranlarda Pg içeren karışımların 28 günlük basınç dayanımı.....	71
Çizelge 4.2. PG katkı içermeyen ve %0,2, 0,3 ve 0,4 oranlarında PG katkı içeren SSB karışımların bağıl basınç dayanımı (28 günlük).....	73
Çizelge 4.3. PG katkı içermeyen ve %0,2, 0,3 ve 0,4 oranlarında PG katkı içeren SSB karışımların bağıl basınç dayanımı (28 günlük).....	74
Çizelge 4.4. PG katkı içermeyen ve %0,2, 0,3 ve 0,4 oranlarında PG katkı içeren SSB karışımların bağıl yarmada çekme dayanımı (28 günlük).....	76
Çizelge 4.5. PG içermeyen ve %0,2, %0,3 ve %0,4 oranlarında PG içeren SSB karışımların basınç altında su işleme derinliği...	77
Çizelge 4.6. PG katkı içeren ve içermeyen karışımların G2 yönü esas alınarak ikinci katmanın yerleştirme süresinin bağıl olarak su işleme derinliğine etkisi.....	80
Çizelge 4.7. Katmanlar arası harç kullanılan ve kullanılmayan karışımların ikinci katmanın yerleştirme zamanı gecikmesine göre 28 günlük bağıl basınç dayanımı.....	82
Çizelge 4.8. Katmanlar arası harç kullanılan ve kullanılmayan karışımların ikinci katmanın yerleştirme zamanına göre 28 günlük bağıl yarmada çekme dayanımı.....	84

Çizelge 4.9.	Katmanlar arası harç kullanılan ve kullanılmayan karışımların G2 yönündeki bağlı su işleme derinliği.....	86
Çizelge 4.10.	Katmanlar arası aderans artırıcı kimyasal katkı kullanılan ve kullanılmayan karışımların ikinci katmanın yerleştirme zamanı gecikmesine göre 28 günlük bağlı basınç dayanımı.	88
Çizelge 4.11.	Katmanlar arası aderans artırıcı kimyasal katkı kullanılan ve kullanılmayan karışımların ikinci katmanın yerleştirme zamanı gecikmesine göre 28 günlük bağlı yarmada-çekme dayanımı.....	90
Çizelge 4.12.	Katmanlar arası aderans artırıcı kimyasal katkı kullanılan ve kullanılmayan karışımların ikinci katmanın yerleştirme zamanı gecikmesine göre 28 günlük bağlı basınçlı su altında su işleme derinliği.....	92
Çizelge 4.13.	Karışımların basınç dayanımı sonuçları (MPa).....	94
Çizelge 4.14.	Karışımların yarmada-çekme dayanımı sonuçları (MPa)....	95
Çizelge 4.15.	Karışımların eğilme dayanımı sonuçları (MPa).....	95
Çizelge 4.16.	SSB karışımlarda basınç dayanımının eğilme dayanımına oranı.....	104
Çizelge 4.17.	SSB karışımlarda basınç dayanımının yarmada çekme dayanımına oranı.....	104
Çizelge 4.18.	28 ve 90 günlük SSB karışımların elastisite modülü değerleri (MPa).....	106
Çizelge 4.19.	Katmanlar arasına harç uygulanan ve uygulanmayan karışımların basınç altında su işleme derinliği (mm).....	111
Çizelge 4.20.	DÇ çevrimine maruz kalmayan ve 100 DÇ çevrimine maruz kalan numunelerin ultrases geçiş hızı sonuçları.....	127
Çizelge 4.21.	200 ve 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan numunelerin ultrases geçiş hızı sonuçları.....	128
Çizelge 4.22.	Ultrases geçiş hızına göre beton kalitesi sınıflandırılması....	131

1. GİRİŞ

Taze halde iken sıfır çökme değerine sahip, toprak ve kaya dolgu elemanları ile serilen ve sıkıştırılan SSB, daha hızlı ve ekonomik şekilde inşa edilecek barajların tasarımları için yapılan çalışmalar sonucunda geliştirilmiştir (ACI 207.5R, 1999). SSB'lerde kullanılan malzemeler geleneksel betona benzerdir. Ancak geleneksel betona kıyasla daha az bağlayıcı içeriğine ve daha yüksek agrega miktarına sahip olduğu bilinmektedir (Pittman, 1994; Khayat vd., 2019). Geleneksel betonda olduğu gibi SSB'lerin bazı mekanik, fiziksel ve dayanıklılık özelliklerini iyileştirmek ve maliyetini düşürmek için uçucu kül gibi çeşitli mineral katkıları kullanıldığı beyan edilmiştir (Mehta, 1999; Atis vd., 2004; Bentz vd., Van den Heed vd., 2010).

Barajlarda SSB'lerin kullanılması genellikle katmanlar halinde uygulamaktadır. Söz konusu bu uygulama sırasında geçen zamanla SSB'nin mekanik ve durabilite performansları etkilenmektedir. Özellikle bu uygulamalardaki temel problem silindire sıkıştırılmış tabakaların birbirlerine kenetlenmemesidir. Bu konuda yapılan araştırmalar ile SSB'lerde katmanların kenetlenme sorunları ve katmanlar arasındaki soğuk derz etkileri genellikle baraj yapılarının en zayıf noktaları olduğu beyan edilmiştir (Banthia vd., 1992; Kokubu vd., Zhang vd., 1996; Junrui vd., 2005). Bu bağlamda katmanların bu olumsuz özelliklerinden dolayı SSB'ler düşük kesme dayanımına sahip ve yüksek geçirgenlik özelliği göstermektedir. Böylece barajlarda sızıntı problemleri ortaya çıkmakta ve barajın yapısal dayanıklılığını zayıflatmaktadır (Duan ve Lai, 1995; Rongmei ve Wei, 2007). SSB ağırlık barajlarında ara katmanların baraj güvenliği için kritik bir faktör olduğu beyan edilmiştir (Sha vd., 2016). Bu nedenle SSB'lerde katmanlar arası ara yüzey özelliğini incelemek ve iyileştirmek gerekmektedir.

Katmanların birbirine kenetlenmesi esas olarak katmanlar arasındaki dökümün gecikmesinden, karışımların kıvamından, karışım oranından ve hava koşulundan etkilenir. Bu dört farklı etkiden katmanlar arasındaki geçen süre en önemlisidir (Williams vd., 2013).

Yüzey özellikleri ve konforu SSB kaplamalarının olumsuz yönlerinden sayılmaktadır. Bu olumsuz özelliğinden dolayı uzun zamandan beri SSB kaplamalar, düşük hız ve düşük trafikli yollarda kullanılmaktadır. Yapılan bazı çalışmalarda bu olumsuzlukları gidermek

adına SSB kaplamaların üstüne asfalt tabakası serilmiştir. Ancak, katmanlar arası derzler dayanıklılık sorunlarına yol açmıştır (Mohammed vd., 2019). Katmanlar arası bağ dayanımlarındaki olumsuzluklar özellikle kış aylarında oluşan derzlerden suyun içiriye sızıp donma-çözülmeden dolayı oluşan hasarlara neden olabilmektedir.

SSB yapılarının katmanları arasındaki bağ kuvveti önemli bir mühendislik özelliğidir. Bağ kuvveti, SSB kaplamaların tek tabakalı, kısmen bağlanmış veya bağlanmamış bir kaplama olarak hareket edip etmeyeceğini belirler. Kısmen bağlanmış veya bağlanmamış kaplamaların yük taşıma kapasitesi, tek tabaka olarak işlev gören kaplamalardan önemli ölçüde daha düşük olduğu bilinmektedir (Tayabji vd., 1995).

Birçok araştırmacı, döküm sırasındaki ara katmanları dikkate almadan SSB'nin mekanik özelliklerini incelemiştir. Karimpour (2010), yüksek fırın cürufu (YFC) içeren SSB'lerde üretim ile sıkıştırma arasında geçen sürenin, karışımların dayanım ve geçirgenlik özelliklerine etkisini araştırmıştır. Ayrıca SSB üretimi ile sıkıştırma işlemi arasındaki en ideal zamanı tespit etmek amacıyla 30, 60, 120 ve 180 dakika olmak üzere 4 farklı zaman tercih edilmiştir. Söz konusu SSB numuneleri üzerinde 90 günlük basınç dayanımı, geçirgenlik, su emme ve kılcal su emme deneyleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda söz konusu zaman aralığının artmasıyla YFC içermeyen karışımların olumsuz yönde etkilendiği görülmüştür. Ancak çimentolu malzemenin bir parçası olarak YFC kullanılması, SSB'lerin performans kaybına neden olmadığı gibi, aynı zamanda basınç dayanımı ve geçirgenlik gibi özelliklerini iyileştirdiği beyan edilmiştir.

Li vd., (2015) üç katmanlı ve iki katmanlı SSB barajının sızıntı alanını analiz etmiş ve üç katmanlı yüzeye sahip SSB iki katmanlı yüzeye göre nispeten zayıf bir geçirimsizlik gösterdiğini tespit etmiştir.

Aguiar vd., (2002) SSB karışımlarda bağlayıcı malzeme miktarının ve uçucu kül oranının değişiminin ve betonun olgunluğunun basınç, çekme ve kesme dayanımı üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Ayrıca katmanlar arasındaki yerleştirme gecikmesiyle oluşan soğuk derzin SSB'nin çekme ve kesme dayanımı üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deney sonuçlarına göre SSB karışımlardaki uçucu kül miktarının artmasıyla 28, 90 ve 365 günlük basınç dayanımlarının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca soğuk derz

etkilerinden dolayı çekme dayanımında meydana gelen azalmaların kesme dayanımından daha önemli olduğunu bildirmişlerdir.

Qian ve Xu (2018) geleneksel betonların dökümü sırasında zamanla katmanlar arasındaki ara yüzey özelliklerinin değişiminin betonun mekanik ve geçirgenlik özellikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla katmanları 0, 3, 6, 9, 12, 15 saat aralıklarla dökülmüş iki katmanlı beton karışımlar üzerinde yarmada-çekme, ultrases geçiş hızı, hızlı klor-iyon geçirgenliği, elektrik geçirgenliği ve su geçirgenlik deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre katmanlar arası zaman aralığının artmasıyla beton numunelerinin daha düşük yarmada-çekme dayanımı ve daha yüksek geçirgenlik gösterdiğini beyan etmişlerdir.

SSB'lerin kesme dayanımı üzerine katmanlar arası zaman aralıklarının ve ara katman iyileştirme tekniklerinin etkisi Liu vd., (2018) tarafından incelenmiştir. Deneysel sonuçlara göre katmanlar arası zaman aralığının SSB'nin kesme dayanımı üzerinde olumsuz etkisi olmuştur. Söz konusu zaman aralığı arttıkça, katmanlar arası kesme dayanımı kademeli olarak azalmıştır. Özellikle bu noktada priz süresi belirleyici özellik olmuştur. Başlangıç priz süresinden önce ikinci katmanın yerleştirilmesi SSB'lerin kesme dayanımı üzerinde önemli bir etkisi olmazken, priz başlangıcından sonra priz bitişinden önce dökülen katmanın olumsuz etkisi daha belirgin olarak görülmüştür. Priz bitiş süresinden sonra zaman aralığını etkisi olumsuz anlamda daha büyük ölçeklerde olduğu tespit edilmiştir.

Amaç ve Kapsam

SSB karışımlarının mekanik ve durabilite özellikleri ile ilgili çok sayıda çalışmanın yapıldığı literatürden anlaşılmıştır. Ancak, katmanların gecikmeli olarak uygulanmasına bağlı oluşan soğuk derzin SSB karışımlarının mekanik ve durabilite özelliklerine etkisi ile ilgili çalışmaların sınırlı sayıda olduğu anlaşılmıştır. Bu çalışmada farklı oranlarda uçucu kül içeren SSB karışımlarında ikinci katmanın yerleştirme zamanının gecikmesiyle meydana gelen soğuk derzin SSB'lerin mekanik ve durabilite özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ayrıca üç farklı metot kullanılarak katmanlar arası soğuk derzin oluşumunun engellenmesi incelenmiştir. İlk metotta, SSB karışımlarına priz geciktirici kimyasal katkı ilave edilmiştir. İkinci metotta katmanlar arasına aderans

arttırıcı özelliğine sahip bir kimyasal yapıştırıcı uygulanmıştır. Üçüncü metotta ise katmanlar arasına harç karışımı uygulanmıştır. Deneysel uygulamalar aşamasında SSB karışımların ilk katmanı yerleştirilip sıkıştırıldıktan sonra ikinci katmanı 0, 60, 120 ve 180 dakika gecikmeli olarak yerleştirilmiş ve sıkıştırılmıştır. Deneysel çalışmalar kapsamında taze hal özellikleri bakımından SSB'lerin kıvamı Vebe deneyi yapılarak belirlenmiştir. Katmanlar arasında oluşan soğuk derzi engellemek amacıyla uygulanan üç yöntemin en iyisini belirlemek amacıyla SSB'nin 28 günlük basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve geçirgenlik özellikleri incelenmiştir. Daha sonra belirlenen en iyi yöntemi detaylı bir şekilde incelemek için SSB numunelerinin basınç, yarmada çekme ve eğilme dayanımları, elastisite modülü, Poisson oranı, basınçlı su altında su işleme derinliği, su emme oranları ve donma-çözülme dayanımları belirlenmiştir. Sonuçlar katmanlar arası herhangi bir iyileştirme yapılamadan hazırlanan numunelerle kıyaslanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Genel Bilgi

Silindirle sıkıştırılmış betonlar (SSB) daha hızlı ve ekonomik şekilde yapılması için barajların inşasında ve asfalt yola göre durabilite ve dayanım yönünden daha iyi performans gösteren beton yollarda yaygın olarak tercih edilmektedir. SSB kaplamalar, geleneksel beton kaplama malzemelerinin özelliklerini asfalt kaplamaların yapım uygulamalarıyla birleştirmektedir. SSB kaplamalar, asfalt tipi kaplama ekipmanları ile sıkıştırılır ve asfalt kaplamalara benzer agrega gradasyonlarına sahiptirler. SSB'de kullanılan malzemeler ve yapısal performans özellikleri, geleneksel betona benzerdir. SSB kaplamalar, iyi gradasyonlu agregalar, uygun çimento ve su içeriği ve yeterli sıkıştırma uygulandığında, geleneksel betona eşit veya onu aşan yüksek dayanım özelliklerine ulaşabilmektedir (Harrington vd., 2010). SSB'nin normal beton yollara göre daha ekonomik olduğu bilinmektedir. Bakım maliyetleri de diğer üstyapı türlerine göre daha düşük olduğu bulunmuştur. Son on yılda SSB, depo tesisleri, endüstriyel erişim yolları, büyük ticari park alanları, yol kaplamaları ve şehir içi yolları gibi birçok geleneksel kaplama uygulaması için uygun maliyetli olmaya devam etmiştir (Harrington vd., 2010).

Bu tip betonların taze halde iken kıvamı çok düşüktür ve sıfır çökme değerine sahiptirler (Ouellet, 1998). Bu nedenle SSB'lerde yerleştirme işlemlerinden sonra yüzeyden çok kuvvetli bir sıkıştırma işleminin uygulanması gerekmektedir (Guerinet, 1997).

SSB'nin serim işlemi tamamlandıktan sonra maksimum sıklığı elde etmek için 10 dakika içinde sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmektedir. Sıkıştırma işlemi, karışımın beton santralinde üretilmesinden 45 dakika sonra sonlandırılmalıdır. Sıcak havalarda ise bu işlemin 35 dakikayı aşmaması önerilmektedir (Andriolo, 1998; US Army Corps ofEngineers, 2000).

SSB'ler uygulama aşamasında tamburlu ve titreşimli silindirlerle sıkıştırmaktadır. SSB'lerde ağırlığı 10, 15 veya 20 ton ve frekansı yüksek olan silindirler kullanılmalıdır. Sıkıştırma işlemi, gerekli sıkıştırmanın yapılamadığı bölgelerde onaylanmış el kumandalı

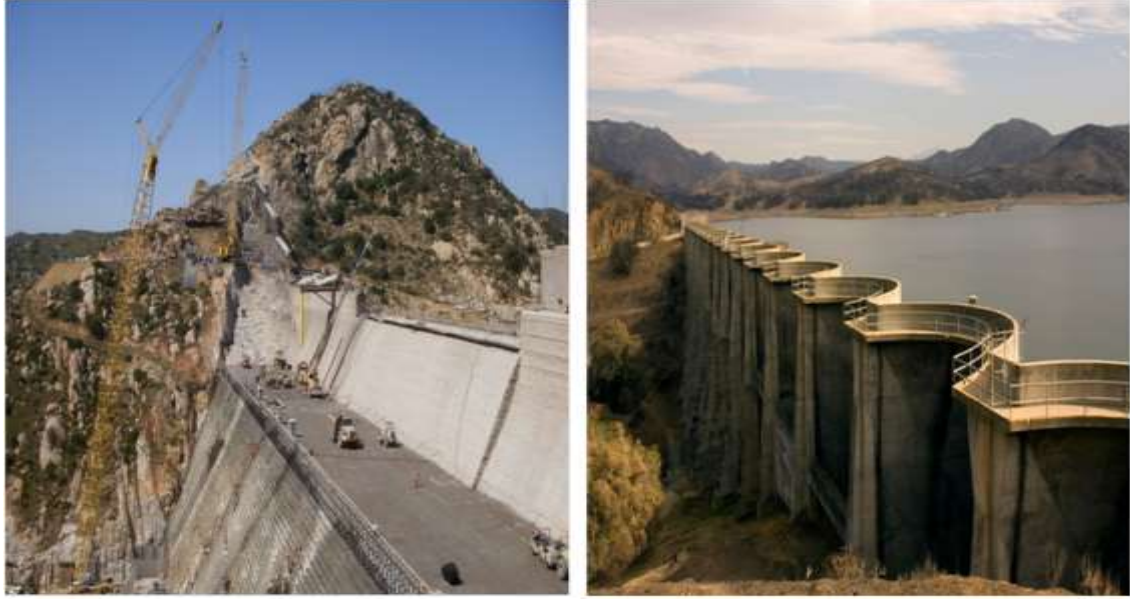
sıkıştırma ekipmanı ile yapılmaktadır. Sıkıştırılmış tabakanın kalınlığı, deneme döküm işlemleri sırasında belirlenmektedir (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. SSB sıkıştırma ekipmanları (Horzum, 2009).

Titreşimli silindirlerin genliği (amplitude) 0,4-0,8 mm arasında olmalı, çalışma frekansı en az 1800-3200 devir/dakika ve silindir tamburunun her bir metresi 6000-8000 kg arasında dinamik kuvvet uygulamalıdır (ACI Committee,1988). Diğer yandan kullanılan silindirlerin hızı saatte 2,5 km/saat aşmamalıdır. El kumandalı sıkıştırma ekipmanı en az 850 kg kuvvet uygulayabilmelidir. İlk sıkıştırma, 10 tonluk bir silindirle en az 4 geçişle yapılmalıdır. Bundan sonra 20-30 tonluk lastik tekerlek silindiri ile 2 veya daha fazla geçiş yapılmalıdır.

SSB'ler dünya çapında ağırlık ve kemer barajları inşaatında kullanılmaktadır. SSB'ler, beton barajlarını daha hızlı ve ekonomik olarak tasarlamak ve inşa etmek için geliştirilmiştir. Başta Japonya ve Çin olmak üzere 39 ülkede 280'den fazla SSB barajı bulunmaktadır. Amerika Birleşik Devletleri'nde 37 SSB barajı vardır ve en yükseği Şekil (2.2)'de gösterilen 2003 yılında tamamlanan San Diego'daki Olivenhain Barajıdır (Adaska 2006).



Şekil 2.2. San Diego’da bulunan SSB’den yapılan Olivenhain barajı (Adaska, 2006)

SSB’lerin bir diğer önemli kullanım alanları sanayi alanları (Şekil 2.3) fabrikalar, petrol istasyonları, hava limanları ve yollardır. Bu uygulamalarda SSB, dinamik yüklere ve çok ağır taşıtlardan kaynaklanan yüklere maruz kalmaktadır (Delatte vd., 2003). Qasrawi vd., (2005), SSB'leri aşırı basınç altında ve çok sıcak havalarda maruz kalan uygulamalarda çatlama problemlerini çözmek için asfalt yollara bir alternatif olarak önermiştir.

SSB’nin ekonomik ve hızlı inşaa edilmesinden dolayı birçok kaplama uygulaması için faydalıdır. Aynı zamanda geleneksel olarak inşa edilmiş beton kaplamaların maliyeti ile karşılaştırıldığında önemli mertebelerde tasarruflar sağlamaktadır (Tayabji vd., 1995). İnşaat, işletme ve bakım aşamaları sırasında mekanik özellikler ile genel maliyetler arasında nispeten belirli bir oran vardır (Bílý vd., 2015). Ayrıca SSB’lerin erken yaşlarda yüksek dayanımı, düşük üretim maliyeti, hızlı yapım süreci ve daha az miktarda bağlayıcı madde içerdiği gibi özelliklerinden dolayı barajlar gibi kütle beton yapılarında da yaygın olarak tercih edilmektedir.

Geçmişte, SSB kaplamalar nispeten pürüzlü yüzeyleri nedeniyle esas olarak bakım ve park alanları veya düşük hızlı erişim yollarında kullanılmıştır. Bu alanlar düşük hızlı, ağır yük ve paletli araçlar için kullanılmaktadır. Bununla birlikte SSB kaplamalar

kullanılmaya başlandığı andan itibaren sert ve ılıman iklimlerde her türlü tekerlek yükünde kullanılmıştır.

Son yıllarda, geliştirilmiş tasarım ve inşaat teknikleri ile SSB'ler ticari alanlarda, şehir içi yollar ve otoyollarda kullanılmaya başlanmıştır (Harrington ve diğerleri, 2010).

SSB'nin yaygın kullanım alanları Donegan (2011) tarafından şu şekilde belirtilmiştir.

- Limanlar,
- Stok sahaları,
- Askeri tesisler,
- Kamyon terminalleri-dağıtım merkezleri,
- Düşük ve orta hızlı yollar,
- Park alanları.



Şekil 2.3. Endüstriyel zeminlerde SSB uygulaması (Mardani-Aghabaglou, 2011)

2.2. Silindirle Sıkıştırılmış Betonlarda Kullanılan Malzemeler

SSB karışımlarında kullanılan malzemeler ağşağıda sıralanmıştır:

- Bağlayıcı malzemeler
- İri ve ince agregalar
- 200 nolu elekten geçen malzemeler
- Su
- Kimyasal katkılar

2.2.1. Bağlayıcı malzemeler

SSB'lerde, bağlayıcı malzeme olarak çimento ve mineral katkılar kullanılmaktadır. Büyük hacimlerde dökülen SSB karışımlarında hidrasyon ısısından dolayı genleşmeler neticesinde oluşan çatlakları önlemek için çimentonun yerine uçucu kül ve cüruf gibi mineral katkılar kullanılmaktadır (Hansen ve Reinhardt, 1991).

Çimento

SSB'lerde kullanılan çimentolar normal betonlara benzerdir. Son yıllarda, kütle betonunun hidrasyon ısısını etkili bir şekilde azaltmak için düşük düşük ısılı çimentolar da kullanılmaktadır. Söz konusu çimentoların avantajları, hidrasyona bağlı olarak sıcaklık artışını etkili bir şekilde kontrol eden nispeten düşük C₃S içeriğidir (LaHucik ve Roesler, 2015)

İzmir Beydağ Barajı inşaatında 30 kg/m³ uçucu kül ve 60 kg/m³ CEMI 42.5R tipi çimento, Denizli Cindere Barajı inşaatında ise 20 kg/m³ uçucu kül ve 50 kg/m³ çimento kullanılmıştır (Andriolo ve Polat, 2006). Fransa'daki Les Olivettes barajında yüksek fırın cürufu (YFC) çimentosu kullanılmıştır (Andriolo, 1998).

SSB karışımlarında düşük oranda çimento dozajı kullanımının avantajları şunlardır;

- Betonda hidrasyon ısısını azaltarak çatlak oluşumu riskinin enegellenmesi,

- Betonda çatlak oluşumu riskinin azalmasından dolayı geçirgenliği az olan bir betonun elde edilmesi,
- Kütle betonlarda soğutma işlemlerinden kaynaklanan masrafların azalması,
- Maliyetin azalması,
- Betonda, çimento kullanımından dolayı meydana gelen durabilite sorunlarının azaltılması (Horzum, 2009).

Mineral Katkılar

Normal betonlarda kullanılan mineral katkıları SSB karışımlarında da kullanılabilir. Mineral katkı kullanımı SSB'lerin hidrasyon ısısının düşürmesinde en etkili yöntemlerden biridir. Ayrıca mineral katkıların kullanılması SSB'lerin mekanik, fiziksel ve dayanıklılık özelliklerini geliştirir (Mardani-aghbabaglou, 2011).

Uçucu kül

SSB baraj inşaatında yapay puzolan olarak en çok uçucu kül tercih edilmektedir. Kütle beton yapılarında katkı maddesi olarak yüksek dozda uçucu külün kullanılması, yüksek hidrasyon ısısının neden olduğu çatlama riskini azaltabilir ve geleneksel yapılarda gerekli olan çimentonun bir kısmının yerini alabilir. Bu nedenle, SSB'lerde hidrasyon ısısını azaltmak, çatlamayı azaltmak ve inşaat sürecini hızlandırmak için uçucu kül kullanılabilir.

Beton karışımlarında uçucu kül kullanımının işlenebilirliği arttırmak ve kütle betonunda hidrasyon sıcaklığını düşürmede olumlu etkisi olduğu bilinmektedir. Ayrıca, uçucu kül SSB baraj inşaatında kayda değer bir öneme sahip olan prize geciktirme özelliğine de sahiptir. Yapılan araştırmalar sonucunda uçucu külün SSB karışımlarında kullanılmasının mekanik ve dayanıklılık özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sağladığı tespit edilmiştir. Sun vd. (1998), farklı oranlarda uçucu kül kullanmanın SSB'lerin yorulma dayanımı üzerindeki etkisini araştırmıştır. Yapılan çalışmada kullanılan karışım miktarları Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Beton numunelerinin karışım miktarları (kg / m³) (Sun vd., 1998)

Seri	Çimento (kg)	Uçucu kül (kg)	Kimyasal katkı (kg)	Kum (kg)	İri agrega (kg)	Su (kg)
F-0	300	0	1,50	802	1309	114
F-15	270	45	1,58	752	1332	113
F-30	240	90	1,65	699	1348	113
F-45	210	130	1,73	650	1373	113
N-B	330	0	0,83	638	1344	142

Sonuçlar, SSB numunelerinde kullanılan uçucu külün betonların yorulma ve eğilme dayanımlarının arttırdığını göstermiştir. Uçucu kül içeren karışımların yorulma dayanımının normal betona göre %40 ile 50 arasında arttığı tespit edilmiştir.

SSB karışımlarında kullanılan uçucu külün amaçları şunlardır:

- SSB'nin hidrasyon ısısını azaltmak,
- Termal genişmeden kaynaklanan derzleri azaltmak,
- İşlenebilirliği iyi olan bir beton elde etmek,
- Betonda oluşan derzleri engelleyerek geçirimsizliği azaltmak,
- Filler malzemesi olarak kullanılıp boşluk oranlarını azaltmak,
- Maliyeti azaltmak (Andriolo 1998, Hansen and Reinhardt, 1991).

2.2.2. Agrega

SSB'lerde de normal betonlara benzer iri ve ince agregalar kullanılmaktadır. SSB karışımlarında kullanılan agregalar toplam hacmin %85'ni oluşturduğu için SSB'lerin fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir (Andriolo, 1998). SSB'lerde iri ve ince agrega miktarı normal betondan farklılık göstermektedir. SSB'lerde agreganın tane şeklinin dayanım üzerindeki etkisi normal betonlara göre daha azdır. Alkali agrega reaksiyonunun oluşumu SSB karışımlarında geleneksel betonlara

göre daha azdır. Söz konusu durumun SSB'nin düşük çimento ve su içeriğine sahip olmasıdır (Ağralıoğlu, 2004).

Agregalar üretim menşei, şekli, tane büyüklüğü ve yoğunluklarına göre sınıflandırılmaktadır. Üretim menşei itibarıyla doğal ve yapay agregalar olarak ayrılmaktadır. Agregalar şekil olarak köşeli ve yuvarlak olmaktadır. Agregalar tane büyüklüğü olarak iri ve ince agregalara ayrılmaktadır. Tane büyüklüğü 4 mm'den küçük olanlara ince, büyük olanlara ise kaba agrega denilmektedir. Agregalar yoğunluklarına göre hafif, normal ve ağır agrega olmak üzere 3 sınıfa ayrılır.

Savaş (2019) tarafında yapılan bir çalışmada farklı tip agregalarla kullanılarak üretilen SSB karışımlarının özellikleri araştırılmıştır. Bu amaçla, dolomit, bazalt, mermer ve iki farklı tip kalker olmak üzere beş farklı agrega türü ve doğal kum kullanılmıştır. Agregalar üzerinde yapılan Los Angeles parçalanma direnci tayini sonucunda mermer agregası hariç diğer tüm agrega türleri %30'luk parçalanma değerinin altında olduğu için kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir. En yüksek basınç dayanımı değeri bazalt, en düşük basınç dayanımı değeri ise kalker I agregası kullanılarak üretilen SSB örneklerinden elde edilmiştir. Ayrıca tüm agrega türleri ile üretilen karışımların basınç, eğilme ve ultrases geçiş hızı sonuçları istenilen hedefe ulaşmış olup başarılı bir şekilde kullanılabilirliği saptanmıştır.

Yıkanmamış agregaların kullanılması, SSB yapılarında başarılı sonuçlar verdiği yapılan çalışmalar sonucunda vurgulanmıştır (Hansen ve Reinhardt, 1991). Ayrıca, yapılan araştırmalar SSB karışımlarında geri kazanılmış (GK) agregaların kullanılabilirliğini göstermiştir (Debieb vd., 2009).

SSB karışımlarında GK agregalarının kullanılabilirliğini Courard vd. (2010) tarafından araştırılmıştır. Çalışmada maksimum tane boyutu 20 mm olan agregalar kullanılmıştır. Test sonuçlarına göre, doğal ve GK agregalarının kullanıldığı SSB, sıkıştırılabilirlik açısından benzer sonuçlar göstermiştir. Bununla birlikte, doğal agregaların kullanıldığı SSB karışımları basınç dayanımı açısından daha yüksek çıkmıştır.

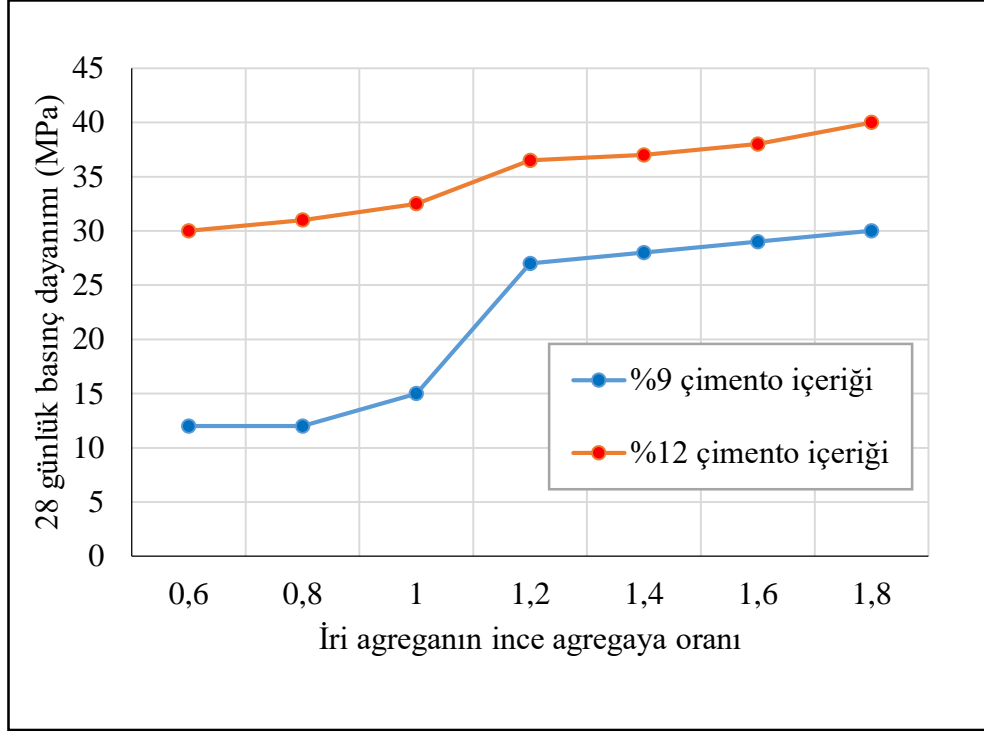
Agrega Tane Dağılımı

Agrega seçiminin doğru yapılmasının yanı sıra, iri ince agrega oranının uygun bir şekilde belirlenmesi ve su/çimento oranı SSB'lerin işlenebilirlik, sıkıştırılabilirlik, boşluklar oranı, ayrışma ve yüzey özelliklerini etkileyen kilit faktörlerdir (Andriolo, 1998). İri agreganın ince agregaya oranınının (C/F) SSB'nin taze ve sertleşmiş hal özelliklerine etkisi Hashemi vd. (2018) tarafından incelenmiştir. Karışımlar %9 (204 kg/m³) ve %12 (268 kg/m³) çimento içeriği ile üretilmiştir. Söz konusu çalışmadaki SSB karışım oranları Çizelge 2.2'te verilmiştir.

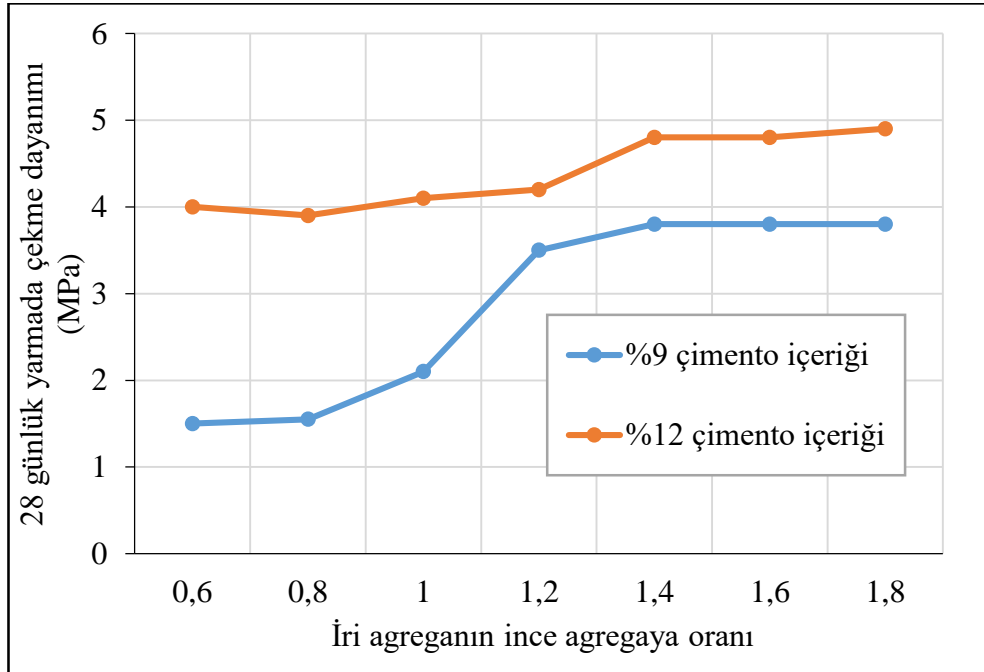
Çizelge 2.2. Karışım oranları ve Vebe zamanı (Hashemi vd., 2018)

Karışım	Çimento (%)	Çimento (kg/m ³)	Su/çimento oranı	İri agrega (kg/ m ³)	İnce agrega (kg/ m ³)	İri agrega/ince agrega	Su (kg/ m ³)	Vebe zamanı (s)
A-9-1	9	204	0,42	773	1288	0,6	85,6	10–20
A-9-2				916	1145	0,8	85,6	
A-9-3				1030	1030	1	85,6	
A-9-4				20–30	1123	937	1,2	85,6
A-9-5					1202	859	1,4	85,6
A-9-6					1268	793	1,6	85,6
A-9-7					1325	736	1,8	85,6
B-12-1	12	268	0,42	738	1230	0,6	112,8	10–18
B-12-2				875	1094	0,8	112,8	
B-12-3				984	984	1	112,8	
B-12-4				18–26	1074	895	1,2	112,8
B-12-5					1148	820	1,4	112,8
B-12-6					1212	757	1,6	112,8
B-12-7					1266	703	1,8	112,8

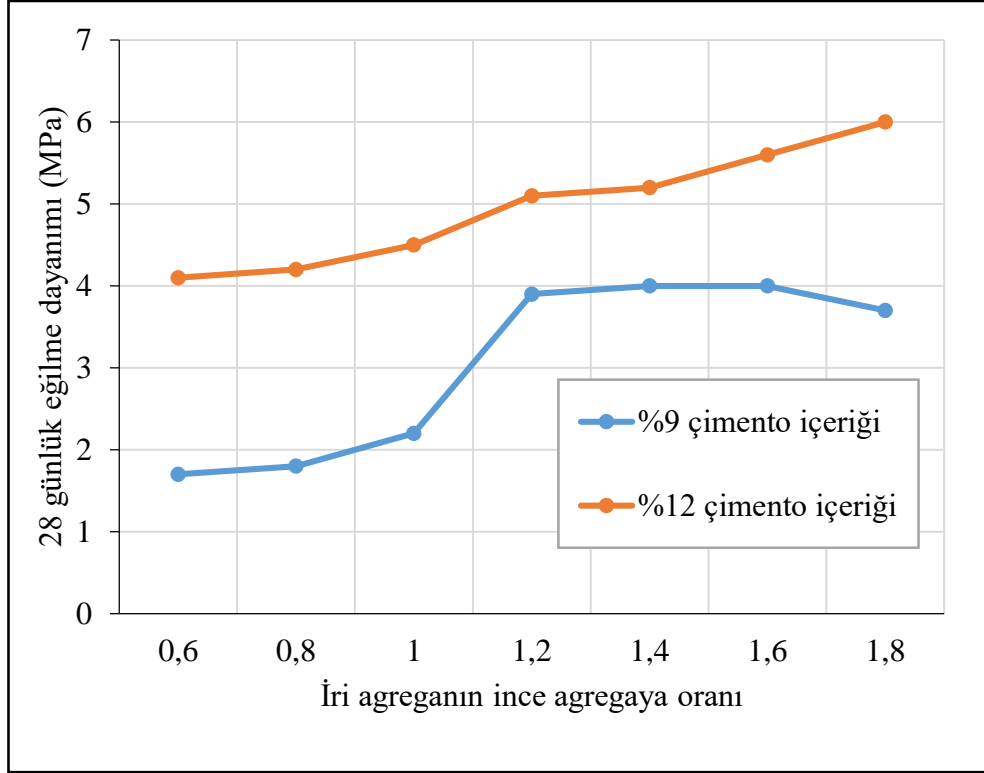
Araştırmada basınç dayanımı, eğilme dayanımı, yarmada çekme dayanımı, Vebe zamanı ve geçirgenlik deneyi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 2.4- 2.6'da gösterilmiştir.



Şekil 2.4. İri agreganın ince agregaya oranı ve basınç dayanımı ilişkisi (Hashemi vd., 2018)



Şekil 2.5. C/F oranı ve yarmada çekme dayanımı ilişkisi (Hashemi vd., 2018)



Şekil 2.6. C/F oranı ve eğilme dayanımı ilişkisi (Hashemi vd., 2018)

Sonuç olarak, iri agreganın ince agregaya oranı 0,6'dan 1,8'e yükseldiğinde Vebe zamanının 3 kata çıktığı tespit edilmiştir. Ancak çimento içeriğinin %9'dan %12'ye yükselmesi Vebe süresini %12 civarında azaltmıştır.

C/F oranının 0,6'dan 1,2'ye yükselmesi geçirgenliği önemli ölçüde azaltmıştır. Bu azalma %9 çimento içeren karışımlarda %60 olurken, %12 çimento içeren karışımlarda ise %38 olduğu görülmüştür.

En büyük tane çapı 75 mm olan SSB karışımlarında agregalar genellikle 0 - 4,75, 4,75 - 19, 19 -38, 38 - 75 mm olmak üzere 4 sınıfa ayrılmaktadır (Andriolo, 1998).

2.2.3. Su

SSB'de kullanılan su içilebilir olmalı ve yağ, asit, tuz, alkali ve diğer zararlı maddeleri içermemelidir (Ağralıoğlu, 2004).

2.2.4. Kimyasal katkılar

Kimyasal katkılar genellikle SSB'nin işlenebilirliğini arttırmak, donma-çözülme dayanımı iyileştirmek ve priz süresini geciktirmek için kullanılmaktadır. Sıcak havalarda SSB'de oluşabilecek soğuk derzleri önlemek için kimyasal katkılar kullanılmaktadır. SSB karışımlarında kullanılan kimyasal katkı maddeleri şunlardır:

- Su azaltıcı katkılar:
- Priz geciktiriciler:
- Hava sürükleyici katkılar:

2.3. SSB'lerin Tasarım Yöntemleri

ACI 207.5R-99'a göre silindirle sıkıştırılmış betonlar, dört farklı yöntem ile tasarlanmaktadır. Bu yöntemler:

- Yüksek bağlayıcı yöntemi,
- Silindirle sıkıştırılmış baraj yöntemi,
- Mühendisler topluluğu yöntemi,
- Maksimum yoğunluk yöntemi,

2.3.1. Yüksek bağlayıcı yöntemi

Upper Stillwater Barajı tasarımı sırasında yüksek bağlayıcı yöntemi, "United States Bureau of Reclamation" tarafından geliştirilmiştir. Bu yöntem ile tasarlanan karışımlar genellikle yüksek bağlayıcı madde, yüksek miktarda pozzolan ve iyi gradasyonlu agregalar içermeli ve karışımlar iyi bir işlenebilirliğe sahip olmalıdır. Bilindiği gibi, SSB'ler genellikle katmanlar halinde uygulanmaktadır. Bu yöntemde temel amaç SSB'lerin ara katman bağlantı bölgelerinde yani birleşim yerlerinde yüksek bağ dayanımına ve buna bağlı olarak düşük derz geçirgenliğine sahip olmaktır. Bu nedenle bu özelliklerin iyileştirilebilmesi için karışımlarda hamur fazının yeterli olması

gerekmektedir. Ancak karışımda bağlayıcı malzemenin fazla kullanılması nedeniyle sıcaklık artışına bağlı olarak meydana gelebilecek hacimsel değişimler kontrol edilmelidir. Bunu sağlamak için çimentonun bir kısmı yerine farklı puzolanik malzemeler kullanılmaktadır (Hansen vd., 1991).

Agrega tanelerinin arasındaki boşlukların yeterince hamurla doldurulması, sıkıştırma işlemi sırasında SSB karışımlarının maksimum yoğunlukta olmasını sağlamak için önemlidir. Karışımlarda hamurun az olması ve sıkıştırmaya rağmen boşlukların kalması dayanımın düşmesine ve geçirgenliğin artmasına neden olmaktadır. Bu yöntemde SSB'lerin tasarımı 3 aşamadan oluşmaktadır;

- Minimum boşluk hacmine sahip agregada gradasyonun belirlenmesi,
- Agregalar arasındaki boşluk hacmine ve işlenebilirliğine bağlı olarak optimum hamur hacminin belirlenmesi,
- İstenilen dayanımı elde etmek için su/bağlayıcı oranı ve malzeme içeriğinin belirlenmesi (PCA, 2004).

Bu yöntemde su/çimento ve puzolan/çimento oranları belirli bir dayanım değeri ve dayanım kazanım hızı için belirlenir. SSB karışımlarında su, ince agregada ve kaba agregada oranlarının optimum değerleri 10-30 saniye arasında Vebe süresi sağlayacak şekilde belirlenir. Daha sonra birim hacim karışımındaki agregada, çimento, puzolan ve su hacimleri dikkate alınarak karışımın hava içeriği hesaplanır (ACI 207,5R, 1999).

Silindirle sıkıştırılmış baraj yöntemi ve yüksek bağlayıcı yöntemi beton yaklaşımıyla tasarlanmaktadır. Upper Stillwater Barajının yanısıra birçok baraj bu yöntemle inşa edilmiştir. Upper Still Water barajı yapımında kullanılan malzeme miktarları Çizelge 2.3'te verilmiştir (ACI 207,5R, 1999).

Çizelge 2.3. Upper Stillwater Barajının yapımında SSB malzeme miktarları (ACI 207 5R, 1999)

Malzemeler	Miktar
Su (kg/m ³)	94
Çimento (kg/m ³)	79
Mineral Katkılar (kg/m ³)	173
İnce Agregalar (kg/m ³)	729
İri Agregalar (kg/m ³)	1292
Agrega Maksimum Tane Büyüklüğü (mm)	51
Hava içeriği (%)	1.5
Su Azaltıcı Katkılar (cm ³ /m ³)	7
Beton Yoğunluğu (kg/m ³)	2367

2.3.2. Silindirle sıkıştırılmış baraj yöntemi

Bu yöntemdeki bağlayıcı miktarı genellikle 120 ile 140 kg/m³ arasında değişmekte olup araştırmacılar tarafından uçucu külün çimento ağırlığının %30'u kadar ikame edilebileceği belirtilmiştir (Koichi vd., 1991; Hansen vd., 1991).

Söz konusu yöntemde 2 kriterin SSB karışımlarının tasarımında karşılanması gerekmektedir: İstenen dayanımı sağlayacak şekilde mümkün olduğunca çimentonun dozajı düşük olmalıdır. Ayrıca karışımlarda mineral katkı olarak uçucu kül kullanılmalıdır.

2.3.3. Mühendisler topluluğu yöntemi

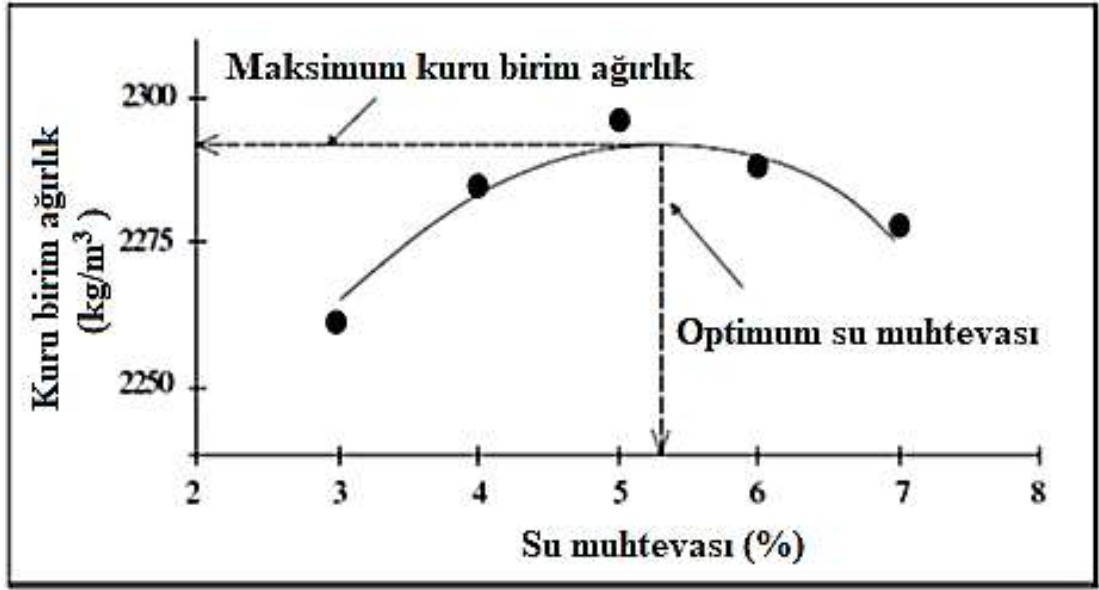
Mühendisler topluluğu yöntemi, S/Ç oranı ve dayanım ilişkisine bağlı tasarlanmış bir yöntemdir. Karışımdaki en büyük agrega tane boyutu ve su ihtiyacı istenen Vebe süresine bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca, karışımlarda kullanılan maksimum agrega tane boyutu ve iri agrega özellikleri karışımdaki ince agrega miktarının toplam agrega hacmine oranını etkilemektedir.

Normal betonda olduğu gibi, SSB karışımlarında kullanılan agregalar tip ve tane dağılımı açısından değerlendirilir. Mühendisler Topluluğu Yönteminde SSB karışımları için tavsiye edilen tipik nominal maksimum agrega tane boyutu 75 mm'dir. Japonya'da ve Tarbela Barajında daha büyük boyutlu agregalar başarılı bir şekilde kullanılmış olsa da, 75 mm'den büyük agregalar, teknik veya ekonomik nedenlerle, Mühendisler Topluluğu Yöntemi tarafından yapılan SSB'lerde pek az kullanılmaktadır.

2.3.4. Maksimum yoğunluk yöntemi

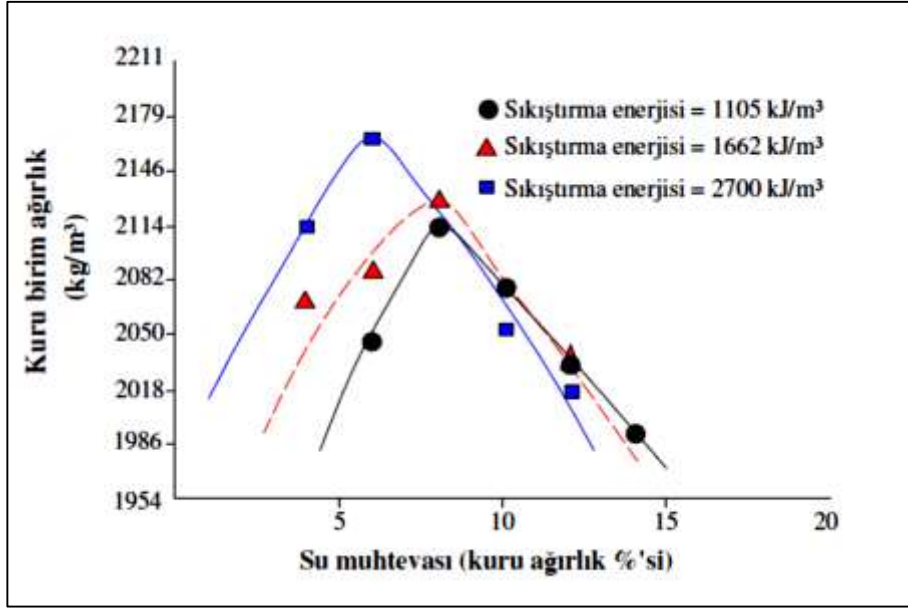
Bu yöntem literatürde zemin yaklaşımı olarak da bilinmektedir. Söz konusu yöntem maksimum agrega çapının daha küçük ve bağlayıcı dozajının daha yüksek olduğu SSB karışımları için uygundur (ACI 207,5R, 1999). Bu nedenle SSB ile inşa edilen kaplamalarda yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir.

Bu yöntemde SSB karışım oranları su muhtevası-kuru birim hacim ağırlık ilişkisi açısından incelenmektedir (Hansen ve Reinhardt, 1991). Bu bağlamda betonun en büyük kuru birim hacim ağırlığını belirlemek amacıyla taze betona belirli sıkıştırma enerjisi uygulayarak su içeriğinin belirlenmesi gerekmektedir (Andriolo, 1998). Optimum su muhtevasına karşılık gelen maksimum kuru birim hacim ağırlığı hesaplamak için Standart Proktor deneyi (ASTM D698, 2000) veya Modifiye Proktor deneyi (ASTM D1557, 2007) uygulanmaktadır. Modifiye Proktor deneyi sonucu elde edilen tipik kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası grafiğı Şekil 2.7'de gösterilmiştir (Harrington vd., 2010).



Şekil 2.7. SSB karışımların tipik kuru birim hacim ağırlık-su muhtevası eğrisi (Harrington vd., 2010)

SSB'nin farklı sıkıştırma enerjisi sonucu elde edilen kuru birim ağırlık-su muhtevası ilişkisi Şekil 2.8'de gösterilmiştir (ACI 207,5R, 1999). Şekil 2.8'da da görüldüğü gibi, maksimum kuru birim ağırlık ve optimum su muhtevası sıkıştırma enerjisine göre değişiklik göstermektedir. Sıkıştırma enerjisinin artmasıyla maksimum kuru birim ağırlık artmakta, optimum su muhtevası azalmaktadır. Bu nedenle numunelerin benzer özellikte hazırlanması için bu yöntemle üretilen tüm SSB karışımları için sıkıştırma enerjisi sabit tutulmalıdır.



Şekil 2.8. Su muhtevası ve sıkıştırma enerjisinin kuru birim ağırlık üzerine etkisi (ACI 207 5R-99, 1999)

2.4. Silindirle Sıkıştırılmış Betonun Özellikleri

2.4.1. Mekanik özellikler

SSB'lerin dayanımı öncelikle bağlayıcı malzemelerin türü ve içeriği, agrega kalitesi ve gradasyonu, su içeriği ve sıkıştırma derecesinden etkilenmektedir (Army Corps of Engineers, 2000). SSB'nin basınç, eğilme ve yarmada-çekme dayanımları arasındaki ilişki, normal betonlaral olduğu bilinmektedir. Bazı SSB projelerin eğilme ve yarmada çekme dayanımı verileri Çizelge 2.4'e verilmiştir (Tayabji vd., 1995).

Çizelge 2.4. Amerika'daki SSB projelerinde kullanılan betonların eğilme ve yarmada çekme dayanımları (Tayabji vd., 1995)

Proje	Yaş (gün)	Kiriş ve silindir numunelerin test sonuçları	
		Ortalama eğilme dayanımı (MPa)	Ortalama yarmada-çekme dayanımı (MPa)
Ft. Stewart	90	6,96	-
Ft. Hood	7	4,56	-
	28	5,72	-
Harvey kışlası	7	-	2,33
	28	5,4	2,78
Ft. Cambell	7	-	2,75
	28	4,46	-
Aberden	7	3,81	2,61
Deneme alanı	28	4,32	3,12

Uçucu külün SSB'nin mekanik özelliklerine etkisi

Mardani-Aghabaglou ve Ramyar (2013) tarafından yapılan çalışmada, uçucu kül kullanımının SSB'lerin mekanik özelliklerine etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak, çimento yerine uçucu kül kullanılan karışımların uçucu kül kullanım oranının artmasıyla mekanik özelliklerinin tüm yaşlarda kontrol serilerine göre düştüğü belirlenmiştir.

Atis vd. (2004), farklı oranlarda uçucu kül kullanımının SSB'lerin mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu kapsamda çimento dozajları 200, 300 ve 400 kg/m³ ve uçucu kül oranları çimento yerine ağırlıkça %15, 30 ve 45 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, %15 uçucu kül kullanımının kontrol grubuna göre SSB numunelerinin mekanik özelliklerini iyileştirdiği, %30 uçucu kül kullanımının fazla bir fark yaratmadığı ve %45 oranında kullanıldığında karışımların mekanik özelliklerinin olumsuz etkilendiği saptanmıştır.

Cao vd. (2000), farklı oranlarda uçucu kül kullanımının SSB'lerin dayanımı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Buna göre, maksimum agrega tane çapı 25 mm ve çimento dozajı 300 kg/m³ olan SSB karışımları hazırlanmıştır. Çalışmada çimento yerine uçucu kül oranları ağırlıkça %45, 55, 65, 75, 85 ve 95 olarak belirlenmiştir. Sonuçlara göre, uçucu kül kullanımının dayanımı erken yaşlarda olumsuz etkilediği, ileri yaşlarda ise olumlu yönde katkı sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca %45 uçucu kül katkılı SSB'lerin hem basınç hem de eğilme dayanımları açısından en yüksek sonuçları verdiği görülmüştür.

Rao vd. (2015), karışımlardaki uçucu kül içeriğindeki artışın tüm yaşlarda eğilme, basınç ve yarmada-çekme dayanımı değerlerinde düşüşe neden olduğunu göstermiştir. Pavan ve Rao (2014), çimentonun uçucu kül ile değiştirildiği SSB karışımlarında uçucu kül içeriğinin artırılmasının her yaşta basınç, yarmada-çekme ve eğilme dayanımlarında azalmaya neden olduğunu belirtmişlerdir. Rao (2015), SSB karışımlarındaki uçucu külün olumlu etkilerinin 28 gün sonra ortaya çıktığını belirtmiştir. Rao vd. (2016b), çimento yerine belirli bir miktarda uçucu kül ikame edilen karışımlarda uçucu kül içeriğinin artmasıyla basınç dayanımının düştüğünü saptamışlardır. Bunun nedeni, 90 günlük kürlenmeden sonra bile uçucu külün dayanıma çimentodan daha az katkıda bulunmasına bağlanmıştır.

2.4.2. Elastisite modülü

SSB karışımlarının elastisite modülüne ilişkin bilgiler nispeten sınırlıdır. Bununla birlikte, mevcut veriler, SSB'lerin elastisite modülünün geleneksel betonunkine eşit veya biraz daha yüksek olduğunu göstermektedir (Tayabji vd., 1995). SSB karışımların elastik özelliklerini etkileyen en önemli faktörler, dayanım, hamur hacmi, yaş ve agrega tipi olduğu bilinmektedir. Genel olarak, belirli bir agrega tipi için, elastisite modülü dayanımın bir fonksiyonudur (ACI 207.5R-99, 2004). Fakhri ve Amosoltani (2017) tarafından yapılan çalışmada SSB karışımlarında geri kazanılmış asfalt kaplama ve kauçuk eklenmesinin SSB'nin rijitliğini ve elastik modülünü azalttığı, ancak tokluğunu arttırdığı rapor edilmiştir. Yapılan bir çalışmada cüruf içeren SSB karışımlarda, istenilen sıkıştırmayı elde etmek için daha fazla miktarda su gerektiğinden, elastisite modülünde düşüş olduğu tespit edilmiştir (Albuquerque vd., 2011).

2.4.3. Hacim değişimi

Beton karışımlarında kuruma-büzülme öncelikle betonun su içeriğine ve daha az ölçüde agreganın kısıtlama derecesine bağlıdır. SSB'lerin kuruma büzülmesi, karışımlardaki su miktarının düşük olması nedeniyle, normal kütle betonunkine benzer veya daha azdır (Tayabji vd., 1995).

Won vd. (2009), farklı oranlarda uçucu kül kullanılarak üretilen SSB'lerin kuruma büzülme özelliklerini araştırmışlardır. Sonuç olarak, karışımlarda uçucu kül kullanımının artmasıyla SSB'lerin kuruma büzülme miktarının azaldığı belirlenmiştir.

Saluja vd. (2019) tarafından agrega tipindeki değişimi ve yüksek fırın cürufunun SSB karışımlarının kuruma büzülme özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Test sonuçlarına göre SSB karışımındaki çimento ve su miktarı konvansiyonel betona göre daha az olduğu için SSB karışımlarına göre yaklaşık %50 daha az kuruma-büzülmesi tespit edilmiştir. Bununla birlikte, SSB karışımlarında cüruf ve çimento ikame oranlarının artmasıyla kuruma rötresi artmıştır.

2.4.4. Katmanlar arası bağ dayanımı

Yüzey özellikleri ve konforu SSB kaplamaların olumsuz yönlerinden sayılmaktadır. Bu olumsuz özelliğinden dolayı uzun zamandan beri SSB kaplamalar, düşük hız ve düşük trafikli yollarda kullanılmaktadır. Bu olumsuzlukları gidermek adına SSB kaplamaların üstüne asfalt tabakası serilmiştir. Ancak, katmanlar arası derzler dayanıklılık sorunlarına yol açmıştır (Mohammed vd., 2019). Katmanlar arası bağ dayanımlarındaki olumsuzluklar özellikle kış aylarında oluşan derzlerden suyun içiriye sızıp donma-çözülmeden dolayı oluşan hasarlara neden olabilmektedir.

SSB yapılarının katmanları arasındaki bağ kuvveti önemli bir mühendislik özelliğidir. Bağ kuvveti, SSB kaplamaların tek tabakalı, kısmen bağlanmış veya bağlanmamış bir kaplama olarak hareket edip etmeyeceğini belirler. Kısmen bağlanmış veya bağlanmamış kaplamaların yük taşıma kapasitesi, tek tabaka olarak işlev gören kaplamalardan önemli ölçüde daha düşük olduğu bilinmektedir (Tayabji vd., 1995).

Barajlarda SSB'lerin kullanılması genellikle katmanlar halinde uygulamaktadır. Söz konusu bu uygulama sırasında geçen zamanla SSB'nin mekanik ve durabilite performansları etkilenmektedir. Özellikle bu uygulamalardaki temel problem silindirle sıkıştırılmış tabakaların birbirlerine kenetlenmemesidir. Bu konuda yapılan araştırmalar ile SSB'lerde katmanların kenetlenme sorunları ve katmanlar arasındaki soğuk derz etkileri genellikle baraj yapılarının en zayıf noktaları olduğu beyan edilmiştir (Banthia vd., 1992; Kokubu vd., Zhang vd., 1996; Junrui vd., 2005). Bu bağlamda katmanların bu

olumsuz özelliklerinden dolayı SSB'ler düşük kesme dayanımına sahip ve yüksek geçirgenlik özelliği göstermektedir. Böylece barajlarda sızıntı problemleri ortaya çıkmakta ve barajın yapısal dayanıklılığını zayıflatmaktadır (Duan ve Lai, 1995; Rongmei ve Wei, 2007). SSB ağırlık barajlarında ara katmanların baraj güvenliği için kritik bir faktör olduğu beyan edilmiştir (Sha vd., 2016). Bu nedenle SSB'lerde katmanlar arası ara yüzey özelliğini incelemek ve iyileştirmek gerekmektedir.

Li vd. (2015) üç katmanlı ve iki katmanlı SSB barajının sızıntı alanını analiz etmiş ve üç katmanlı yüzeye sahip SSB iki katmanlı yüzeye göre nispeten zayıf bir geçirimsizlik gösterdiğini tespit etmiştir.

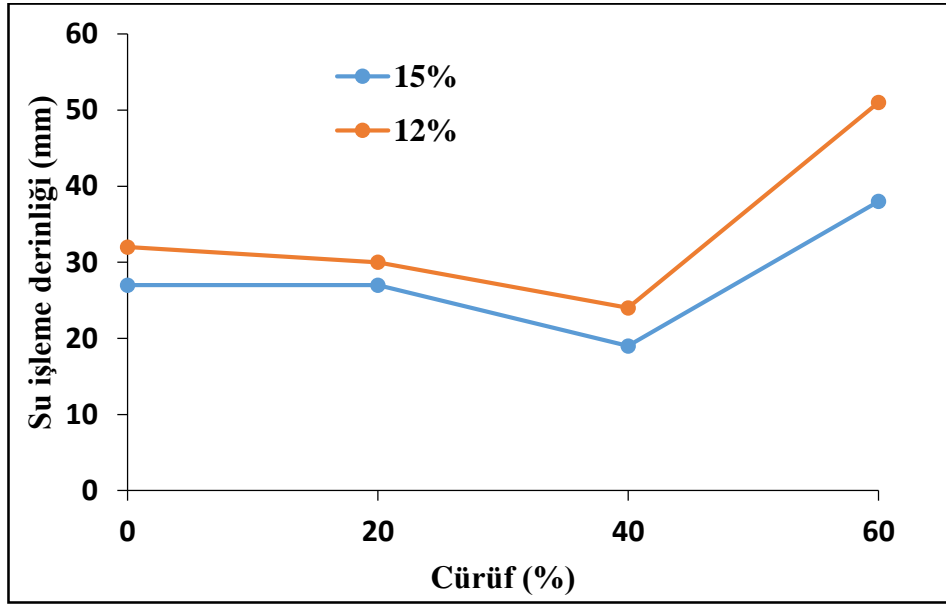
Aguiar vd. (2002) SSB karışımlarda bağlayıcı malzeme miktarının ve uçucu kül oranının değişiminin ve betonun olgunluğunun basınç, çekme ve kesme dayanımı üzerindeki etkisini analiz etmişlerdir. Ayrıca katmanlar arasındaki yerleştirme gecikmesiyle oluşan soğuk derzin SSB'nin çekme ve kesme dayanımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre SSB karışımlardaki uçucu kül miktarının artmasıyla 28, 90 ve 365 günlük basınç dayanımlarının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca soğuk derz etkilerinden dolayı çekme dayanımında meydana gelen azalmaların kesme dayanımından daha önemli olduğunu bildirmişlerdir.

Qian ve Xu (2018) geleneksel betonların dökümü sırasında zamanla katmanlar arasındaki ara yüzey özelliklerinin değişiminin betonun mekanik ve geçirgenlik özellikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bu amaçla katmanları 0, 3, 6, 9, 12, 15 saat aralıklarla dökülmüş iki katmanlı beton karışımlar üzerinde yarmada-çekme, ultrases geçiş hızı, hızlı klor-iyon geçirgenliği, elektrik geçirgenliği ve su geçirgenlik deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deney sonuçlarına göre katmanlar arası zaman aralığının artmasıyla beton numunelerinin daha düşük yarmada-çekme dayanımı ve daha yüksek geçirgenlik gösterdiğini beyan etmişlerdir.

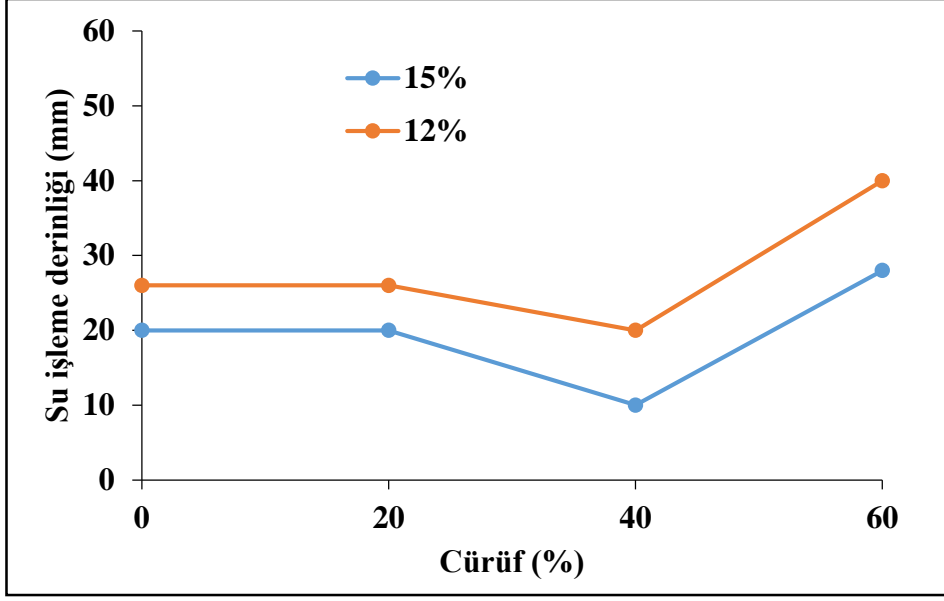
2.4.5. Geçirgenlik

SSB'nin geçirgenliği, sıkıştırılmış beton kütlesindeki boşluklara ve matrisinin gözenekliliğine bağlı olarak büyük ölçüde değişmektedir. Bu boşluklar ve gözenekler, SSB'nin karışım oranlarına, yerleştirme yöntemine ve sıkıştırma derecesine bağlıdır. Genellikle tek parça dökülen ve yeterli miktarda hamur içeren SSB'nin geçirgenlik performansı konvansiyonel betona benzerlik göstermektedir (ACI 207.5R-99, 2004).

Aghaeipour ve Madhkhan (2017) tarafından yapılan bir çalışmada yüksek fırın cürufunun SSB yolların durabilite üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çimento yerine %20 ve %40 oranında yüksek fırın cürufu ikame edildiğinde karışımların geçirimliliği azalmıştır. Ancak, söz konusu oranın %60'a kadar yükselmesi SSB karışımların geçirgenlik performansını olumsuz yönde etkilediği tespit edilmiştir. Ayrıca, bağlayıcı malzemelerin hacimce %12'den %15'e kadar yükselmesi SSB'lerin geçirgenliğini azaltmıştır. Şekil 2.9 ile 2.10'da yüksek fırın cürufu oranı ve su işleme derinliği ilişkisi gösterilmiştir.

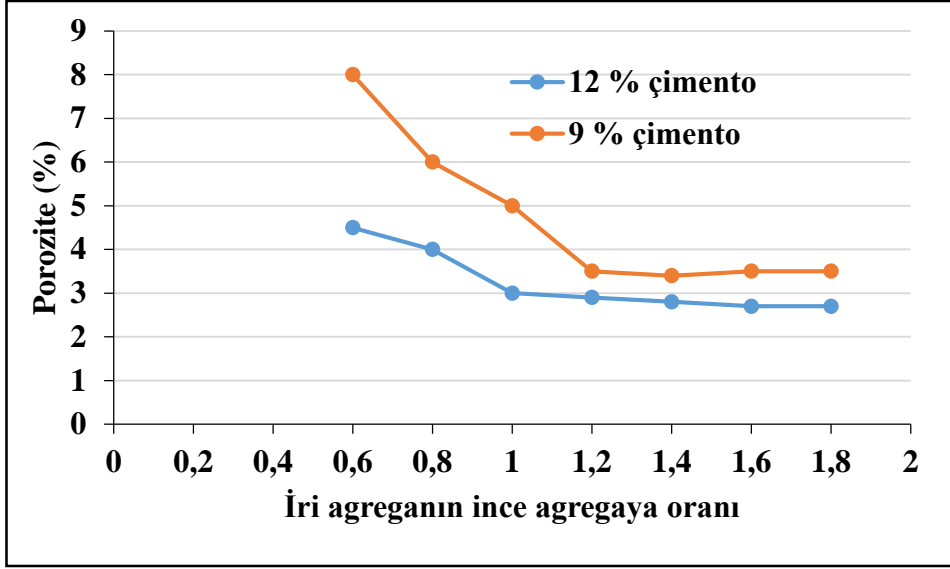


Şekil 2.9. 90 gün kür uygulanmış numunelerde cüruf miktarına göre su işleme derinliği (Aghaeipour ve Madhkhan, 2017)



Şekil 2.10. 150 günlük numunelerde cüruf miktarına göre su işleme derinliği (Aghaeipour ve Madhkan, 2017).

Hashemi vd. (2018) tarafından yapılan bir çalışmada, SSB karışımlarında iri agreganın ince agregaya oranının (C/F) ve çimento içeriğinin değişiminin SSB karışımlarının boşluk yapısına etkisi araştırılmıştır. SSB karışımlarında tüm katı malzemelerin %9'u (204 kg/m^3) ve %12'si (268 kg/m^3) oranlarında farklı miktarlarda çimento kullanılmıştır. Çalışmada Vebe ve porozite deneyleri yapılmıştır. Sonuçlara göre, C/F oranının 0.6'dan 1.8'e yükselmesi Vebe zamanını 3 kat artırmıştır. Çimento miktarının %9'dan %12'ye yükselmesi ise Vebe zamanını %12 mertebelerinde azaltmıştır. C/F oranının 0.6'dan 1.2'ye yükselmesi SSB porozitesini önemli ölçüde azaltmıştır. SSB karışımlarda bulunan C/F oranı ve porozite ilişkisi Şekil 2.11'de gösterilmiştir.



Şekil 2.11. C/F oranı ve porozite ilişkisi (Hashemi vd., 2018).

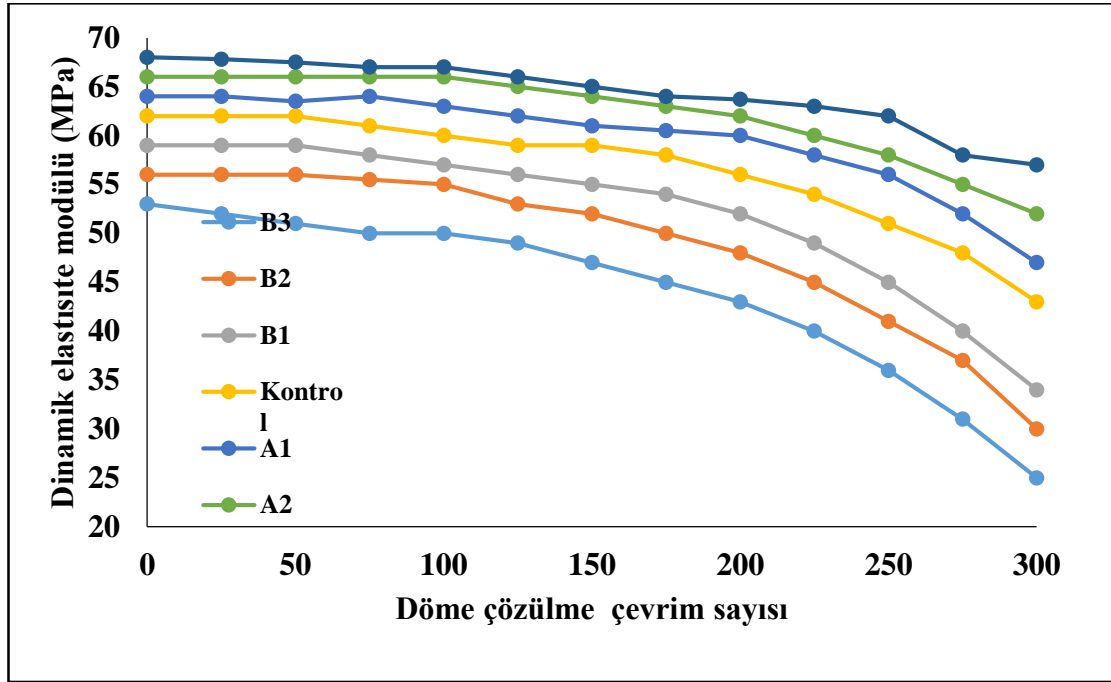
2.4.6. Aşınma

Betonun basınç dayanımı ve agrega kalitesi, beton kaplamaların aşınma özelliklerini etkileyen en önemli parametreler arasındadır. (ACI 207.5R-99, 2004). Won vd. (2009), uçucu kül kullanılarak üretilen SSB'lerin aşınma performansını araştırdılar. Bu amaçla kontrol karışımına ek olarak çimento yerine ağırlıkça yüzde 20, 30, 40 ve 50 oranında uçucu kül kullanılmıştır. Sonuç olarak, numunelerin aşınma direncinin zamanla arttığı ve karışımlar arasında en yüksek aşınma direncine %30 uçucu kül içeren SSB karışımının sahip olduğu bildirilmiştir.

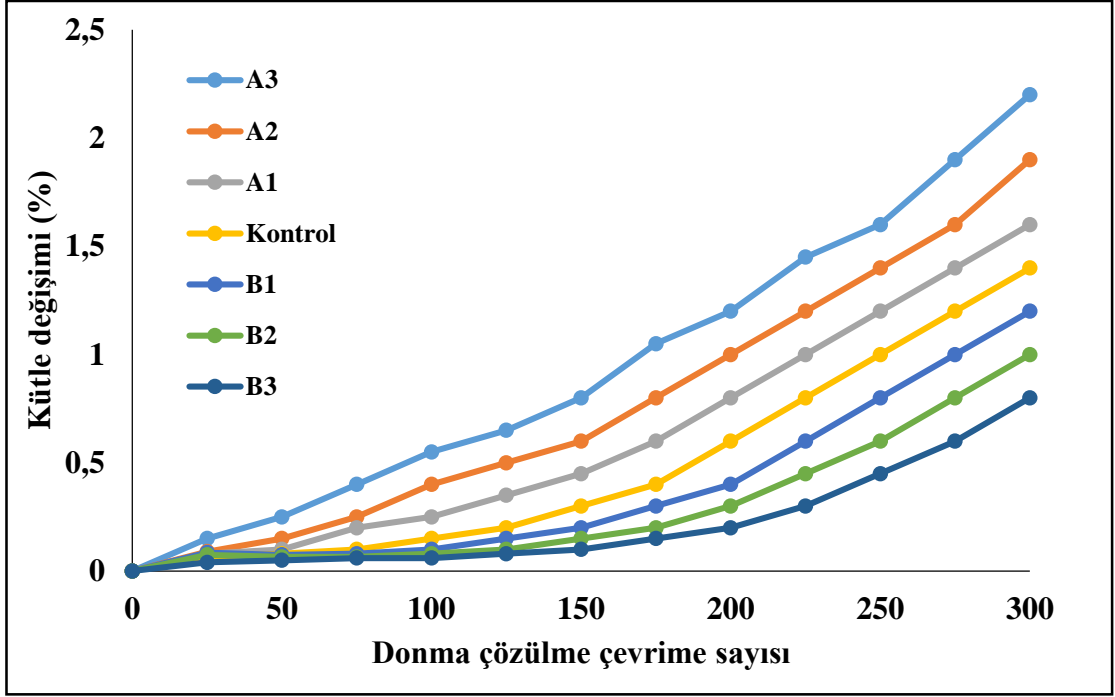
2.4.7. Donma ve çözülme

SSB kaplamalarının donma-çözülme koşullarındaki dayanıklılığı, SSB'nin ilk kez 1976'da Kanada'da kullanılmasından sonra bazı endişelere neden olduğu bilinmektedir (Tayabji vd., 1995). Çalışmalar, hava sürükleyici katkı maddelerinin silindirle sıkıştırılmış betonun donma-çözülme direnci üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Hazaree, 2007).

Mardani-Aghabaglou vd. (2013) tarafından yapılan bir çalışmada çimento yerine belirli oranlarda uçucu kül ikame edildiğinde, SSB'lerin taze hal özelliklerinin ve donma-çözölmeye bağı kütöe kaybının kontrol karışımına göre arttığı bildirilmiştir. Ancak, söz konusu durum agrega yerine belirli oranlarda uçucu kül ikame edildiğinde ise azalmıştır. Şekil 2.12 ile 2.13'te SSB karışımlarının donma-çözölmeye çevrimlerinde ağırlık kaybı ve dinamik elastisite modülü değışimi yüzdesi gösterilmiştir.



Şekil 2.12. SSB'de donma-çözölmeye çevrim sayısı- dinamik elastisite modülü ilişkisi (Mardani-Aghabaglou vd., 2013)



Şekil 2.13. Donma-çözülme çevrimleri sırasında SSB karışımlarının ağırlık değişimi (Mardani-Aghabaglou vd., 2013)

SSB kaplamaların soğuk bölgeler için uygun bir yapı malzemesi olduğu yapılan araştırmalar sonucunda benimsenmiştir (Cortez ve Eaton, 1990). SSB'lerde hava sürükleyici katkıların kullanımı karışımların donma-çözülme çevriminde tuz etkisinden dolayı pullanmaya karşı performansını iyileştirirken dayanım özelliklerini kontrol karışımına göre olumsuz etkilemiştir (Ramezani pour vd., 2017).

Pektaş (2015) tarafından yapılan bir çalışmada uçucu kül (UK) ve granüle yüksek fırın cürufun (YFC) kullanılmasının SSB kapmaların durabilite özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla kontrol karışımına ek olarak çimento yerine %10, 20 ve 30 uçucu kül ve cüruf ikame edilerek karışımlar hazırlanmıştır. Çalışmada çimento dozajı 350 kg ve maksimum agrega tane boyutu 22 mm olarak seçilmiştir. Tüm karışımlar zemin yaklaşımı olan maksimum yoğunluk yöntemiyle tasarlanmıştır. Çalışmada üretilen numuneler üzerinde basınç, yarmada-çekme, eğilme Ve-Be, ultrases geçiş hızı, aşınma ve donma-çözülme deneyleri yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- SSB karışımlarında UK ve YFC kullanımı işlenebilirliği artırmıştır.

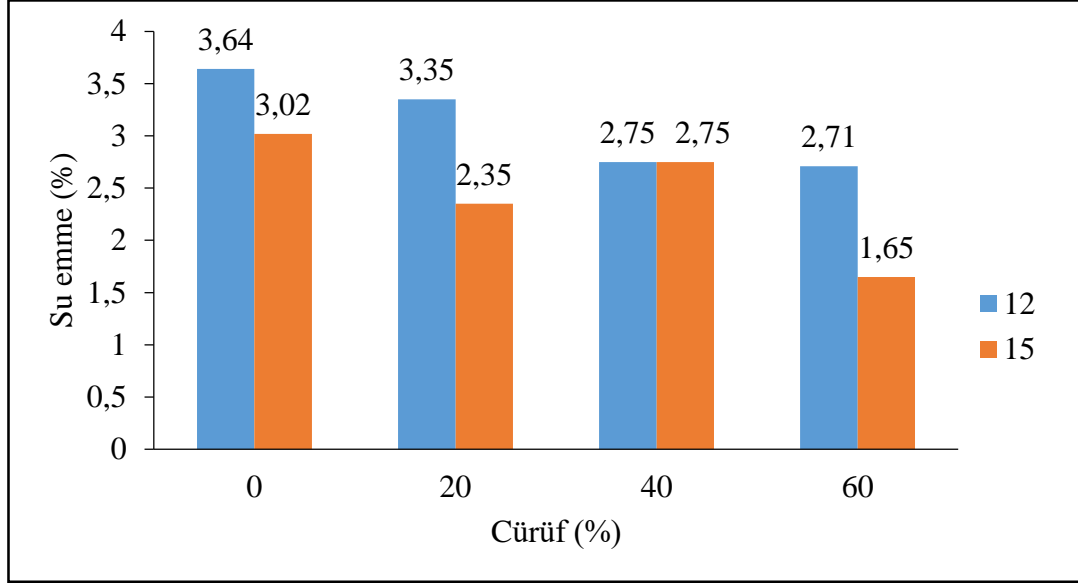
- Karışımlarda %10UK ikame edildiğinde basınç dayanımının arttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte YFC içeren tüm karışımların basınç dayanımı kontrol karışımına göre düşük çıktığı gözlemlenmiştir. Benzer davranış yarmada-çekme dayanımında da saptanmıştır.
- %20 ve %30 UK ikameli karışımlar hacim ve ağırlık bakımından en düşük aşınma kayıplarına maruz kaldığı tespit edilmiştir. YFC içeren karışımlarda ise en az aşınma kaybı %10 YFC ikameli karışımlarda görülmüştür.
- Donma-Çözülme deneyi sonuçlarına göre en fazla dayanım kaybı mineral katkı içermeyen karışımlarda gerçekleşmiş olup YFC ikameli karışımların donma-çözülme direnci kontrol karışımlarına göre yakalısık iki kat daha fazla olduğu görülmüştür. Söz konusu davranışın YFC içeren karışımların gözenekli olmasından kaynaklanığı düşünülmektedir.

2.4.8. Su Emme

Su emme oranları SSB karışımı özelliklerini etkileyen önemli faktörlerden biridir. Su emme oranı yüksek olan SSB karışımlarda dayanım ve dayanıklılık sorunları ortaya çıkmaktadır. Bilindiği gibi SSB'ler kullanım gereği itibarıyla genellikle açık alanda ve suya teması daha çok olan bir betondur. Dolayısıyla su emme oranının düşük olması istenmektedir. Bu amaçla yapılan çalışmalarda SSB karışımlarının su emme oranını düşürmek için mineral katkıları gibi malzemeler kullanılmaktadır. SSB'nin hamur fazı betonun boşluk ve boşluk yapısını etkilemektedir (Yerramala vd., 2011; Azizmohammadi vd., 2021). Baraj yapılarında SSB'ler genellikle farklı zaman aralıklarıyla katmanlar halinde dökülmektedir. Bu yüzden SSB'nin geçirgenlik özellikleri normal betonunkinden çok farklı olmaktadır. Bu şekilde döküm yapıldığı zaman SSB'de katmanlar arasında entegrasyon problemi olabilir (Qian vd., 2018).

Genel olarak, SSB karışımlarında çimentonun bir kısmı yerine cüruf kullanılması, karışımların su emme kapasitesinde bir azalmaya neden olmuş ve çimentolu malzemelerin% 12'den% 15'e yükselmesiyle su emiliminde daha da önemli düşüşler meydana gelmiştir. İncelenen tüm karışımlarda su emme oranının %4'ün altında olduğu tespit edilmiştir. İki farklı oranda çimentolu malzeme içeren karışımların cüruf miktarının

artışıyla su emme oranının ilişkisi Şekil 2.14'te gösterilmiştir (Aghaeipour ve Madhkhan 2017).



Şekil 2.14. %12 ve %15 oranında bağlayıcı malzeme içeren numunelerin su emme oranları (Aghaeipour ve Madhkhan, 2017)

Fakhri ve Saberi (2016), geri kazanılan lastik parçacıklarının kumla değiştirilmesiyle karışımların su emiliminin azaldığını ve bu azalmanın silis dumanı içeren karışımlarda daha da belirginleştiğini göstermiştir. Yerramalli ve Babu (2011), % 85 uçucu kül içeren SSB'lerde maksimum su emiliminin % 2,11 olduğunu bulmuşlardır.

2.4.9. Yoğunluk

Agreganın yoğunluğu ve karışımın sıkıştırma derecesi SSB'lerin yoğunluğunu etkileyen ana faktörlerdendir. Agreganın özellikleri aynı olan hava sürüklenmemiş SSB karışımlarının yoğunluğu, hava sürüklenmiş geleneksel betona göre biraz daha yüksek olduğu görülmüştür (Army Corps of Engineers, 2000). SSB'lerin yoğunluk deneyi Şekil 2.19'da gösterilmiştir. Modifiye Proctor (M-P) metoduyla belirlenen optimum su içeriğine sahip SSB karışımlarının hava içeriği, geleneksel betona göre yaklaşık % 3 daha yüksek olduğu araştırmacılar tarafından tespit edilmiştir (Lin vd., 2013).



Şekil 2.15. Yoğunluk kontrol cihazı (Harrington vd., 2010)

Bazı araştırmacılar, Vebe süresinin tespitini karışımların optimum su içeriğinin belirlenmesinde önerilmiştir. SSB karışımlarında 47-65 saniye arasında olan Vebe süresinin uygun olduğu ileri sürülmüştür (Chhorn vd., 2017). Kuru yoğunluğun ve Vebe süresinin SSB karışımların tasarımı için çok önemli olduğu ve bu özelliklerin agrega tane dağılımına ve su muhtevasına bağlı olduğu saptanmıştır (Chhorn vd., 2017).

2.4.10. Yüzey özellikleri

SSB kaplamalarının en önemli sorunlarından biri döküm sonrası yüzeyinin geleneksel beton veya asfalt kaplamalara göre düşük kalitesidir. Pürüzlü yüzey, SSB kaplamaların dezavajlarından biri olarak sayılmaktadır (Delatte vd., 2003). Söz konusu sorunların esas nedenlerinden, agregaların boyutu, türü ve gradasyonun yanı sıra bağlayıcı malzemenin az olması düşünülmektedir. Daha pürüzsüz bir SSB kaplaması yüzeyi elde etmek için agreganın en büyük tane çapı daha küçük seçilmelidir (Piggott, 1999).

2.5. SSB'lerde Kürleme

Bilindiği gibi betonun özelliklerini etkileyen en önemli faktörlerden biride dökümden sonraki uygulanan kür koşullarıdır. Normal betonlarda olduğu gibi kür koşulları SSB karışımlarının fiziksel, mekanik ve durabilite özelliklerini de etkilemektedir. SSB karışımlarda normal betona benzer kür uygulamaları bulunmaktadır. Keleş, Ö.F. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada, SSB yollarda kür türü ve uygulama zamanı araştırılmıştır. Çalışmada 350 kg çimento kullanılmış olup ve karışımların optimum su muhtevası modifiye proktor deneyi kullanılarak belirlenmiştir. SSB karışımı sıkıştırıldıktan hemen sonra 0, 15, 30, 60 dakika olmak üzere dört farklı zaman aralığında kimyasal kür, çuval bezi, membran ve sudan oluşan dört farklı kür uygulaması 7 gün süresince uygulanmıştır. Çalışmada numunler üzerinde basınç, eğilme, ultrases geçiş hızı ve beton çekici deneyleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Basınç dayanımı değerlerine göre su ile kürleme en iyi kürleme yöntemi olarak tespit edilmiştir. Su kürünü ise membran, çuval bezi ve kimyasal kür takip etmiştir. Kürlenmemiş numunelerde en kötü basınç dayanımı değerleri görülmüştür.
- Basınç dayanımına göre kür uygulama zamanı olarak su kürü için dökümden 60 dakika sonraki kürleme süresinin en iyi sonucu verdiği belirlenmiştir. Ancak, diğer kürleme türlerinde dökümden hemen sonraki kürleme ile 60 dakika sonraki küleme açısından kayda değer bir farkın olmadığı gözlemlenmiştir.
- SSB yollarının trafiğe açılma süresini belirlemek amacıyla en uygun kürleme yöntemine (su kürleme) göre numuneler hazırlanmıştır. Sonuçlara göre, SSB yollarının dökümden 4 saat sonra hafif trafiğe açılması ve 7 saat sonra ise karma trafiğe açılabilirliği tespit edilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde deneysel çalışma kapsamında kullanılan malzemeler, karışımların optimum su muhtevası bulma yöntemi, katmanlar arası iyileştirme metotları ve deney yöntemleri hakkında bilgi verilmiştir.

3.1. Malzemeler

3.1.1. Çimento

Çalışmada TS EN 197-1 standardına uygun CEM I 42.5R tipi çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun özgül ağırlığı 3.15 olup Bursa Çimento Fabrikasında üretilmiştir. Kullanılan çimentonun, üretici firması tarafından verilen kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.1’de, mekanik ve fiziksel özellikleri ise Çizelge 3.2’de verilmiştir. Kullanılan çimento, fabrikadan torbalar halinde temin edilmiş ve laboratuvar ortamında ağzı kapalı plastik bidonlarda nem almayacak şekilde deneyler süresince muhafaza edilmiştir.

Çizelge 3.1. Çimentonun kimyasal bileşimi

İçerik	Yüzde
SiO ₂	18,81
Al ₂ O ₃	5,71
Fe ₂ O ₃	3,09
CaO	62,70
MgO	1,16
SO ₃	2,39
Na ₂ O+0.658 K ₂ O	0,92
Cl ⁻	0,01
Çözünmeyen kalıntı	0,32
Kızdırma kaybı	3,20
Serbest CaO	1,26

Çizelge 3.2. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel özellikler		CEM I 42.5R
Özgül ağırlık		3,15
Mekanik özellikleri		
Basınç dayanımı (MPa)	1-günlük	14,7
	2-günlük	26,8
	7-günlük	49,8
	28-günlük	58,5
Özgül yüzey (Blaine, cm ² /g)		3530
0.045 mm elekte kalan(%)		7,60

3.1.2.Uçucu kül

Bursa Beton firması tarafından temin edilen uçucu külün özgül ağırlığı 2.31, Blaine özgül yüzeyi ise 4300 cm²/g dir. Uçucu külün kimyasal ve fiziksel özellikleri sırasıyla Çizelge 3.3 ve 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Uçucu külün kimyasal bileşimi

İçerik	Yüzde
SiO ₂	49,71
Al ₂ O ₃	19,01
Fe ₂ O ₃	8,87
CaO	10,88
MgO	5,95
SO ₃	2,52**
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃	77,58
Na ₂ O+0.658 K ₂ O	1,50*
Serbest CaO	0,37**

ASTM C 618 standartlarına göre, uçucu külün, SiO₂+ Al₂O₃+ Fe₂O₃≥ %50, Na₂O≤ %1.5 ve SO₃≤ %5 olmalıdır. **TS EN 450'ye göre, uçucu külün SO₃≤%3 ve serbest CaO≤%1 olmalıdır.

Çizelge 3.4. Uçucu külün fiziksel ve mekanik özellikleri

Fiziksel özellikler		Uçucu kül
Özgül ağırlık		2,31
Mekanik özellikler		
Puzolanik aktivite indeksi (%)	7-günlük	81
	28-günlük*	87
İncelik		
Özgül yüzey (Blaine, cm ² /g)		4300
0,045 mm elekte kalan (%)		10

*TS EN 450'ye göre, uçucu külün 28 günlük dayanım aktivite indeksi≥ %75 olmalıdır.

3.1.3. Agregas

Deneysel çalışmada 0-5, 5-12 ve 12-22 mm tane boyutunda olan kırma kireçtaşı agregası kullanılmıştır. Agreganın özgül ağırlığı ve su emme kapasitesi TS EN 1097-6 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Agregaların doygun yüzey kuru (DYK) özgül ağırlığı ise sırasıyla 2.68, 2.68 ve 2.69 olarak belirlenmiştir.

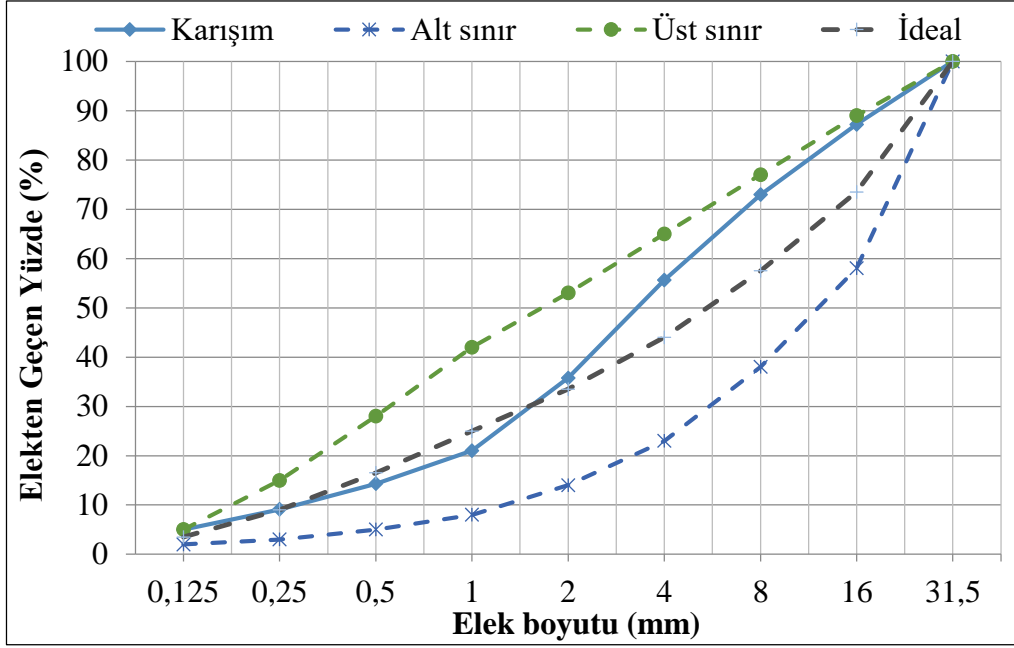
SSB karışımlarında kullanılan agregas oranları ağırlıkça %60 0-5 mm, %20 5-12 mm ve %20 12-22 mm olarak belirlenmiştir. Agreganın fiziksel özelliği ve elek analizi sonucu sırasıyla Çizelge 3.5 ve 3.6'da karışımın gradasyon eğrisi ve TS 802 standart sınırları ise Şekil 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.5. Beton karışımlarında kullanılan agregaların fiziksel özellikleri

Tip	Boyut (mm)	DYK özgül ağırlık	Gevşek birim hacim ağırlık (kg/m ³)	Su emme kapasitesi (%)
Kırma Kireçtaşı	0-5	2,68	1655	1,64
	5-12	2,68	1441	0,51
	12-22	2,69	1405	0,40

Çizelge 3.6. Karışımlarda kullanılan agregaların elek analizi

Elek göz açıklığı (mm)	Elekten geçen agregas miktarı (%)		
	0-5 mm	5-12 mm	12-22 mm
31,5	100	100	100
16	100	100	36
8	100	64,7	0,1
4	91,6	3,5	0
2	59,5	0,26	0
1	35,1	0	0
0,5	23,9	0	0
0,25	15,2	0	0
0,125	8,3	0	0



Şekil 3.1. Deneysel gradasyon eğrisi

3.1.4. Su

Deneysel Bursa şebeke suyu karışım ve bakım suyu olarak kullanılmıştır.

3.2. Karışımların Optimum Su Muhtevasının Belirlenmesi

Deneysel çalışmada kontrol karışımının çimento dozajı 250 kg/m^3 olup, birinci seride (A serisi) çimento yerine ağırlıkça %20, %40 ve %60 oranlarında uçucu kül kullanılmıştır. Bu karışımlar sırasıyla A1, A2 ve A3 olarak isimlendirilmiştir. İkinci seride (B serisi) ise agrega yerine ek bağlayıcı olarak çimento ağırlığının %20'si, %40'ı ve %60'ı oranlarında uçucu kül ilave edilmiştir. Bu karışımlar sırasıyla B1, B2 ve B3 olarak isimlendirilmiştir. SSB karışımların optimum su muhtevasını belirlemek amacıyla su/bağlayıcı oranı 0.30-0.50 arasında olan farklı SSB karışımları hazırlanmıştır. Karışımlar için hazırlanan malzemeler Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Karışımlar Şekil 3.3'te gösterilen pan tipi mikserde hazırlanmıştır.



Şekil 3.2. SSB karışımı için Hazırlanan malzemeler

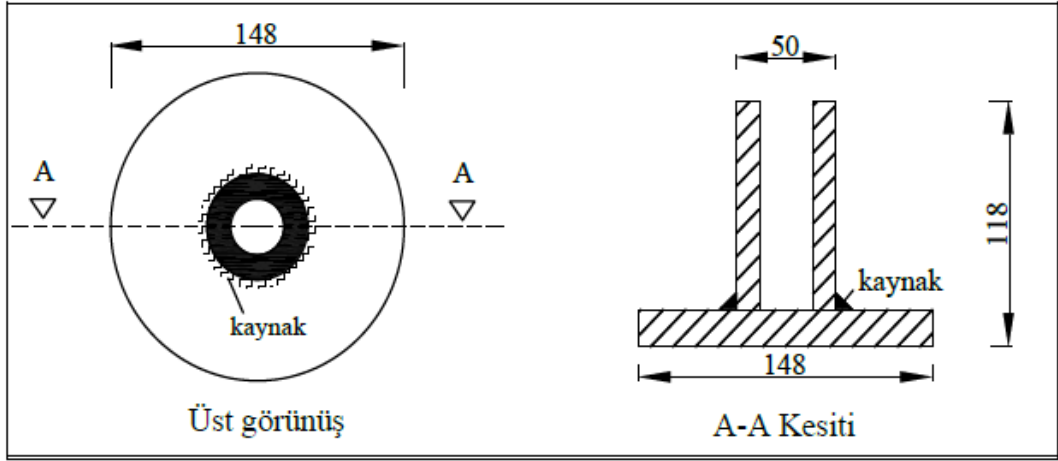


Şekil 3.3. SSB karışımı hazırlamasında kullanılan Pan tipi mikser

Hazırlanan her karışım 150×300 mm silindir kalıplara üç ayrı tabaka halinde yerleştirilmiştir. Her tabaka ASTM C1435 standardına uygun bir şekilde kalıbın iç yüzeyi ile çelik bastırma plakası arasında çimento hamuru görülene kadar en çok 20 saniye sıkıştırılmıştır. En üst tabakada sıkıştırma esnasında, sıkışmış malzeme ile silindir kalıp arasında kot farkının oluşmasını önlemek için Şekil 3.4'te gösterilen ilave halka kullanılmış, her tabakanın sıkıştırılması esnasında titreşimli tokmağın uyguladığı yükün homojen dağılabilmesi ve pürüzsüz bir yüzey elde edilebilmesi için Şekil 3.5'te gösterilen çelik bastırma plakası kullanılmıştır.



Şekil 3.4. İlave halka ve çelik bastırma plakası



Şekil 3.5. Çelik bastırma plakasına ait kesit ve görünüş (Ölçüler mm cinsindedir)

Optimum su muhtevasının belirlenmesi için standart şekilde sıkıştırılan ve örneklenen 600 g beton numunesi 105°C etüvde değişmez ağırlığa ulaşana dek kurutulup, kuru ağırlığı elde edilmiştir. Şekil 3.6’da etüvde bırakılan 600 g beton numunesi gösterilmiştir.



Şekil 3.6. SSB’nin su muhtevasını belirlemek için alınan numune ve 105 °C sıcaklığındaki etüvde kurutulması

Su muhtevası Denklem 3.1’e göre hesaplanmıştır.

$$w = \frac{m_{ıslak} - m_{kuru}}{m_{kuru}} \times 100 \quad (3.1)$$

Burada,

$m_{\text{ıslak}}$: ıslak beton örneğinin kütlesi (600 g),

m_{kuru} : değişmez kütleye ulaşan beton örneği kütlesi (600 g),

w : su muhtevası (%) dir.

Şekil 3.7’de gösterildiği gibi kalıba sıkıştırılarak yerleştirilen taze betonun ağırlığı ölçülmüştür (m). Numune ağırlığının kalıp hacmine (v) bölünerek ıslak birim hacim ağırlığı elde edilmiştir. Denklem 3.2’ye göre kuru birim hacim ağırlığı hesaplanmıştır.

$$\gamma_{\text{kuru}} = \frac{\frac{m}{v}}{1+w} \quad (3.2)$$

Burada,

γ_{kuru} : numunenin kuru birim hacim ağırlığıdır.



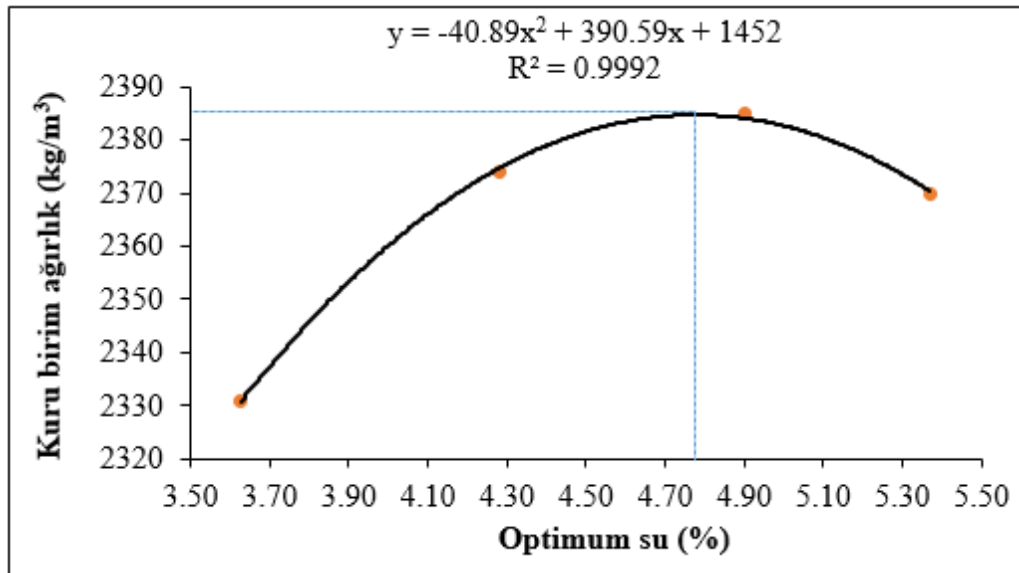
Şekil 3.7. Kalıba sıkıştırılarak yerleştirilen taze betonun ağırlığı

Her karışım için su muhtevası-kuru birim hacim ağırlığı grafikleri çizilmiştir. Eldeki dört noktadan geçen en uygun eğri belirlenerek maksimum kuru birim hacim ağırlığa denk gelen optimum su muhtevası tespit edilmiştir. Karışımın su/bağlayıcı oranı (S/B) bu değere göre hesaplanmıştır.

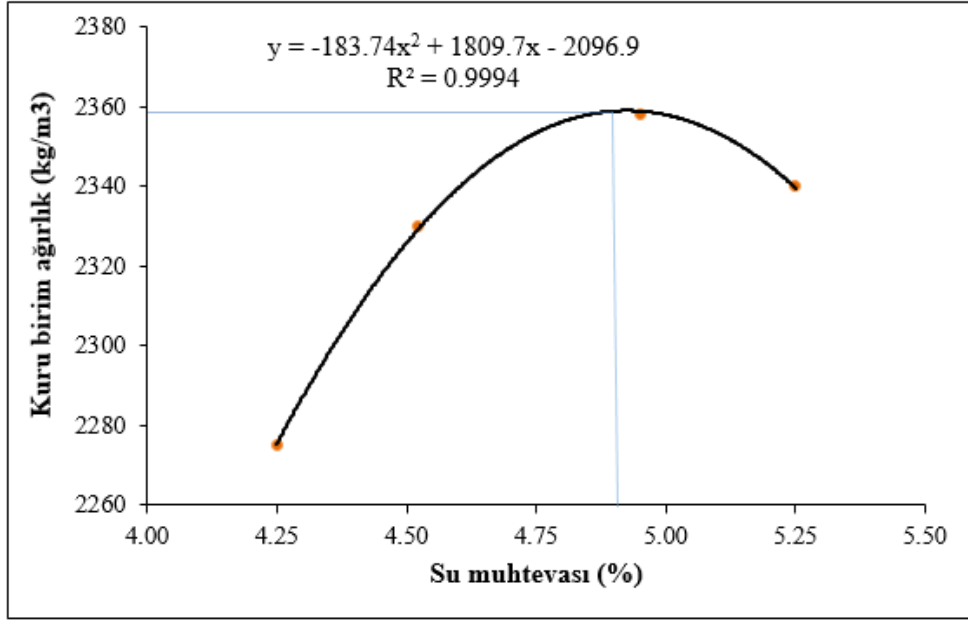
Birinci seri karışımında (Seri A) bağlayıcı miktarı 250 kg/m^3 sabit olacak şekilde sırasıyla çimentonun kütlece %20, 40 ve 60'ı yerine uçucu kül kullanılmıştır. Su/bağlayıcı oranları 0.30, 0.35, 0.40, 0.45, 0,50 ve 0,55 olan bu karışımlarında optimum su muhtevaları yukarıdaki gibi belirtilmiştir.

İkinci seri karışımında (Seri B) çimento miktarı 250 kg/m^3 alınarak sabit olacak şekilde agrega yerine sırasıyla kütlece çimento ağırlığının %20, 40 ve 60'ı oranlarında uçucu kül kullanılmıştır. Benzer su/bağlayıcı oranlarına sahip bu karışımların da aynı şekilde optimum su muhtevaları hesaplanmıştır.

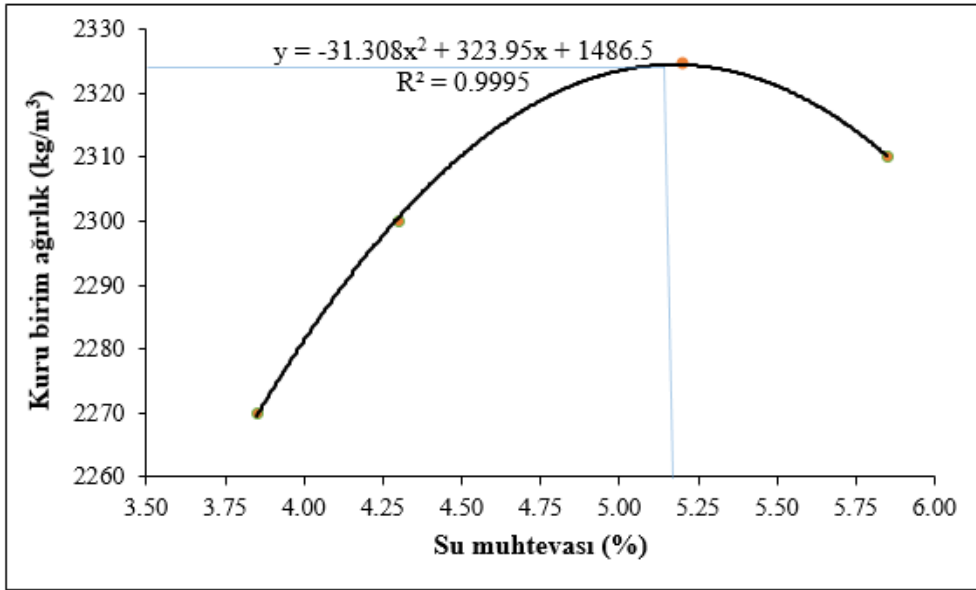
Seri A ve Seri B'de hazırlanan karışımlardan optimum su muhtevasına sahip 7 karışım seçilmiştir. Karışımlara ait olan optimum su muhtevası-kuru birim hacim ağırlık grafikleri Şekil 3.8-3.14'de gösterilmiştir. Her grafikte maksimum kuru birim ağırlığına denk gelen optimum su muhtevası belirlenmiştir. Karışımın su/bağlayıcı oranı bu değere göre hesaplanmıştır. Grafikten elde edilen sonuçlar Çizelge 3.7'de verilmiştir.



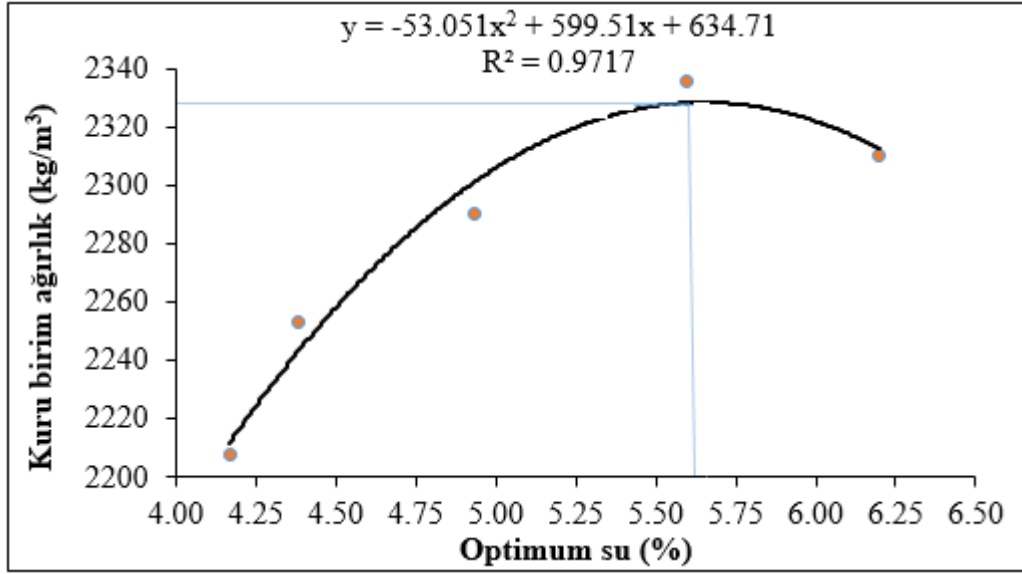
Şekil 3.8. Kontrol (K) karışımına ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim hacim ağırlık ilişkisi



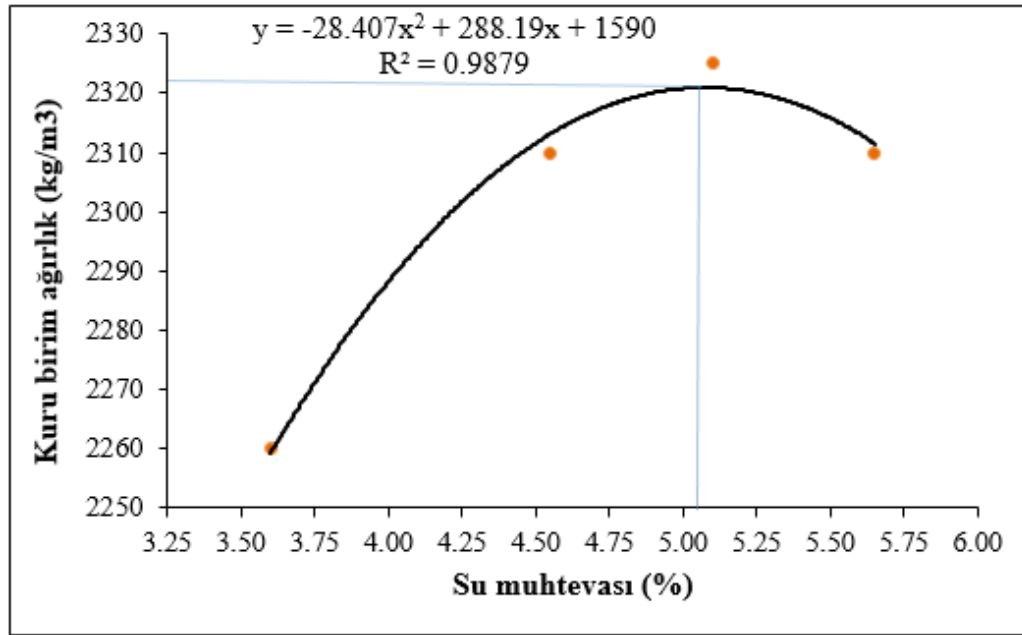
Şekil 3.9. A1 karışıma ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



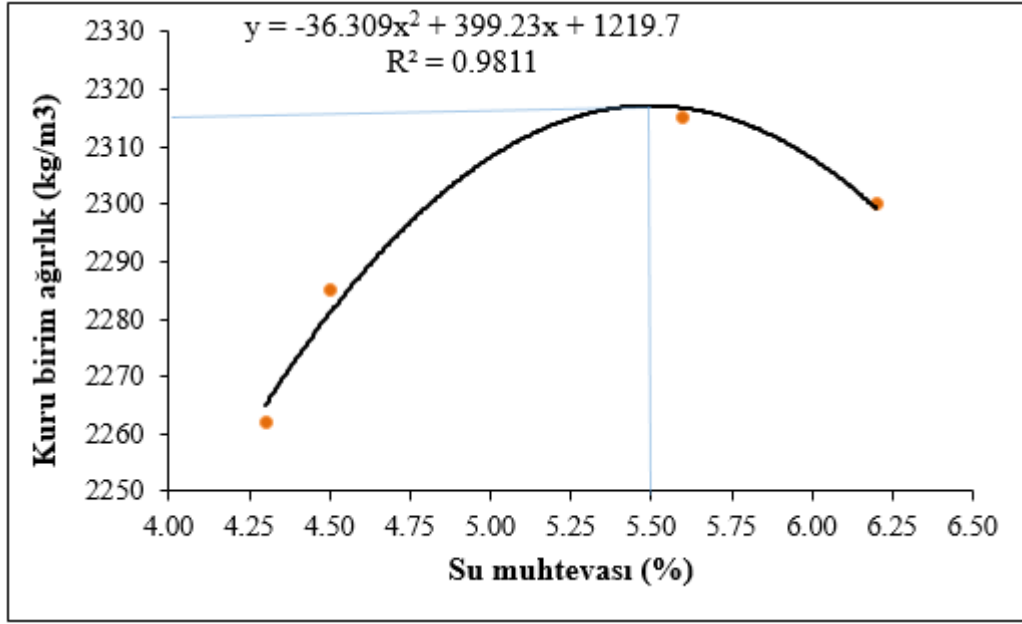
Şekil 3.10. A2 karışıma ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



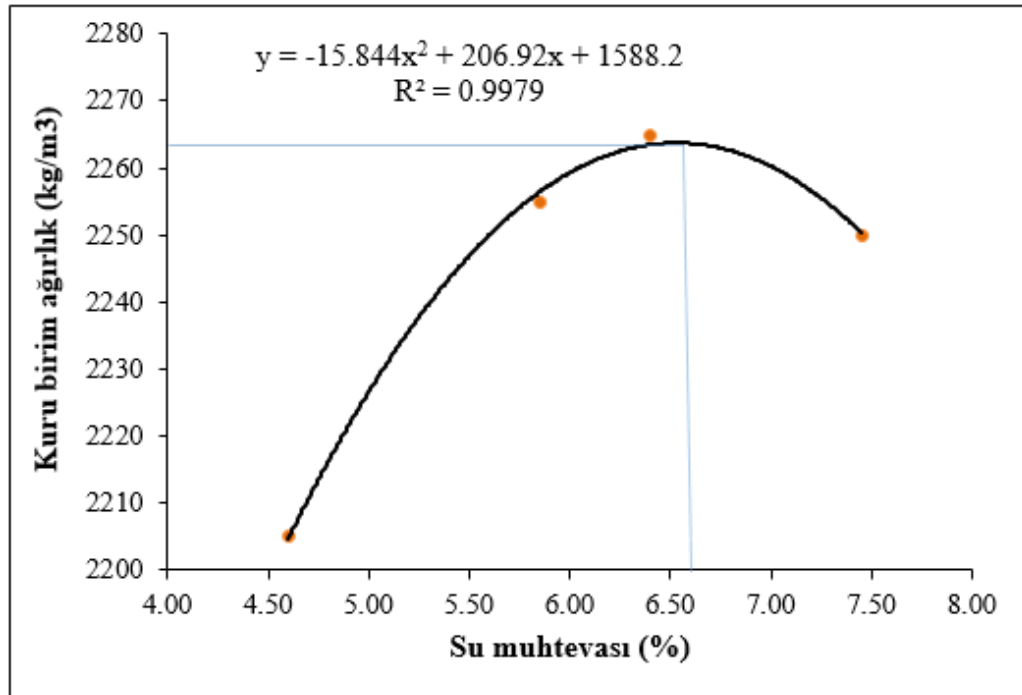
Şekil 3.11. A3 karışıma ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



Şekil 3.12. B1 karışıma ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



Şekil 3.13. B2 karışıma ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi



Şekil 3.14. B3 karışıma ait optimum su muhtevası – maksimum kuru birim ağırlık ilişkisi

Çizelge 3.7. Karışımlara ait olan optimum su muhtevası, maksimum kuru birim ağırlık, karışım su miktarı, bağlayıcı miktarı ve su/ bağlayıcı oranı

Karışım		Optimum su muhtevası (%)	Maksimum kuru birim ağırlık (kg/m ³)	1m ³ SSB'de (kg)		S/B Su/bağlayıcı Oranı
				Net su Miktarı (S)	Bağlayıcı (B)	
K	Kontrol	4,85	2384	120	250	0,48
A1*	80 PÇ + 20 UK	4,90	2358	122	250	0,49
A2	60 PÇ + 40 UK	5,13	2325	122	250	0,49
A3	40 PÇ+ 60 UK	5,60	2330	126	250	0,50
B1	100 PÇ + 20 UK	5,10	2322	133	300	0,44
B2	100 PÇ + 40 UK	5,50	2316	138	350	0,39
B3	100 PÇ + 60 UK	6,65	2264	145	400	0,36

* A serisinde uçucu kül çimento yerine, B serisinde ise agrega yerine kullanılmıştır.

Çalışmada üretilen betonların karışım oranları Çizelge 3.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.8. 1 m³ SSB üretiminde kullanılan malzeme miktarları (kg)

Karışımlar	Çimento	Uçucu Kül	0-5 mm	5-12 mm	12-22 mm	Su	S/B	Birim Hacim Ağırlığı (kg/m ³)
K	250	0	1308	436	438	120	0,48	2500
A1	200	50	1294	431	433	122	0,49	2477
A2	150	100	1281	427	429	123	0,49	2448
A3	100	150	1252	417	419	126	0,50	2460
B1	250	50	1232	411	412	133	0,44	2454
B2	250	100	1158	386	388	138	0,39	2448
B3	250	150	1058	353	354	145	0,36	2412

3.3. Numunelerin Hazırlanması

Bu tez çalışmasında deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere küp, silindir ve kiriş numuneleri hazırlanmıştır.

3.3.1. Küp numunelerin hazırlanması

SSB karışımlarda küp numuneler 150 mm ebatlarında hazırlanmıştır. Söz konusu numuneler iki katmanda yerleştirilip hilti yardımıyla sıkıştırılmıştır. Her tabaka ASTM C1435 standardına uygun olarak sıkıştırılmıştır. Kalıbın iç yüzeyi ile çelik bastırma plakası arasında çimento hamuru görüldüğünde sıkıştırma durdurulmuştur. Tüm

numuneler aynı koşullarda hazırlanmış ve sıkıştırılmıştır. 24 saat kalıpta beklenen numuneler çıkartılıp standarda uygun kür havuzunda bekletilmiştir.

3.3.2. Silindir numunelerin hazırlanması

SSB karışımlarında silindir numuneler 150×300 mm ebatlarında hazırlanmıştır. Silindir kalıplar üç ayrı tabaka halinde hazırlanan karışımlarla doldurulmuştur. Her tabaka ASTM C1435 standardına uygun olarak sıkıştırılmıştır.

3.3.3. Kiriş numunelerin hazırlanması

SSB karışımlarında kiriş numuneler 100×100×600 mm ebatlarında hazırlanmıştır (Şekil 3.15). Kiriş kalıplar iki ayrı tabaka halinde hazırlanan karışımlarla doldurulmuştur. Her tabaka ASTM C1435 standardına uygun olarak sıkıştırılmıştır. Tüm numuneler aynı koşullarda hazırlanmış ve sıkıştırılmıştır. 24 saat süreyle hava akımından uzak bir yerde bekletildikten sonra numuneler kalıptan çıkarılıp kür havuzunda deney gününe kadar bekletilmiştir (Şekil 3.16).



Şekil 3.15. Hazırlanan kiriş numuneleri



Şekil 3.16. Kür havuzunda standart koşullar altında beklenen numuneler

3.4. Katmanlar Arası Oluşan Soğuk Derzin İncelemesi

SSB karışımlarda zaman bağılı oluşan soğuk derz etkilerini araştırmak amacıyla karışımların ilk katmanı yerleştirip sıkıştırıldıktan sonra ikinci katmanı 0, 60, 120 ve 180 dakika gecikmeli olarak yerleştirilmiş ve sıkıştırılmıştır. Katmanlar arasında oluşacak soğuk derz etkilerini engellemek amacıyla üç farklı metot kullanılmıştır.

3.4.1. Priz geciktirici kimyasal katkıların kullanılması

SSB karışımlarında katmanlar arası soğuk derz etkilerini azaltmak amacıyla karışımlarda şeker esaslı priz geciktirici (Pg) kimyasal katkı ilave edilmiştir. SSB karışımlarında kullanılan priz geciktirici kimyasal katkının özellikleri Çizelge 3.9'da verilmiştir. Priz geciktirici katkının en uygun oranını belirlemek için SSB karışımlarında çimento ağırlığının %0,2, 0,3 ve 0,4 oranında priz geciktirici kimyasal katkı kullanılmıştır.

Daha sonraki bölümlerde KP priz geciktirici katkı içeren ve uçucu kül içermeyen karışımları, A1P, A2P ve A3P priz geciktirici kimyasal katkı içeren ve çimento yerine %20, 40, 60 oranlarında uçucu kül ikameli karışımları ifade etmektedir. B1P, B2P ve B3P ise sırasıyla priz geciktirici kimyasal katkı içeren ve agrega yerine çimento ağırlığının %20, 40 ve 60'ı oranlarında uçucu kül ikame edilen karışımları belirtmektedir.

Çizelge 3.9. Priz geciktirici kimyasal katkının özellikleri

Katkı tipi	Yoğunluk (g/cm³)	pH değeri	Katı madde (%)	İçerik
Priz geciktirici	1,340-1,400	5,50-9,50	70,00-74,00	Modifiye edilmiş sakarit

3.4.2. Aderans artırıcı kimyasal yapıştırıcı uygulaması

SSB'lerde katmanlar arası meydana gelen soğuk derz etkilerini azaltmak amacıyla katmanlar arasına aderans artırıcı kimyasal bir yapıştırıcı uygulanmıştır. Katmanlar arasına aderans artırıcı kimyasal katkının uygulama biçimi Şekil 3.17'de gösterilmiştir. Bu kapsamda karışımlar hazırlandıktan sonra ilk katman hemen yerleştirilip sıkıştırılmıştır. Daha sonra ilk katmanın üzerine sprey olarak aderans artırıcı kimyasal katkı uygulanmıştır. İkinci katmanlar ise 0, 60, 120 ve 180 dakika sonra hazırlanıp ilk katman üzerinde yerleştirilip sıkıştırılmıştır. Hazırlanan numuneler 24 saat standart koşullarda bekledikten sonra kalıptan çıkartılıp kür havuzuna yerleştirilmiştir. 28 gün sonra kür havuzundan çıkarılan numuneler üzerinde basınç altında su işleme derinliği, basınç ve yarmada-çekme deneyleri yapılmıştır.

Daha sonraki bölümlerde KY katmanlar arası aderans artırıcı kullanılan ve uçucu kül içermeyen A1Y, A2Y ve A3Y katmanlar arası aderans artırıcı kullanılan ve çimento yerine %20, 40, 60 oranlarında uçucu kül ikameli karışımları ifade etmektedir. B1Y, B2Y ve B3Y ise sırasıyla katmanlar arası aderans artırıcı kullanılan ve agrega yerine çimento ağırlığının %20, 40 ve 60'ı oranlarında uçucu kül ikame edilen karışımları belirtmektedir.



Şekil 3.17. Katmanlar arası aderans artırıcı kimyasal katkının uygulanması

Aderans artırıcı kimyasal katkının SSB’lerde katmanlar arasına uygulanması Katmanlar arasına uygulanan aderans artırıcı kimyasal katkının üretici firma tarafından verilen özellikleri Çizelge 3.10’da belirtilmiştir.

Çizelge 3.10. Katmanlar arasına uygulanan aderans artırıcı kimyasal katkının özellikleri

Katkı	Yoğunluk (g/cm ³)	Katı madde miktarı (%)	pH değeri
Aderans artırıcı kimyasal katkı	1,057	28,8	2,79

3.4.3. Katmanlar arası harç uygulanması

SSB barajlar, üst üste sıkıştırılmış katmanlardan oluşmaktadır. Bu yapılarda ardışık katmanların birbirine bağlanması ve aralarında soğuk derzin oluşmaması önemlidir. Sıkıştırılmış katmanların veya bunların üstünde yer alan kaplama katmanının yüzeyindeki boşlukları doldurmak ve iki katmanı birbirine “yapıştırmak” amacıyla yatak katmanı uygulanmaktadır. Yatak katmanı olarak harç veya maksimum tane boyutu 5mm’den büyük olan beton karışımı kullanılmaktadır. 1996 yılında yapımı biten veya devam

etmekte olan 97 SSB barajının %77'sinde harç yatak karışımı, %23'ünde ise yatak betonu kullanılmıştır (ICOLD Bulletin 126, 2003). Yatak harcı ilk kez Shimajigawa Barajında uygulanmıştır. Söz konusu barajdan sonra SSB barajlarında yatak harcı kullanımı yaygınlaşmıştır.

Uygulanan yatak harcının kalınlığı genellikle 10-12 mm ile sınırlanmaktadır. Buna karşın, yatak betonunun kalınlığı 75 mm'ye kadar arttırılabilmektedir. Yatak karışımının kalınlığı fazla olduğu durumda, işlenebilirliği yüksek olan yatak katmanın üstüne serilen SSB karışımının (özellikle barajın kenar bölgelerinde) sıkıştırılması zorlaşabilmektedir (ICOLD Bulletin 126, 2003).

Bu çalışmada katmanlar arası soğuk derzi engellemek veya azaltmak amacıyla katmanların birleştiği yüzeye 1 cm kalınlığında harç uygulanmıştır. Ardışık katmanlar arasında bir yapıştırıcı madde olarak etkili olabilmek için, harç yastıklarının SSB'nin kendisinden daha güçlü olması gerekir. Basit bir ifadeyle, "yapıştırıcının" yapıştırılan malzemeden daha güçlü olması istenmektedir (Schnabel Engineering Associates, 2003). Bu bağlamda çalışma kapsamında ASTM C109 dikkate alınarak 28 günlük basınç dayanımı 66 MPa olan harç karışımları üretilmiş ve katmanlar arasına yerleştirilmiştir. Kontrol karışımlara benzer olarak sıkıştırma yapılmıştır. Yatak harcında kullanılan malzemeler ve karışım oranları Çizelge 3.11'de verilmiştir. Yatak harcı karışımının hazırlanması Şekil 3.18'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.11. Katmanlar arası uygulanacak harç karışım miktarları

Çimento (g)	Su (g)	Kum (g)	Süper akışkanlaştırıcı katkı (g)
500	242,5	1350	2 (%0,4)



Şekil 3.18. Harç karışımının hazırlanması

Karışımlar hazırlandıktan sonra ilk katman hemen yerleştirilip sıkıştırılmıştır. Ardından ikinci katman dökülmeden önce 1cm kalınlığında hazırlanan harç ilk katmanın üstüne yerleştirilerek, ikinci katman 0, 60, 120 ve 180 dakika sonra yerleştirilip sıkıştırılmıştır. Katmanlar arası harç uygulaması Şekil 3.19’da gösterilmiştir. Hazırlanan numuneler 24 saat bekleddikten sonra kalıptan çıkartılıp deney gününe kadar kür havuzunda bekletilmiştir. 28 günlük numunelerin basınç altında su işleme derinliği, basınç ve yarmada-çekme dayanımları belirlenmiştir.

Daha sonraki bölümlerde katmanlar arası harç kullanılan uçucu kül içermeyen kontrol karışımı KH ile belirtilmiştir. A1H, A2H ve A3H katmanlar arasında harç kullanılan ve çimento yerine %20, %40 ve %60 oranlarında uçucu kül ikameli karışımları göstermektedir. B1H, B2H ve B3H ise katmanlar arası harç uygulanan ve agrega yerine

çimento ağırlığının %20, 40 ve 60'ı oranında uçucu kül ikame edilen karışımları ifade etmektedir.



Şekil 3.19. SSB numunelerinde katmalar arası harç uygulaması

3.5. Çalışmada Uygulanan Deneyler ve Yöntemler

3.5.1. Vebe deneyi

SSB karışımlarının kıvamı ASTM C1170 (2020) Prosedör A'ye göre Vebe deneyi yapılarak belirlenmiştir. Deney, SSB numunesinin 22.7 kg titreşimli yük altında sarsılmasını ve yükün uygulandığı plaka ile kalıp iç yüzeyi arasında yüzük şeklinde harç tabakasının oluşması (Şekil 3.20) için gereken sürenin ölçülmesini içermektedir.



Şekil 3.20. Vebe deneyi

3.5.2. Su emme:

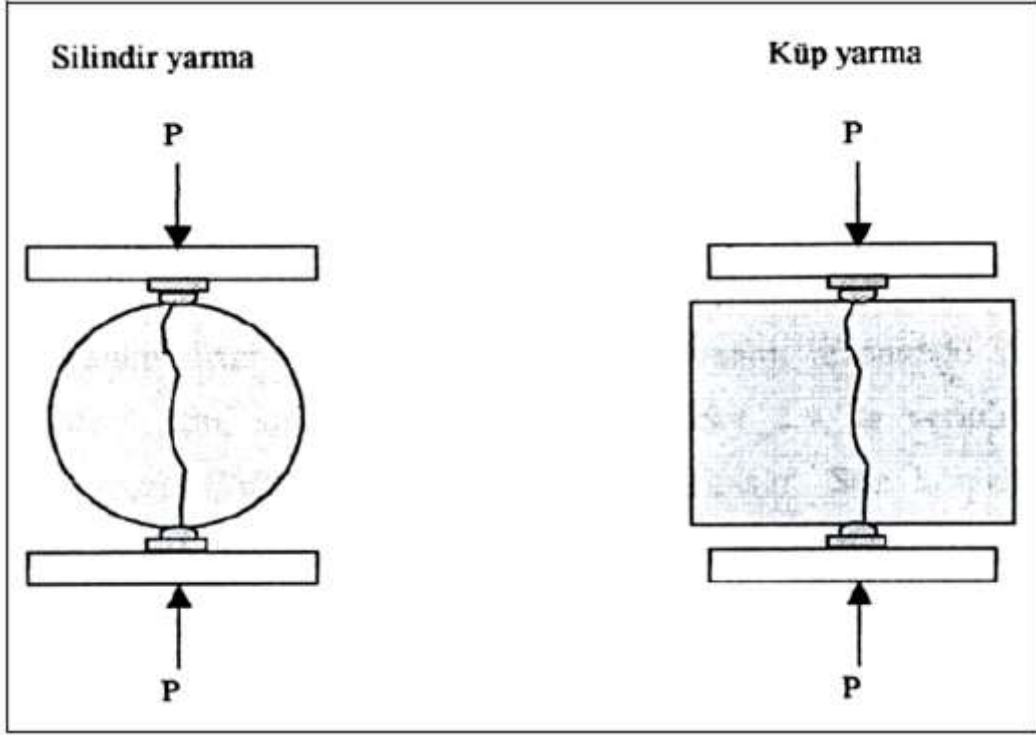
SSB karışımlarının 90-günlük su emme kapasitesi ASTM C642-13 standardına göre 15 cm boyutlarında küp numuneler üzerinde belirlenmiştir.

3.5.3. Basınç deneyi

Karışımların basınç dayanımı, 15 cm boyutlarındaki standart küp numuneler kullanılarak belirlenmiştir. Numuneler hazırlanırken, taze beton kalıplara konmadan kalıpların iç yüzeyleri yağlanmıştır; karışım küpler iki tabaka halinde doldurulup sıkıştırılmıştır. Numunelerin basınç dayanımı TS EN 12390-3 standardına uygun olarak belirlenmiştir. Basınç deneyi numunede oluşan soğuk derze paralel yönde uygulanmıştır.

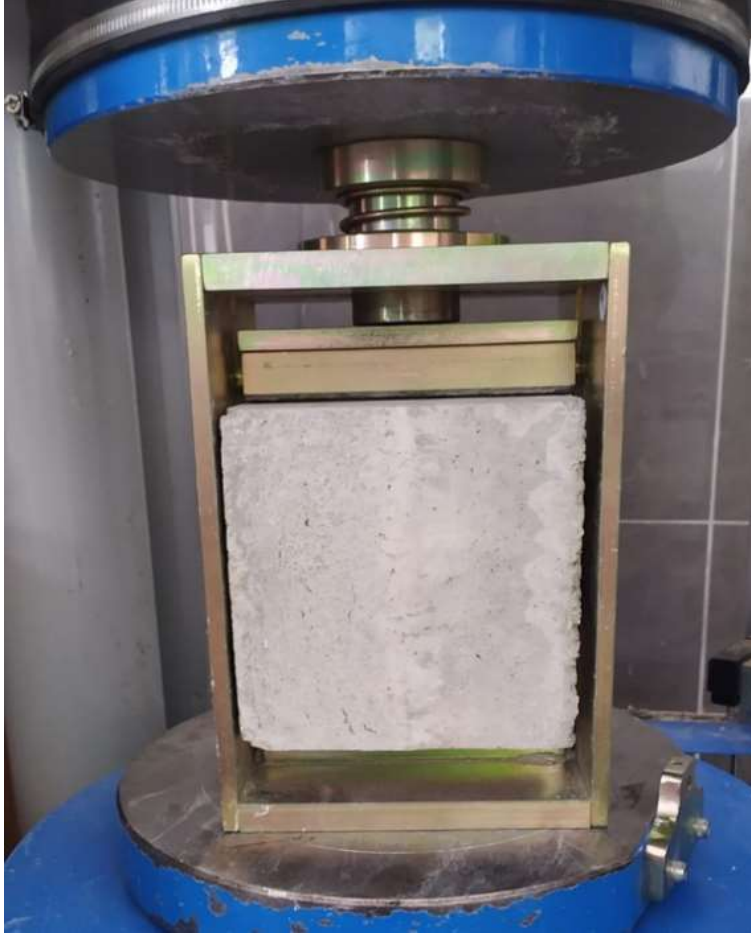
3.5.4. Yarmada çekme deneyi

Betonun numunelerinin direkt olarak çekme dayanımının belirlenmesi güç olduğundan, genelde yarmada çekme dayanımı adı verilen daha pratik bir dolaylı çekme testi uygulanmaktadır (Özkul vd., 1999). Bu test yöntemi Şekil 3.21’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Beton yarmada çekme dayanımı belirleme yönteminin şematik gösterimi

28 ve 90 günlük küp numunelerinin yarmada çekme dayanımı deneyi TS EN 12390-6 standardına uygun olarak belirlenmiştir (Şekil 3.16). Yarmada-çekme deneyi numunede oluşan soğuk derze paralel yönde uygulanmıştır.



Şekil 3.22. Yarmada-çekme deney

3.5.5. Eğilme deneyi

Betonun eğilme dayanımı TS EN 12390-5 standardına uygun olarak dört noktalı yükleme yöntemi ile elde edilmiştir. Eğilme dayanımının belirlenmesi için 100x100x600 mm prizmatik numuneler hazırlanmıştır. Kalıplara iki katman halinde sıkıştırılarak yerleştirilen numuneler 24 saat süreyle kalıplarda bekletildikten sonra kür havuzunda konulmuştur. Deney günü gelen numuneler kür havuzundan çıkartılıp eğilme deneyi sırasında çatlağın kontrollü olarak ilerlemesi için deneye başlamadan önce sulu kesim ile numunenin tam ortasından 1 cm derinliğinde çentik açılmıştır (Şekil 3.23). Prizmatik kiriş numuneler üzerinde, mesnetler arası 450 mm olacak şekilde, Şekil 3.24’te görüldüğü gibi dört nokta eğilme deneyi uygulanmıştır. Numunelerin eğilme dayanımı Denklem 3.3 kullanılarak belirlenmiştir. Eğilme deneyi numunede oluşan soğuk derze dik yönde uygulanmıştır.

$$\sigma = \frac{P \times L}{b \times h^2} \quad (3.3)$$

Bu denklemde;

σ = Eğilmede çekme dayanımını (MPa),

P = kırılma yükünü (N),

L = Yükleme tablası mesnetleri arasındaki açıklığı (mm),

h = Kesit alanının yüksekliğini (mm) ve

b = Kesit alanının genişliğini (mm) ifade etmektedir.



Şekil 3.23. Kiriş numunelerinde çentik açma işlemi



Şekil 3.24. Eğilmede çekme dayanımı deney cihazı

3.5.6. Elastisite modülü deneyi

SSB karışımlar üzerinde elastisite modülü deneyleri ASTM C469 standardına uygun olarak 150×300 mm silindir numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.25).



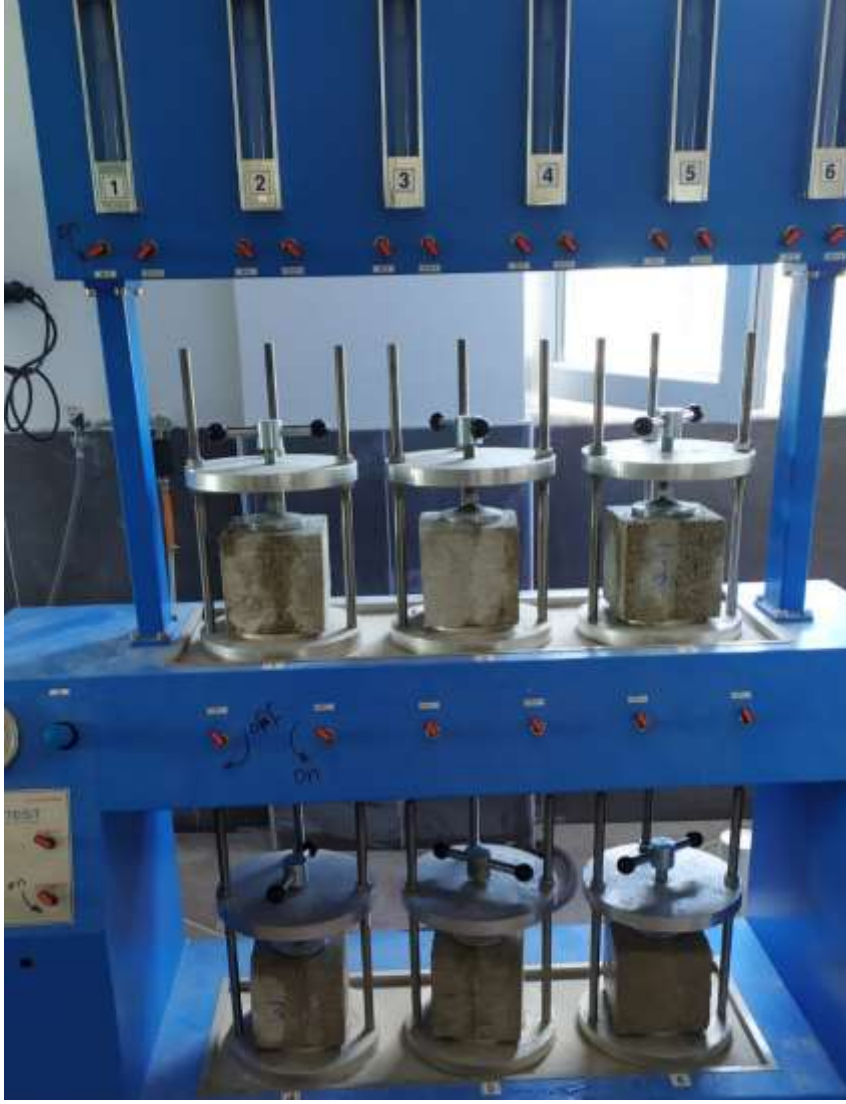
Şekil 3.25. Elastisite modülü deneyi

3.5.7. Basınç altından su işleme derinliği deneyi

Su geçirimlilik deneyi TS EN 12390-8 standardına uygun olarak yapılmıştır.

28 ve 90 günlük numuneler standart kürlenme sonunda geçirimlilik testine tabi tutulmuştur.

Su basıncı, numunenin döküm yönüne dik ve paralel olacak şekilde uygulanmıştır. Şekil 3.26'da gösterilen cihaza yerleştirilen numunelere 72 ± 2 saat süreyle 500 ± 50 KPa su basıncı uygulanmıştır.



Şekil 3.26. Çalışmada kullanılan su geçirimsizlik cihazı

Deney esnasında, deney numunesinin basınç uygulanmayan yüzeyleri, belirli aralıklarla gözlenmiştir ve yüzeylerde su görülmesi durumu kayda geçirilmiştir. Su sızıntısı görülmesi halinde, deneyin sonuca ulaştığı kabul edilmiştir ve durum kaydedilmiştir. Deney için, şebeke suyu kullanılmıştır. Basıncın, belirtilen süre boyunca uygulanmasından sonra numune cihazdan çıkartılmış ve basınçlı su uygulanan yüzeydeki fazla su silinerek temizlenmiştir. Numune, basınçlı su uygulanan yüzeye dik şekilde, TS EN 12390- 6'de "Beton- Sertleşmiş Beton Deneyleri - Bölüm 6: Deney Numunelerinin Yarmada Çekme Dayanımının Tayini" tarif edilen metoda uygun şekilde ortasından yarılarak, ikiye bölünmüştür. Numunenin bölünmesi ve incelenmesi esnasında, basınçlı

su uygulanan yüzey alt tarafa getirilmiştir. Numunenin bölünmesiyle ortaya çıkan yüzeyinin, su işleyen kısmı belirgin şekilde görülünceye kadar kurutulduktan hemen sonra, ıslak alanın sınırları işaretlenmiştir. Basınç uygulanan deney alanından itibaren, suyun işlediği en büyük derinlik, ölçülerek en yakın milimetreye yuvarlatılmak suretiyle kaydedilmiştir (Şekil 3.27).



Şekil 3.27. Basınçlı su altında su işleme derinliği testinden sonra yapılan ölçüm

3.5.8. Donma-çözülme deneyi

Donma-çözünme deneyi 150 mm küp numuneler üzerinde uygulanmıştır. İki katmanda sıkıştırılan numuneler kalıplardan çıkarılıp 90 günlük standart kürlemenin sonunda ASTM C666 standardına uygun olarak Şekil 3.28’de gösterilen cihaz ile donma-çözülme dirençleri tayin edilmiştir. Çalışmada, havada donma suda çözülme yapılarak hızlı donma-çözülme yöntemi uygulanmıştır. Deneyde donma sıcaklığı, $-18\pm 2^{\circ}\text{C}$, suda çözünme sıcaklığı ise $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ aralığında tutulmuştur. Donma süresi (maksimum sıcaklıktan minimum sıcaklığa varma süresi) 180 dakika olarak ayarlanmıştır. Çözülme aşamasında ise donma-çözülme kabini $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ sıcaklığında su ile doldurulmuş ve 30

dakika süre ile numuneler su içinde bekletilmiştir. Söz konusu deneyde 300 donma-çözülme çevrimi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.28. Donma-çözülme için kullanılan deney cihazı ve numunelerin yerleştirilmesi

Tüm karışımların Şekil 3.29’da gösterildiği gibi her 100 çevrim sonunda ultrases geçiş hızı tayini TS EN 12504-4 ‘Beton Denepleri - Bölüm 4: Ultrases Geçiş Hızının Tayini’ standardına göre yapılmıştır. 300 çevrim sonunda ise numunelerin TS EN 12390-3 standardına göre basınç dayanımları tespit edilmiştir.



Şekil 3.29. Deneylerde kullanılan ultrases cihazı

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

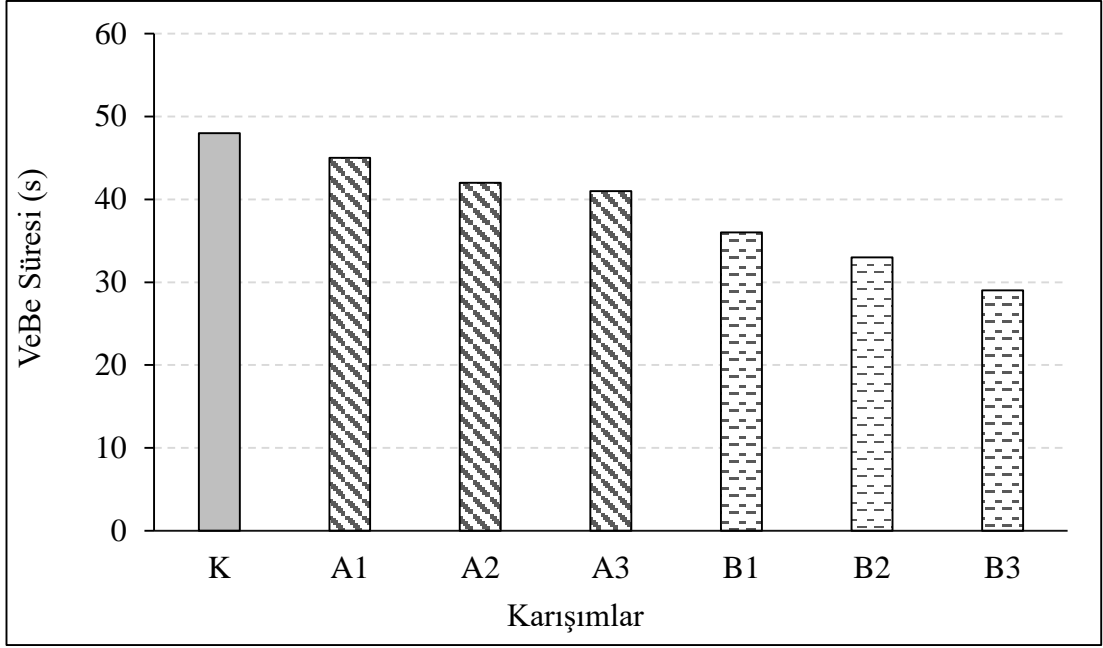
Bu bölümde SSB karışımlarının Vebe deneyi sonucu ve katmanlar arası soğuk derzi engellemek amacıyla belirtilen 3 yöntemin deney sonuçları verilmiştir. Bu deney sonuçları dikkate alınarak soğuk derz oluşumunun engellemesinde en etkili yöntem tespit edilmiştir. Daha sonra en etkili yöntemle hazırlanan numuneler üzerinde 28 ve 90 günlük basınç, yarmada-çekme, eğilme, elastisite, poison oranı, basınç altında su işleme derinliği, su emme oranı ve donma-çözülme deneyi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan numunelerin sonuçları ile kıyaslanmıştır.

4.1. SSB karışımların kıvamı

SSB karışımlarının Vebe deneyi sonuçları Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Şekil 4.1'den görüldüğü gibi tüm karışımlarda uçucu kül miktarının artmasıyla kıvamın olumlu etkilenmesinden dolayı Vebe zamanının azaldığı görülmüştür. SSB karışımlarında çimento yerine %20, 40 ve 60 uçucu kül kullanıldığında karışımların (A serisi) Vebe süreleri sırasıyla yaklaşık %6, 13 ve 15 oranlarında azalırken, agrega yerine çimento ağırlığınca uçucu kül kullanılan karışımlarda (B serisi) bu oranlar %25, 31 ve 40 civarında olmuştur.

Çimento yerine uçucu kül kullanıldığında işlenebilirliğinin artmasının ve buna bağlı olarak Vebe zamanının azalmasının, uçucu kül ikame edilen SSB karışımların su/bağlayıcı miktarının kontrol karışımına göre bir miktar yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca yuvarlak taneli olan uçucu kül çimento taneleri arasında sürtünmeyi azaltarak topaklaşmayı engellemekte böylece işlenebilirliğe katkı sağlamaktadır (Adamu vd., 2018; Tokyay, 2016).

Uçucu külün çimento ağırlığınca agrega yerine kullanıldığı B serisi karışımlarda kontrol karışımına göre su/bağlayıcı oranının azalmasına rağmen Vebe zamanında azalma görülmüştür. Söz konusu karışımlarda uçucu külün, karışımların su/bağlayıcı oranına göre daha baskın etki gösterdiği, A serisine benzer matristeki uçucu kül miktarının artışına bağlı olarak işlenebilirliği olumlu yönde etkilediği düşünülmektedir.



Şekil 4.1. SSB karışımların Vebe deneyi sonuçları

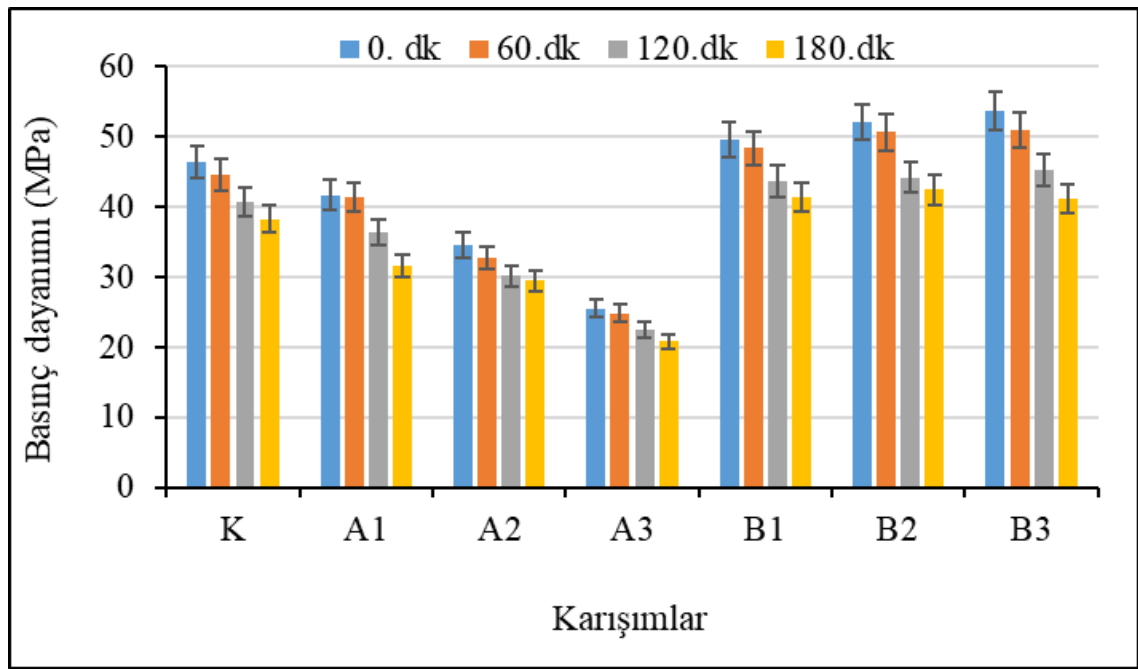
4.2. Katmanlar Arası Herhangi Bir İşlem Uygulanmamış Numunelerde Soğuk Derz Oluşumu

Katmanlar arası herhangi bir iyileştirme metodu uygulanmayan (Kontrol) numunelerin 28 günlük basınç ve yarmada-çekme deneyi sonuçları sırasıyla Şekil 4.2 ve 4.3'te verilmiştir. Soğuk derzin etkisini görmek amacıyla, numuneler hazırlanırken, beton katmanları 0, 60, 120 ve 180 dakika olmak üzere dört farklı zaman aralığında yerleştirilmiştir.

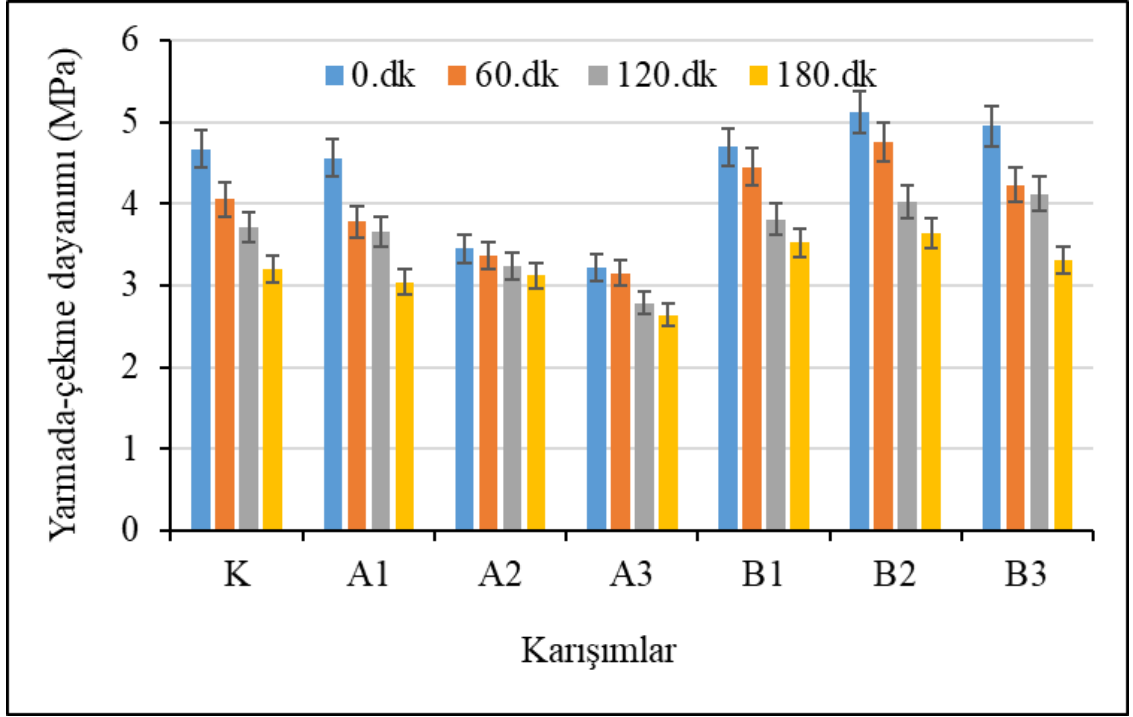
Şekil 4.2'de görüldüğü gibi tüm karışımlarda ikinci katmanın yerleştirme zamanının gecikmesiyle numunenin basınç dayanımları azalmıştır. Şekil 4.2'de görüldüğü gibi ikinci katmanın yerleştirme zamanı geciktikçe oluşan soğuk derzin etkisi artmıştır. Bu etkinin gecikme süresinin artışıyla daha da belirgin olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü gibi katmanlar arası gecikme olmadan yerleştirilen numunelere göre (0 dk.) ikinci katmanı 60 dakika sonra yerleştirilen numunelerin basınç dayanımı yaklaşık %1-5 arasında azalırken, 180 dakika sonra yerleştirilen numunelerin dayanımları ortalama %15-24 azalmıştır.

Şekil 4.3'te görüldüğü gibi basınç dayanımına benzer şekilde tüm karışımlarda ikinci katmanın yerleştirme zamanının gecikmesiyle numunenin yarmada-çekme dayanımı azalmıştır.

Sonuçlardan görüldüğü gibi katmanlar arası gecikme olmadan yerleştirilen numunelere göre (0 dk.) ikinci katmanı 60 dakika sonra yerleştirilen numunelerin yarmada-çekme dayanımı yaklaşık %2-17 arasında azalırken, 180 dakika sonra yerleştirilen numunelerin dayanımları %10-33 civarında azalmıştır.

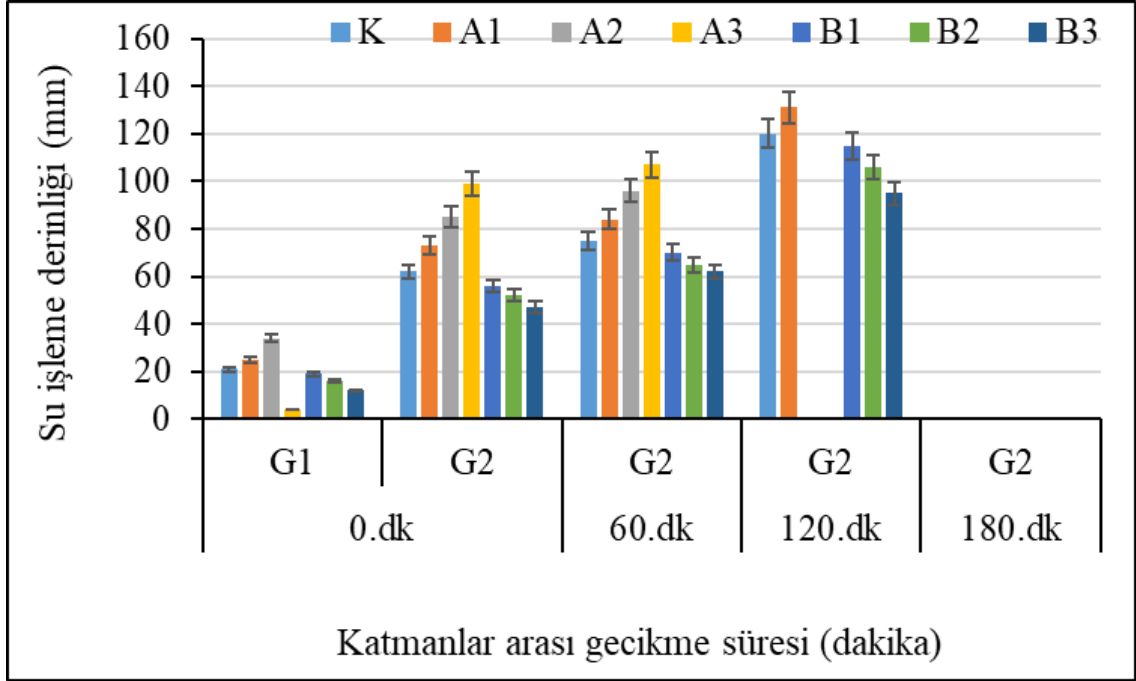


Şekil 4.2. 28 günlük karışımların basınç dayanımı, uçucu kül oranı ve katmanlar arası yerleştirme aralığının ilişkisi



Şekil 4.3. 28 günlük yarmada çekme dayanımı, uçucu kül oranı ve katmanlar arası yerleştirme aralığının ilişkisi

Basıncı su altında su işleme derinliği deneyi sonuçları Şekil 4.4'te verilmiştir. Deneyde su basıncı, numunenin mastarlanmış yüzeyine (döküm yönüne paralel) (G1) ve mastarlanmamış yüzeyine (döküm yönüne dik) (G2) uygulanmıştır.



Şekil 4.4. Karışımların su işleme derinliği, uçucu kül oranı ve ikinci katmanın yerleştime zamanı arasındaki ilişki

Şekil 4.4'te görüldüğü gibi tüm karışımlarda iki katman arasındaki yerleştirme zamanı farkı arttıkça numune geçirgenlikleri artmıştır. İkinci katmanı 120 dakika gecikme ile yerleştirilen A2 ve A3 karışımlarında ve 180 dakika gecikme ile yerleştirilen tüm karışımlarda geçirgenlik sonucu alınamamıştır. Tüm seriler arasında maksimum G1 ve G2 değerleri A3 ve minimum G1 ve G2 değerleri B3 karışımlarına ait olduğu görülmektedir. A3 karışımının G2 değerleri ise katmanlar arası yerleştirme gecikmesinin artmasıyla artış göstermiş ve 120. ve 180. dakika ölçümlerinde numunelerin tüm derinliğinden su geçişi olmuştur. İkinci katmanı 60 dakika sonra yerleştirilen G2 yönünde deneye tabi tutulan numunelerin aynı yönde ikinci katmanı gecikme olmadan yerleştirilen numunelere göre basınçlı su altında su işleme derinliği değerleri %8-31 arasında artış göstermiştir.

Sonuçlardan görüldüğü gibi iki katmanda yerleştirilen SSB'lerde soğuk derz oluşumu kaçınılmazdır. Olayın, ikinci katmanın yerleştirilmesindeki gecikme ile daha bariz hale geldiği anlaşılmıştır. Oluşan soğuk derz SSB'nin basınç, yarmada-çekme dayanımına olumsuz etkisi olmuştur. Ancak olumsuz etkisi betonun geçirimliğinde daha da belirgin

olmuştur. Bilindiği gibi geçirgenlik betonun durabilitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu durum soğuk hava ve su ile temasta bulunan SSB'ler için daha da önemlidir.

4.3. Priz Geciktirici Kimyasal Katkı Kullanımının SSB'lerin Katmanlar Arası Soğuk Derzin Oluşumuna ve Mekanik Özelliklerine Etkisi

Priz geciktirici (Pg) katkının en uygun oranını belirlemek için SSB karışımlarında çimento ağırlığının %0,2, 0,3 ve 0,4 oranında priz geciktirici kimyasal katkı kullanılmıştır. Priz geciktirici katkı içeren SSB karışımlarının basınç ve yarmada çekme dayanımları ile geçirgenlik performansı araştırılmıştır. En iyi pg oranı belirlenip katmanlar arası iyileştirme yapılmayan karışımlarla kıyaslanmıştır.

4.3.1. Basınç dayanımı sonuçları

Farklı oranlarda (%0,2, 0,3 ve 0,4) priz geciktirici kimyasal katkı içeren SSB karışımların 28 günlük basınç dayanımı sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir. KP priz geciktirici katkı içeren kontrol karışımını (Uçucu kül içermeyen), A1P, A2P ve A3P priz geciktirici kimyasal katkı içeren ve çimento yerine %20, 40, 60 oranlarında uçucu kül ikameli karışımları ifade etmektedir. B1P, B2P ve B3P ise sırasıyla priz geciktirici kimyasal katkı içeren ve agrega yerine çimento ağırlığının %20, 40 ve 60 oranlarında uçucu kül ikame edilen karışımları belirtmektedir.

Çizelge 4.1'de görüldüğü gibi kullanılan SSB karışımlarının %0,2, %0,3 ve %0,4 oranlarında PG katkı içermesi karışımların 28 günlük basınç dayanımına kayda değer bir etkisi olmamıştır.

Çizelge 4.1. Farklı oranlarda Pg içeren karışımların 28 günlük basınç dayanımı(MPa)

Karışımlar	PG oranı	0.dk	60.dk	120.dk	180.dk
K	0,0%	46,3	44,5	40,6	38,3
A1		41,7	41,4	36,2	31,5
A2		34,5	32,7	30,2	29,4
A3		25,5	24,8	22,4	20,8
B1		49,5	48,3	43,6	41,3
B2		52,0	50,6	44,1	42,4
B3		53,7	51,0	45,3	41,2
KP	0,2%	44,8	42,3	38,5	38,9
A1P		41,1	40,5	36,3	30,4
A2P		33,6	32,1	27,2	25,6
A3P		24,8	22,1	20,3	17,8
B1P		48,4	46,3	39,9	37,7
B2P		49,7	48,4	41,0	39,4
B3P		52,3	49,7	42,0	38,6
KP	0,3%	43,6	41,6	39,0	37,7
A1P		41,1	40,5	36,0	30,6
A2P		34,5	31,6	25,6	24,1
A3P		24,5	23,1	19,0	18,0
B1P		45,1	42,6	39,1	35,8
B2P		47,1	45,4	39,8	38,2
B3P		50,1	47,5	41,4	38,7
KP	0,4%	44,5	43,9	40,1	38,2
A1P		40,4	40,1	37,7	32,8
A2P		31,2	29,2	28,0	22,7
A3P		23,1	22,3	21,2	21,0
B1P		45,3	44,2	42,6	38,9
B2P		47,2	45,2	43,5	40,6
B3P		50,2	49,8	44,3	41,7

PG kimyasal katkı içeren ve içermeyen karışımların iki katman arası yerleştirme sürelerinin SSB'lerin basınç dayanımına etkilerini daha iyi anlamak için karşılaştırmalı incelemeler yapılmıştır. Katmanlar arası döküm aralığı 0 dakika olan numunelerin basınç dayanımları referans alınarak ikinci katmanı 60, 120 ve 180 dakika sonra yerleştirilen karışımların bağıl basınç dayanımı ilişkisi Çizelge 4.2'de verilmiştir. Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi PG kimyasal katkı içeren karışımlarda zamana bağlı basınç dayanımının PG katkı içermeyen karışımlara göre daha az düştüğü tespit edilmiştir. Çizelge 4.2'de görüldüğü gibi ikinci katmanı 180 dakika sonra yerleşen numunelerin basınç

dayanımındaki azalmaların PG katkı içermeyen karışımlarda %15-24 arasında olurken, %0,2 PG katkı içeren karışımlarda %13-28, %0,3 PG katkı içeren karışımlarda % 13-30 ve %0,4 PG katkı içeren karışımlarda ise %9-27 aralığına kadar düştüğü görülmüştür.

Katmanlar arası döküm aralığının artmasıyla, %0,4 PG katkı içeren karışımlarda dayanımın düşme oranının azaldığı görülmüştür. Söz konusu bu olumlu etkinin PG katkı içeren karışımlarda PG katkı içermeyen karışımlara göre soğuk derzin daha az oluşmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Böylece SSB karışımlarda priz geciktirici katkı kullanılması katmanlar arasında soğuk derz oluşumunu engelleyerek gecikmeli yerleştirilen numunelerin basınç dayanımını olumlu yönde etkilemiştir.

Tüm sonuçlar ışığında SSB karışımlarda %0,4 oranında PG katkının kullanılması katmanlar arası soğuk derz etkilerini daha yüksek mertebede azaltmasından dolayı daha uygun görülmüştür.

Çizelge 4.2. PG katkı içermeyen ve %0,2, 0,3 ve 0,4 oranlarında PG katkı içeren SSB karışımların bağıl basınç dayanımı (%)

Karışımlar	PG oranı	0.dk	60.dk	120.dk	180.dk
K	0,0%	100	96	88	83
A1		100	99	87	76
A2		100	95	87	85
A3		100	97	88	81
B1		100	98	88	83
B2		100	97	85	81
B3		100	95	84	77
KP	0,2%	100	94	86	87
A1P		100	99	88	74
A2P		100	95	81	76
A3P		100	89	82	72
B1P		100	96	82	78
B2P		100	97	82	79
B3P		100	95	80	74
KP	0,3%	100	96	89	87
A1P		100	99	87	74
A2P		100	92	74	70
A3P		100	94	78	73
B1P		100	94	87	79
B2P		100	96	85	81
B3P		100	95	83	77
KP	0,4%	100	99	90	86
A1P		100	99	93	81
A2P		100	94	90	73
A3P		100	96	91	91
B1P		100	98	94	86
B2P		100	96	92	86
B3P		100	99	88	83

4.3.2. Yarmada-çekme dayanımı sonuçları

%0, 0,2, 0,3 ve 0,4 oranında PG kimyasal katkı içeren SSB'lerin 28 günlük yarmada-çekme dayanımı sonuçları Çizelge 4.3'te gösterilmiştir. Karışımlarda kullanılan farklı oranlardaki (%0, 0,2, %0,3 ve %0,4) PG katkıları SSB'nin yarmada-çekme dayanımına ikinci katmanı 0 dakikada yerleştirilen numunelerde kayda değer bir etki yapmamışken ikinci katmanı 180 dakika sonra yerleştirilen numunelerde olumlu etkilemiştir.

Çizelge 4.3. PG katkı içermeyen ve %0,2, 0,3 ve 0,4 oranlarında PG katkı içeren SSB karışımların yarmada-çekme dayanımı (MPa)

Karışımlar	Pg oranı	0.dk	60.dk	120.dk	180.dk
K	0%	4,7	4,1	3,7	3,2
A1		4,6	3,8	3,7	3,0
A2		3,5	3,4	3,2	3,1
A3		3,2	3,15	2,8	2,6
B1		4,7	4,5	3,8	3,5
B2		5,1	4,8	4,0	3,6
B3		5,0	4,2	4,1	3,3
KP	0,2%	4,6	4,4	3,8	3,7
A1P		4,5	4,2	3,5	3,0
A2P		3,3	3,0	2,7	2,4
A3P		3,2	2,9	2,6	2,2
B1P		4,7	4,2	3,6	3,7
B2P		5,1	4,5	3,9	3,4
B3P		4,9	4,4	3,7	3,6
KP	0,3%	4,6	4,5	3,9	3,3
A1P		4,5	4,4	3,7	3,5
A2P		3,4	3,3	2,8	2,6
A3P		3,2	3,1	2,6	2,4
B1P		4,6	4,5	3,8	3,3
B2P		5,1	4,8	3,9	3,9
B3P		4,9	4,7	4,1	3,5
KP	0,4%	4,6	4,5	3,8	3,7
A1P		4,5	4,4	3,8	3,5
A2P		3,3	3,3	2,8	2,7
A3P		3,1	3,1	2,5	2,4
B1P		4,6	4,5	4,2	3,9
B2P		4,9	4,7	4,4	3,7
B3P		4,8	4,7	4,0	3,9

PG katkı içeren ve içermeyen karışımlarda katmanlar arası geçen sürenin SSB'lerin yarmada-çekme dayanımına etkisini incelemek amacıyla ikinci katman 180 dakikaya kadar her 60 dakikada bir ayrı karışımlar halinde gecikmeli olarak yerleştirilmiştir.

SSB karışımlarda ikinci katmanın yerleştirme zamanı 0. dakikadaki yarmada-çekme dayanımı esas alınarak 60, 120 ve 180 dakika sonra yerleştirilen ikinci katmanların bağlı yarmada-çekme dayanımı ilişkisi Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4'te görüldüğü gibi ikinci katmanı 180 dakika sonra yerleşen numunelerin yarmada-çekme dayanımındaki azalmaların PG katkı içermeyen karışımlarda %10-35 arasında olurken, %0,2 PG katkı içeren karışımlarda %20-35, %0,3 PG katkı içeren karışımlarda %22-29 ve %0,4 PG katkı içeren karışımlarda ise %15-24 aralığına kadar düştüğü görülmüştür. Sonuçlardan görüldüğü gibi PG kimyasal katkı içeren karışımların katmanlar arası yerleştirme aralığının artmasıyla zamana bağlı yarmada-çekme dayanımı katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmamış karışımlara göre daha az düşüş göstermiştir.

Basınç dayanım sonuçlarındaki benzer davranış yarmada çekme dayanımında da görülmüştür. SSB yerleştirme sırasında genel olarak ikinci katmanın yerleştirme süresinin artmasıyla dayanımlarda azalma tespit edilmiştir. SSB karışımlarda PG katkı kullanılması katmanlar arasındaki olası soğuk derz etkilerini azaltarak yarmada çekme dayanımındaki azalma oranını düşürmüştür.

Çizelge 4.4. PG katkı içermeyen ve %0,2, 0,3 ve 0,4 oranlarında PG katkı içeren SSB karışımların bağıl yarmada çekme dayanımı (%)

Karışımlar	PG katkı oranı	0.dk	60.dk	120.dk	180.dk
K	0%	100	87	79	69
A1		100	83	80	65
A2		100	97	91	90
A3		100	98	88	81
B1		100	95	81	74
B2		100	93	78	71
B3		100	85	82	67
KP	%0,2	100	94	83	80
A1P		100	93	78	67
A2P		100	93	82	73
A3P		100	91	81	69
B1P		100	91	77	79
B2P		100	88	76	67
B3P		100	89	76	73
KP	%0,3	100	97	85	72
A1P		100	97	82	78
A2P		100	97	82	76
A3P		100	98	81	75
B1P		100	96	83	72
B2P		100	96	76	76
B3P		100	97	84	71
KP	%0,4	100	98	83	80
A1P		100	98	84	78
A2P		100	99	85	82
A3P		100	99	81	77
B1P		100	97	91	85
B2P		100	97	90	76
B3P		100	97	83	81

4.3.3. Geçirimsizlik deneyi sonuçları

Katmanlar arasında herhangi bir uygulama yapılmayan SSB karışımların ve %0,2, 0,3 ve 0,4 oranlarında PG kimyasal katkı içeren SSB'lerin basınçlı su altında su işleme derinliği sonuçları Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. PG içermeyen ve %0,2, %0,3 ve %0,4 oranlarında PG içeren SSB karışımların basınçlı su altında su işleme derinliği (mm)

Karşım	PG Katkı Oranı	0.dk		60.dk	120.dk	180.dk
		G1	G2	G2	G2	G2
K	%0	21	62	75	120	Olumsuz
A1		25	73	84	131	Olumsuz
A2		34	85	96	Olumsuz	Olumsuz
A3		45	99	107	Olumsuz	Olumsuz
B1		19	56	70	115	Olumsuz
B2		16	52	65	106	Olumsuz
B3		12	47	62	95	Olumsuz
KP	%0,2	22	65	73	115	Olumsuz
A1P		24	70	80	125	Olumsuz
A2P		31	79	91	Olumsuz	Olumsuz
A3P		38	105	105	Olumsuz	Olumsuz
B1P		21	54	61	115	Olumsuz
B2P		15	48	60	100	Olumsuz
B3P		13	46	55	89	Olumsuz
KP	%0,3	26	60	70	106	Olumsuz
A1P		25	74	74	113	Olumsuz
A2P		33	81	88	126	Olumsuz
A3P		43	100	97	135	Olumsuz
B1P		23	51	58	96	Olumsuz
B2P		18	49	55	89	125
B3P		15	44	51	81	115
KP	%0,4	25	58	61	70	103
A1P		28	70	72	79	95
A2P		35	78	81	87	101
A3P		43	84	86	93	107
B1P		20	50	53	57	80
B2P		17	47	51	56	76
B3P		14	42	46	51	75

Çizelge 4.5'te görüldüğü gibi ikinci katmanın yerleştirilme zamanının 0 dakika olduğu tüm karışımlarda G2 değerinin, G1 değerinden fazla olduğu görülmektedir. Bu durum tabakalar arasında soğuk derz etkisinin oluşmasının bir sonucudur. Ayrıca, karışımlarda ikinci katmanın yerleştirme zamanının gecikmesiyle numune geçirgenlikleri artmıştır. Ancak karışımlara PG katkı ilave edilmesiyle G2 değerlerinde azalma olmuş ve katkı oranının artmasıyla numune geçirgenliğinde daha belirgin azalma görülmüştür.

İkinci katmanı 180 dakika sonra yerleştirilen katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmamış SSB karışımlarda ve %0,2 oranında PG katkı kullanılan karışımlarda basınçlı suyun numunenin tüm derinliğinden geçmesinden dolayı deney olumsuz sonuçlanmıştır. Ancak %0,3 oranında PG katkı kullanılan bazı karışımlarda ve %0,4 oranında PG katkı kullanılan tüm karışımlarda 180 dakikaya kadar sonuç alınabilmiştir.

PG katkı içeren A serisi karışımlarda, PG katkı içeren kontrol karışımına (KP) kıyasla karışımlardaki uçucu kül oranının artmasıyla su işleme derinliği değerinin arttığı görülmüştür. Bu durumun karışımlardaki uçucu kül miktarının ve S/B oranının artışından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ancak karışımlara PG katkı ilave edilmesi katmanlar arasında oluşan soğuk derz etkilerini zayıflatmıştır. Karışımlarda PG katkı oranının artmasıyla G2 değerlerinin azalma eğilimde olduğu tespit edilmiş ve karışımların geçirgenliği azalmıştır.

PG katkı içeren B serisi karışımlarda, PG katkı içeren kontrol karışımına (KP) kıyasla karışımlarda agrega yerine kullanılan uçucu kül oranının artmasıyla su işleme derinliği değerinin azaldığı görülmüştür. Söz konusu bu azalma karışımlarda PG katkı oranının artmasıyla daha da belirgin olmuştur. Karışımlarda agrega yerine uçucu kül miktarının artmasıyla S/B oranı azalmakta ve hamur fazı artmaktadır. Ayrıca karışımlarda PG katkı kullanılması soğuk derz etkilerini de zayıflattığından dolayı numune geçirgenliğini azaltmıştır.

PG kimyasal katkı içeren ve içermeyen karışımların G2 yönü esas alınarak katmanlar arası geçen sürenin bağıl olarak basınçlı su altında su işleme derinliğine etkisi Çizelge 4.6'da gösterilmiştir. Çizelge 4.6'da karışımların 0. dakikadaki değerleri referans alınıp 60. dakika, 120. dakika ve 180. dakikadaki G2 değerleri bağıl olarak hesaplanmıştır.

Tüm karışımlarda katmanlar arası yerleştirme aralığının artmasıyla G2 değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Ancak karışımlardaki PG katkı miktarının artmasıyla G2 değerlerinde bir azalma söz konusudur. Katmanlar arası geçen sürenin 180 dakika olması durumunda PG katkı içermeyen, %0,2 ve %0,3 oranında PG katkısı içeren karışımlarda (%0,3 PG içeren B2P ve B3P karışımları hariç) numune boyunca su geçişi olurken, %0,4 oranında PG katkı içeren karışımlarda PG katkının geçirgenlik yönünden olumlu etkisi görülmüştür. Sonuçlardan görüldüğü gibi PG katkıları katmanlar arası yerleştirme süresinin artışıyla meydana gelen soğuk derz etkilerini zayıflatarak karışımların geçirgenlik performansını azaltmıştır.

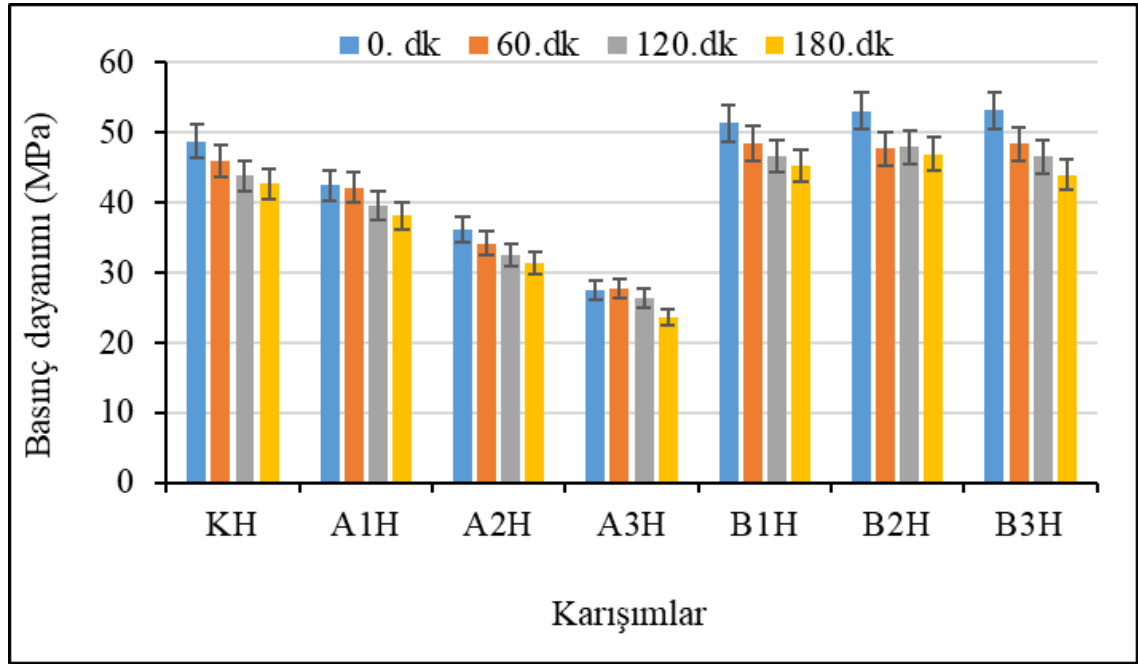
Çizelge 4.6. PG katkı içeren ve içermeyen karışımların G2 yönü esas alınarak ikinci katmanın yerleştirme süresinin bağıl olarak su işleme derinliğine etkisi

Karışımlar	PG Katkı Oranı	0 dakika	60 dakika	120 dakika	180 dakika
		G2 (%)	G2 (%)	G2 (%)	G2 (%)
K	%0	100	121	194	Olumsuz
A1		100	115	179	Olumsuz
A2		100	113	Olumsuz	Olumsuz
A3		100	108	Olumsuz	Olumsuz
B1		100	125	205	Olumsuz
B2		100	125	204	Olumsuz
B3		100	132	202	Olumsuz
KP		%0,2	100	112	177
A1P	100		114	179	Olumsuz
A2P	100		115	Olumsuz	Olumsuz
A3P	100		100	Olumsuz	Olumsuz
B1P	100		113	213	Olumsuz
B2P	100		125	208	Olumsuz
B3P	100		120	193	Olumsuz
KP	%0,3		100	117	177
A1P		100	100	153	Olumsuz
A2P		100	109	156	Olumsuz
A3P		100	97	135	Olumsuz
B1P		100	114	188	Olumsuz
B2P		100	112	182	255
B3P		100	116	184	261
KP		%0,4	100	105	121
A1P	100		103	113	136
A2P	100		104	112	129
A3P	100		102	111	127
B1P	100		106	114	160
B2P	100		109	119	162
B3P	100		110	121	179

4.4. SSB Karışımlarda Katmanlar Arası Harç Uygulamasının Soğuk Derz Oluşumu ve SSB'nin Mekanik Özelliklerine Etkisi

4.4.1. Basınç dayanımı

Katmanlar arası harç kullanılan SSB numunelerin 28 günlük basınç dayanımları Şekil 4.5'te verilmiştir. Şekil 4.5'te görüldüğü gibi katmanlar arasına harç uygulanan tüm SSB numunelerinde katmanların yerleştirme aralığının artmasıyla basınç dayanımlarında azalma görülmüştür. Bu durumun ikinci katmanın yerleştirme zamanının gecikmesiyle katmanlar arasındaki soğuk derzin olumsuz etkisinin artmasından kaynaklanmaktadır. Sonuçlardan anlaşıldığı gibi katmanlar arası harç kullanılan numunelerin basınç dayanımı harç kullanılmayan karışımlara göre azda olsa artış göstermiştir.



Şekil 4.5. Katmanlar arasında harç uygulanan numunelerin 28 günlük basınç dayanımı sonuçları

İki katman arası harç kullanılan ve kullanılmayan karışımların katmanlar arası yerleştirme gecikmesinin SSB'lerin basınç dayanımına etkisini daha iyi anlamak için ikinci katmanın yerleştirme zamanı 0 dakika olan numunelerin basınç dayanımı esas alınarak 60, 120 ve 180 dakika sonra yerleştirilen numunelerin bağıl basınç dayanımları Çizelge 4.7'de verilmiştir.

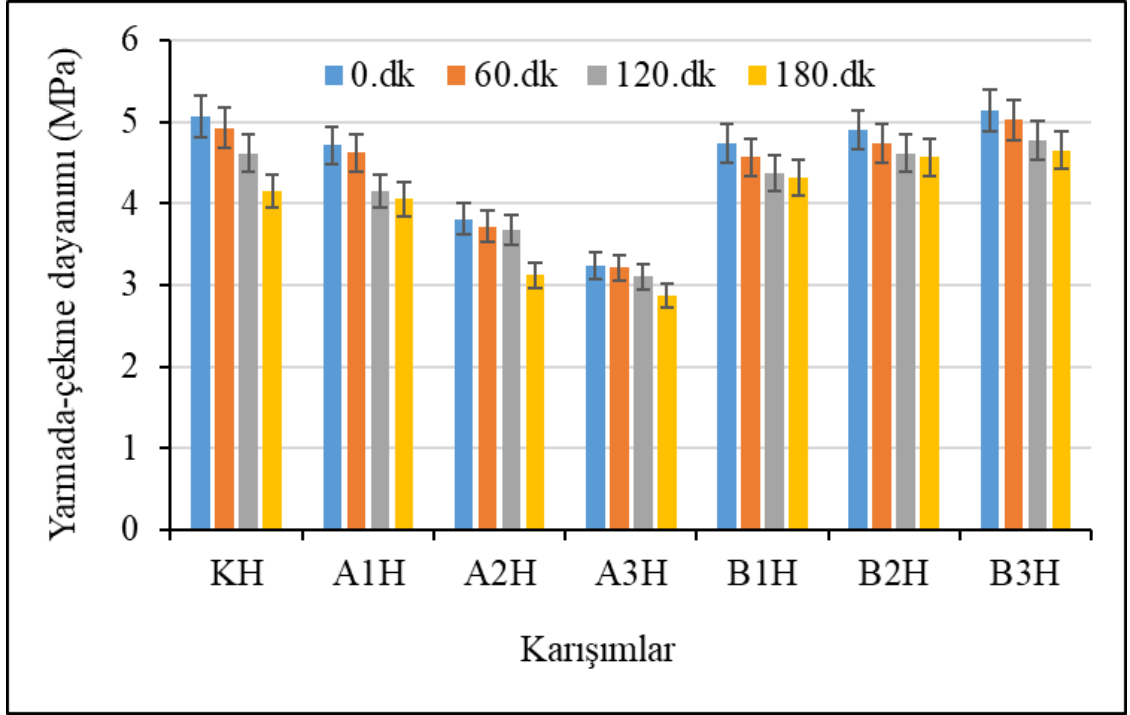
İkinci katmanı 180 dakika gecikme ile yerleştirilen SSB numuneler karşılaştırıldığında, katmanlar arasında harç kullanılmayan karışımların basınç dayanımı %15-24 mertebelerinde azalırken, katmanlar arasında harç kullanılan karışımlarda dayanım azalması %10-17 oranlarında olmuştur. Söz konusu azalma oranlarından da görüldüğü gibi katmanlar arası soğuk derzin olumsuz etkisini azaltmak amacıyla kullanılan harcın etkili olduğunu görülmüştür.

Çizelge 4.7. Katmanlar arası harç kullanılan ve kullanılmayan karışımların ikinci katmanın yerleştirme zamanı gecikmesine göre 28 günlük bağıl basınç dayanımı

Bağıl Basınç Dayanımı (%)									
Karışımlar	0 dk	60 dk	120 dk	180 dk	Karışımlar	0 dk	60 dk	120 dk	180 dk
K	100	96	88	83	KH	100	94	90	88
A1	100	99	87	76	A1H	100	99	93	90
A2	100	95	87	85	A2H	100	94	90	87
A3	100	99	89	83	A3H	100	101	96	86
B1	100	98	88	83	B1H	100	94	91	88
B2	100	97	85	81	B2H	100	90	90	89
B3	100	95	84	77	B3H	100	91	88	83

4.4.2. Yarmada-çekme dayanımı sonuçları

Katmanlar arası harç uygulanan 28 günlük yarmada çekme deneyi sonuçları Şekil 4.6'da verilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü gibi tüm karışımlarda katmanlar arası yerleştirme aralığının artmasıyla artan soğuk derz etkisinden dolayı yarmada-çekme dayanımlarında azalma meydana gelmiştir.



Şekil 4.6. Katmanlar arasına harç uygulanan numunelerin 28 günlük yarmada-çekme dayanımı sonuçları

Sonuçlardan görüldüğü gibi katmanlar arası harç kullanılan numunelerin, harç kullanılmayan numunelere kıyasla, 28 günlük yarmada-çekme dayanımı azda olsa artmıştır. Buna göre, iki katman arasına harç uygulanmasının katmanlar arasında meydana gelen soğuk derzin olumsuz etkisini bir ölçüde zayıflattığı kanısına varılmıştır.

Katmanlar arasında harç uygulanan ve uygulanmayan numunelerin iki katmanın yerleştirme zamanının SSB'lerin yarmada çekme dayanımına etkisi incelemek amacıyla, ikinci katmanın yerleştirme zamanı 0 dakika olan numunelerin yarmada çekme dayanımı esas alınarak, bağıl dayanımları hesaplanmış ve Çizelge 4.8'da gösterilmiştir.

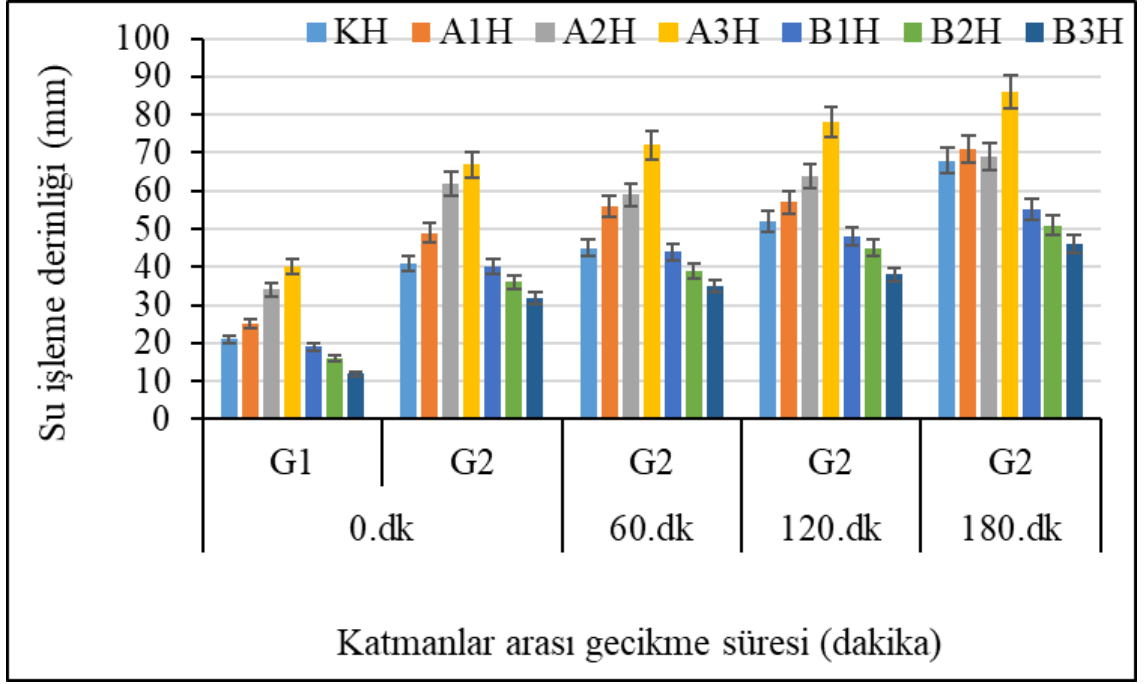
İkinci katmanı 180 dakika gecikme ile yerleştirilen numuneler dikkate alındığında, katmanlar arasında harç kullanılmayan numunelerin yarmada çekme dayanımındaki azalma oranı %10-33 olurken, katmanlar arasına harç uygulanması ile söz konusu dayanımlardaki azalma %7-18 arasında olmuştur. Bu bağlamda katmanlar arası harç uygulaması, numunelerin basınç dayanımında da olduğu gibi, soğuk derz kaynaklı yarmada çekme dayanımındaki düşmeyi de azaltmıştır.

Çizelge 4.8. Katmanlar arası harç kullanılan ve kullanılmayan karışımların ikinci katmanın yerleştirme zamanına göre 28 günlük bağıl yarmada çekme dayanımı (%)

Karışımlar	Bağıl yarmada çekme dayanımları (28 günlük)								
	0 dk	60 dk	120 dk	180 dk	Karışımlar	0 dk	60 dk	120 dk	180 dk
K	100	87	79	69	KH	100	97	91	82
A1	100	83	80	67	A1H	100	98	88	86
A2	100	97	94	90	A2H	100	98	96	82
A3	100	98	86	82	A3H	100	99	96	89
B1	100	95	81	75	B1H	100	96	92	91
B2	100	93	79	71	B2H	100	97	94	93
B3	100	85	83	67	B3H	100	98	93	90

4.4.3. Geçirimsizlik deneyi sonuçları

Katmanlar arası harç kullanılan karışımların basınçlı su altında su işleme derinliği sonuçları Şekil 4.7’de verilmiştir. Geçirimsizlik deneyinde su basıncı, numunelerin iki farklı yönüne uygulanmıştır. Masterlanmış yüzeyine (döküm yönüne paralel) su basıncı uygulanan numunelerin su işleme derinliği G1 olarak ifade edilmiştir. Masterlanmamış yüzeyine (döküm yönüne dik) su basıncı uygulanan numunelerin su işleme derinliği ise G2 olarak belirtilmiştir. Şekil 4.7’de görüldüğü gibi tüm numunelerde iki katman arasındaki yerleştirme zamanı farkı arttıkça numune geçirimsizliği artmıştır. Katmanlar arası yerleştirme aralığı 0 dakika olduğu durumda dahi, katmanlar arasında meydana gelen soğuk derzden dolayı G2 değerleri G1 değerlerinden daha yüksek olmuştur.



Şekil 4.7. Katmanlar arasına harç uygulanan karışımların basınç altında su işleme derinliği

İki katman arası harç kullanılan ve kullanılmayan karışımların katmanlar arası yerleştirme gecikmesinin etkilerini daha iyi yorumlayabilmek için G2 yönündeki geçirgenliği esas alınarak bağıl basınç altında su işleme derinliği oranları Çizelge 4.9’da gösterilmiştir. Çizelge 4.9’da karışımların 0. dakikadaki değerleri referans alınıp 60. dakika, 120. dakika ve 180. dakikadaki G2 değerleri bağıl olarak hesaplanmıştır.

Katmanlar arasında harç bulunmayan karışımlar arasında ikinci katmanın yerleştirilmesi 120 dakika ve 180 dakika gecikmeli olan bazı numunelerde basınçlı suyun numunenin tüm derinliğinden geçmesinden dolayı geçirgenlik sonucu alınamazken, katmalar arasına harç uygulaması numunelerin su geçirgenliğini azaltmıştır. Bu durum harç karışımların katmanlar arasındaki soğuk derz etkisini azaltmasından kaynaklanmaktadır.

Tüm karışımlarda ikinci katmanın yerleştirme zamanının gecikmesiyle G2 değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Numunelerde, katmanlar arasına harç uygulanmasıyla (harç kullanılmayan karışımlara göre) G2 değerlerinde azalma görülmüştür. İkinci katmanın 60 dakika gecikmeli yerleştirilmesi, katmanlar arasında harç uygulanmayan karışımlarda %8-32 oranlarında artırmıştır. Ancak bu artış katmanlar arası harç uygulanan

karışımlarda %5-14 oranlarında olmuştur. İkinci katmanın 120 ve 180 dakika gecikmeli yerleştirilmesi durumlarında ise katmanlar arasına harç uygulanması ile numune geçirgenliklerinde belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. 180 dakika gecikmede harç uygulanan numunelerin G2 değerlerinde %17-66 arası artış görülürken, harç uygulanmayan numunelerde basınçlı su tüm numune boyunca geçmiştir. Diğer deneylerde olduğu gibi geçirimsizlik deneyinde de katmanlar arasına harç uygulaması ile soğuk derz etkisinin azalmasıyla numunelerin geçirimsizlik performansının arttığı saptanmıştır.

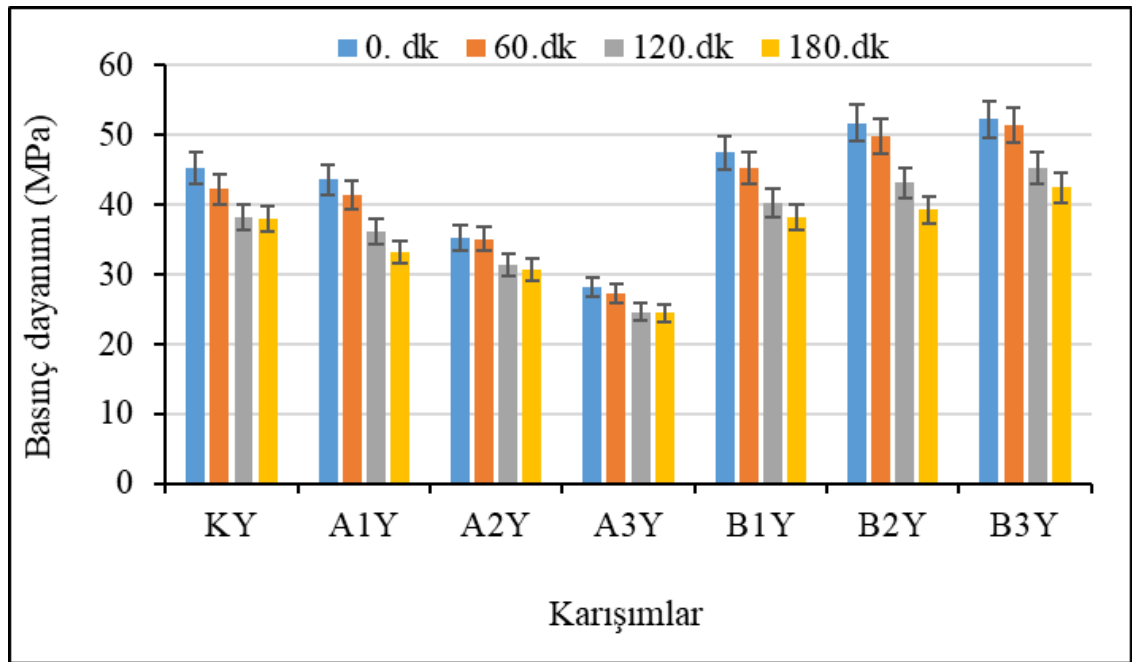
Çizelge 4.9. Katmanlar arası harç kullanılan ve kullanılmayan karışımların G2 yönündeki bağıl su işleme derinliği

Karışım	0 dakika	60 dakika	120 dakika	180 dakika
	G2 yönündeki bağıl geçirimsizlik (%)			
K	100	121	194	Olumsuz
A1	100	115	179	Olumsuz
A2	100	113	Olumsuz	Olumsuz
A3	100	108	Olumsuz	Olumsuz
B1	100	125	205	Olumsuz
B2	100	125	204	Olumsuz
B3	100	132	202	Olumsuz
KH	100	110	127	166
A1H	100	114	116	145
A2H	100	105	108	117
A3H	100	107	116	128
B1H	100	110	120	138
B2H	100	108	125	142
B3H	100	109	119	144

4.5. SSB'lerin Katmanları Arasında Kullanılan Aderans Arttırıcı Kimyasal Katkının Soğuk Derzin Oluşumuna ve Mekanik Özelliklerine Etkisi

4.5.1. Basınç dayanımı sonuçları

Katmanlar arası aderans arttırıcı kimyasal katkı kullanılan karışımların 28 günlük basınç dayanımı Şekil 4.8'de verilmiştir. Deney sonuçlarından görüldüğü gibi söz konusu aderans arttırıcı kimyasal katkının katmanlar arasına uygulanması SSB'lerin basınç dayanımına kayda değer bir etkisi olmamıştır.



Şekil 4.8. Katmanlar arasında aderans arttırıcı kimyasal yapıştırıcı uygulanan SSB'lerin 28 günlük basınç dayanımı

İki katman arası aderans arttırıcı kimyasal katkı kullanılan ve kullanılmayan karışımların katmanlar arası yerleştirme gecikmesinin SSB'lerin basınç dayanımına etkisini daha iyi anlamak için ikinci katmanın yerleştirme zamanı 0 dakika olan numunelerin basınç dayanımı esas alınarak 60, 120 ve 180 dakika sonra yerleştirilen numunelerin bağıl basınç dayanımları Çizelge 4.10'da verilmiştir.

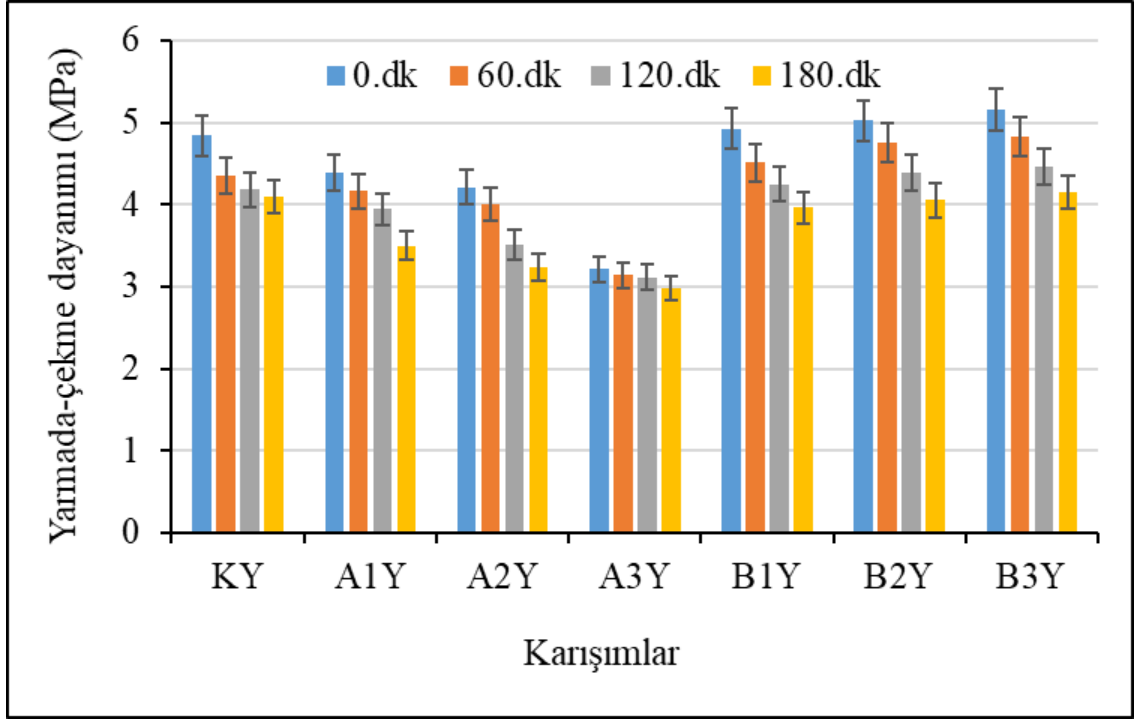
İkinci katmanı 180 dakika gecikme ile yerleştirilen SSB numuneler karşılaştırıldığında, katmanlar arasında aderans artırıcı kimyasal katkı kullanılmayan karışımların basınç dayanımı %15-24 mertebelerinde azalırken, katmanlar arasında aderans artırıcı kimyasal katkı kullanılan karışımlarda dayanım azalması %13-24 oranlarında olmuştur. Sonuçlardan görüldüğü gibi katmanlar arasında kullanılan aderans artırıcı kimyasal katkının basınç dayanımına kayda değer bir etkisi olmamıştır.

Çizelge 4.10. Katmanlar arası aderans artırıcı kimyasal katkı kullanılan ve kullanılmayan karışımların ikinci katmanın yerleştirme zamanı gecikmesine göre 28 günlük bağıl basınç dayanımı

Karışımlar	0.dk	60.dk	120.dk	180.dk
K	100	96	88	83
A1	100	99	87	76
A2	100	95	87	85
A3	100	97	88	81
B1	100	98	88	83
B2	100	97	85	81
B3	100	95	84	77
KY	100	93	84	84
A1Y	100	95	83	76
A2Y	100	99	89	87
A3Y	100	97	87	87
B1Y	100	95	85	80
B2Y	100	96	83	76
B3Y	100	98	87	81

4.5.2. Yarmada-çekme dayanımı sonuçları

Katmanlar arası aderans artırıcı kimyasal katkı kullanılan SSB karışımların yarmada-çekme dayanımları Şekil 4.9’da verilmiştir. Deney sonuçlarından görüldüğü gibi söz konusu aderans artırıcı kimyasal katkının katmanlar arasına uygulanması SSB’lerin yarmada-çekme dayanımını olumlu etkilemiştir.



Şekil 4.9. Katmanlar arasında aderans artırıcı kimyasal katkı uygulanan numunelerin 28 günlük yarmada çekme dayanımı

İki katman arası aderans artırıcı kimyasal katkı kullanılan ve kullanılmayan karışımların katmanlar arası yerleştirme gecikmesinin SSB'lerin yarmada-çekme dayanımına etkisini daha iyi anlamak için ikinci katmanın yerleştirme zamanı 0 dakika olan numunelerin yarmada-çekme dayanımı esas alınarak 60, 120 ve 180 dakika sonra yerleştirilen numunelerin bağıl yarmada-çekme dayanımları Çizelge 4.10'da verilmiştir.

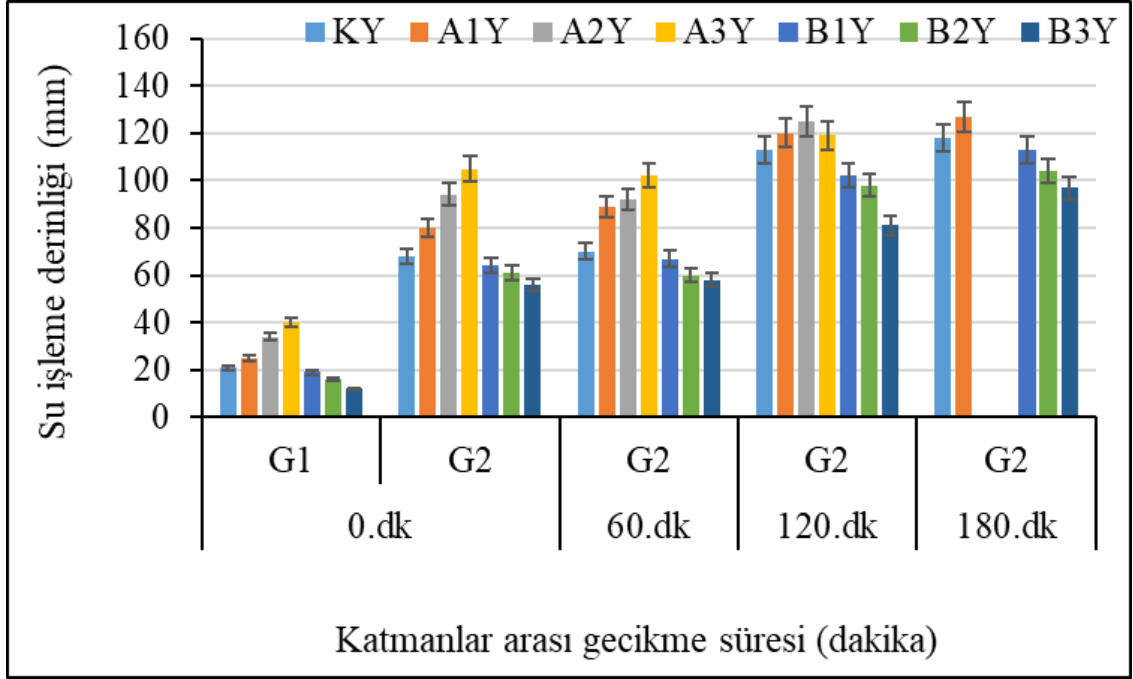
İkinci katmanı 180 dakika gecikme ile yerleştirilen SSB numuneler karşılaştırıldığında, katmanlar arasında aderans artırıcı kimyasal katkı kullanılmayan karışımların yarmada-çekme dayanımı %10-33 mertebelerinde azalırken, katmanlar arasında aderans artırıcı kimyasal katkı kullanılan karışımlarda dayanım azalması %7-23 oranlarında olmuştur.

Çizelge 4.11. Katmanlar arası aderans artırıcı kimyasal katkı kullanılan ve kullanılmayan karışımların ikinci katmanın yerleştirme zamanı gecikmesine göre 28 günlük bağlı yarmada-çekme dayanımı (%)

Karışımlar	0.dk	60 dk.	120.dk	180 dk.
K	100	87	79	69
A1	100	83	80	67
A2	100	97	94	90
A3	100	98	86	82
B1	100	95	81	75
B2	100	93	79	71
B3	100	85	83	67
KY	100	90	86	85
A1Y	100	95	90	80
A2Y	100	95	83	77
A3Y	100	98	97	93
B1Y	100	92	86	80
B2Y	100	95	87	81
B3Y	100	94	87	81

4.5.3. Basınçlı su altında su işleme derinliği deneyi sonuçları

Katmanlar arası aderans artırıcı kimyasal katkı kullanılan karışımların basınç altında su işleme derinliği değerleri Şekil 4.10’da verilmiştir. Deney sonuçlarından görüldüğü gibi söz konusu aderans artırıcı kimyasal katkının katmanlar arasına uygulanması SSB’lerin basınçlı su altında su işleme derinliği sonuçlarını olumlu etkilemiştir.



Şekil 4.10. Katmanlar arasında aderans artırıcı kimyasal katkı uygulanan numunelerin 28 günlük basınç altında su işleme derinliği

İki katman arası aderans artırıcı kimyasal katkı kullanılan ve kullanılmayan karışımların katmanlar arası yerleştirme gecikmesinin SSB'lerin basınçlı su altında su işleme derinliği etkisini daha iyi anlamak için ikinci katmanın yerleştirme zamanı 0 dakika olan numunelerin basınçlı su altında su işleme derinliği esas alınarak 60, 120 ve 180 dakika sonra yerleştirilen numunelerin bağıl basınçlı su altında su işleme derinliği dayanımları Çizelge 4.12'de verilmiştir.

İkinci katmanı 180 dakika gecikme ile yerleştirilen SSB numuneler karşılaştırıldığında, katmanlar arasında aderans artırıcı kimyasal katkı kullanılmayan karışımların basınçlı su altında su işleme derinliği sonucu alınamazken, katmanlar arasında aderans artırıcı kimyasal katkı kullanılan karışımlarda A2Y ve A3Y karışımlar hariç tüm numunelerden sonuç alınmıştır.

Çizelge 4.12. Katmanlar arası aderans artırıcı kimyasal katkı kullanılan ve kullanılmayan karışımların ikinci katmanın yerleştirme zamanı gecikmesine göre 28 günlük bağıl basınçlı su altında su işleme derinliği (%)

Karışımlar	0.dk	60.dk	120.dk	180.dk
	G2	G2	G2	G2
K	100	121	194	Olumsuz
A1	100	115	179	Olumsuz
A2	100	113	Olumsuz	Olumsuz
A3	100	108	Olumsuz	Olumsuz
B1	100	125	205	Olumsuz
B2	100	125	204	Olumsuz
B3	100	132	202	Olumsuz
KY	100	103	166	174
A1Y	100	111	150	159
A2Y	100	98	133	Olumsuz
A3Y	100	97	113	Olumsuz
B1Y	100	105	159	177
B2Y	100	98	161	170
B3Y	100	104	145	173

4.6. Katmanlar Arası İyileştirmede En Başarılı Yöntemin Seçilmesi

İkinci katmanı gecikme olmadan yerleştirilen ve 180 dakika gecikmeli yerleştirilen karışımların bağıl basınç dayanımları karşılaştırıldığında katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımların dayanımı %15-24 azalırken, bu azalma katmanlar arası harç uygulanan, priz geciktirici katkı içeren ve katmanlar arası aderans artırıcı uygulanan karışımlarda sırasıyla %10-17, %9-27 ve %13-24 olmuştur.

İkinci katmanı gecikme olmadan yerleştirilen ve 180 dakika gecikmeli yerleştirilen karışımların bağıl yarmada-çekme dayanımları karşılaştırıldığında katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımların dayanımı %10-33 azalırken, bu azalma katmanlar arası harç uygulanan, priz geciktirici katkı içeren ve katmanlar arası aderans artırıcı uygulanan karışımlarda sırasıyla %7-18, %15-24 ve %7-23 olmuştur.

İkinci katmanı gecikme olmadan yerleştirilen ve 180 dakika gecikmeli yerleştirilen karışımların bağıl su işleme derinliği karşılaştırıldığında katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlarda, A2Y ve A3Y karışımlarda numunelerden sonuç alınamazken, katmanlar arası harç uygulanan ve priz geciktirici katkı içeren karışımlarda geçirgenlik sırasıyla %17-66 ve %27-79 aralarında artmıştır.

SSB karışımların basınç dayanımı, yarmada-çekme dayanımı ve basınçlı su altında su işleme derinliği sonuçları dikkate alındığında soğuk derzin olumsuz etkilerini önleme bakımından en etkili yöntemin katmanlar arası harç uygulaması olduğu tespit edilmiştir. Bu yöntemlerden katmanlar arasında aderans artırıcı kimyasal yapıştırıcı uygulaması ise ikinci katmanın yerleştirme zamanının gecikmesi bakımından yöntemler arasında en başarısız olmuştur.

Çalışmanın devamında katmanlar arası harç uygulanan karışımların 28 ve 90 günlük basınç, yarmada-çekme, eğilme dayanımı, elastisite modülü, Poisson oranı, su emme, basınçlı su altında su işleme derinliği, donma-çözülme değerleri belirlenmiş ve katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlarla kıyaslanmıştır.

4.7. Katmanlar Arası Harç Uygulanan SSB Karışımların Özellikleri

4.7.1. Dayanım

K, A serisi, B serisi, KH, AH serisi ve BH serisi karışımların 28 ve 90 günlük basınç, yarmada-çekme ve eğilme dayanımı sonuçları sırasıyla Çizelge 4.13, 4.14 ve 4.15'te verilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü gibi tüm serilerde geçen zamanla çimentonun hidrasyon sürecinin devam etmesi ve özellikle uçucu külün puzolanik reaksiyonundan dolayı SSB karışımların 90 günlük dayanımları 28 günlük dayanımlarından daha yüksek olmuştur (Rao vd., 2016b). SSB karışımlarına uçucu külün ikame edilmesiyle genellikle A serisinde kontrol karışımına göre dayanımlarında azalma görülürken, B serisinde ise artış tespit edilmiştir. A serisindeki azalmanın su/bağlayıcı oranından kaynaklandığı, B serisindeki artışın ise uçucu kül miktarının fazla olmasının işlenebilirliğe ve dolayısıyla sıkışmaya sağladığı olumlu katkıdan kaynaklandığı düşünülmektedir (Mardani-Aghabaglou vd., 2013). Dolayısıyla karışımlara çimento yerine uçucu külün ikame edilmesi mekanik özellikleri olumsuz etkilemiştir (Pavan ve Rao, 2014; Rao vd., 2015).

Ayrıca katmanlar arası harç kullanılan numunelerin basınç, yarmada-çekme ve eğilme dayanımları harç kullanılmayan karışımlara göre genel olarak azda olsa artış göstermiştir.

Çizelge 4.13, 4.14 ve 4.15'ten de görüldüğü üzere katmanlar arası geçen sürenin artmasıyla soğuk derz etkilerinden dolayı dayanım değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Söz konusu bu azalmanın katmanlar arası harç içeren karışımlarda daha düşük oranlarda olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.13. Karışımların basınç dayanımı sonuçları (MPa).

Karışımlar	0 dk		60 dk		120 dk		180 dk	
	28 günlük	90 günlük	28 günlük	90 günlük	28 günlük	90 günlük	28 günlük	90 günlük
K	46,3	58,6	44,5	55,7	40,6	49,6	38,3	47,4
A1	41,7	50,1	41,4	52,0	36,2	44,2	31,5	39,7
A2	34,5	44,2	32,7	41,3	30,2	39,2	29,4	36,1
A3	29,1	38,5	24,8	36,2	22,4	30,6	20,8	26,9
B1	49,5	62,1	48,3	60,3	43,6	52,4	41,3	49,3
B2	52,0	64,1	50,6	61,2	44,1	54,7	42,4	50,1
B3	53,6	66,4	51,0	65,5	45,3	54,9	41,2	51,4
KH	48,7	57,3	45,9	54,9	43,8	51,4	42,6	48,1
A1H	42,4	51,4	42,1	52,7	39,5	46,3	38,1	44,4
A2H	36,2	45,9	34,1	43,6	32,5	40,2	31,4	38,7
A3H	27,4	37,4	27,6	35,5	26,3	33,5	23,6	29,1
B1H	51,3	64,1	48,4	61,5	46,6	54,7	45,3	52,6
B2H	53,0	65,2	47,7	62,9	47,9	56,1	46,9	55,1
B3H	53,1	68,7	48,3	66,1	46,5	55,0	43,9	56,3

Çizelge 4.14. Karışımların yarmada-çekme dayanımı sonuçları (MPa).

Karışımlar	0.dk		60.dk		120.dk		180.dk	
	28 günlük	90 günlük	28 günlük	90 günlük	28 günlük	90 günlük	28 günlük	90 günlük
K	4,7	5,0	4,1	4,4	3,7	3,9	3,2	3,4
A1	4,6	4,8	3,8	4,1	3,7	3,8	3,0	3,3
A2	3,5	3,7	3,4	3,7	3,2	3,6	3,1	3,3
A3	3,2	3,5	3,2	3,5	2,8	3,1	2,6	2,9
B1	4,7	4,7	4,5	4,5	3,8	4,2	3,5	3,9
B2	5,1	5,3	4,8	5,0	4,0	4,4	3,6	3,9
B3	5,0	5,4	4,2	5,1	4,1	4,6	3,3	4,1
KH	5,1	5,3	4,9	5,1	4,6	4,7	4,2	4,2
A1H	4,7	5,0	4,6	4,8	4,2	4,2	4,1	4,1
A2H	3,8	4,1	3,7	3,8	3,7	3,9	3,1	3,3
A3H	3,2	3,4	3,2	3,5	3,1	3,3	2,9	2,9
B1H	4,7	4,9	4,6	4,7	4,4	4,5	4,3	4,5
B2H	4,9	5,4	4,7	4,8	4,6	4,8	4,6	4,6
B3H	5,1	5,5	5,0	5,3	4,8	4,9	4,7	4,7

Çizelge 4.15. Karışımların eğilme dayanımı sonuçları (MPa)

Karışımlar	0. dk		60. dk		120. dk		180. dk	
	28 günlük	90 günlük	28 günlük	90 günlük	28 günlük	90 günlük	28 günlük	90 günlük
K	5,05	5,57	4,14	5,21	3,25	4,28	3,2	3,95
A1	4,82	5,32	4,23	5,24	3,17	4,17	3,11	3,74
A2	4,68	4,94	4,09	4,81	3,14	4,05	3,02	3,52
A3	3,85	4,55	3,56	4,43	3,32	3,95	3,01	3,41
B1	5,14	5,71	4,03	5,45	3,35	4,51	3,32	3,97
B2	5,43	5,92	4,28	5,67	3,31	4,68	3,29	4,06
B3	5,48	6,14	4,82	5,96	3,73	4,87	3,11	4,15
KH	5,24	5,75	5,2	5,54	4,06	5,17	3,94	4,75
A1H	4,91	5,62	4,71	5,41	4,21	5,09	3,87	4,71
A2H	4,72	5,24	4,53	5,16	4,15	4,95	3,92	4,48
A3H	4,19	4,86	3,73	4,71	3,31	4,51	3,14	4,02
B1H	5,2	5,77	4,67	5,69	4,23	5,32	3,95	4,97
B2H	5,27	5,98	4,83	5,74	4,46	5,28	4,05	5,07
B3H	5,54	6,34	4,9	6,17	4,35	5,84	4,15	5,26

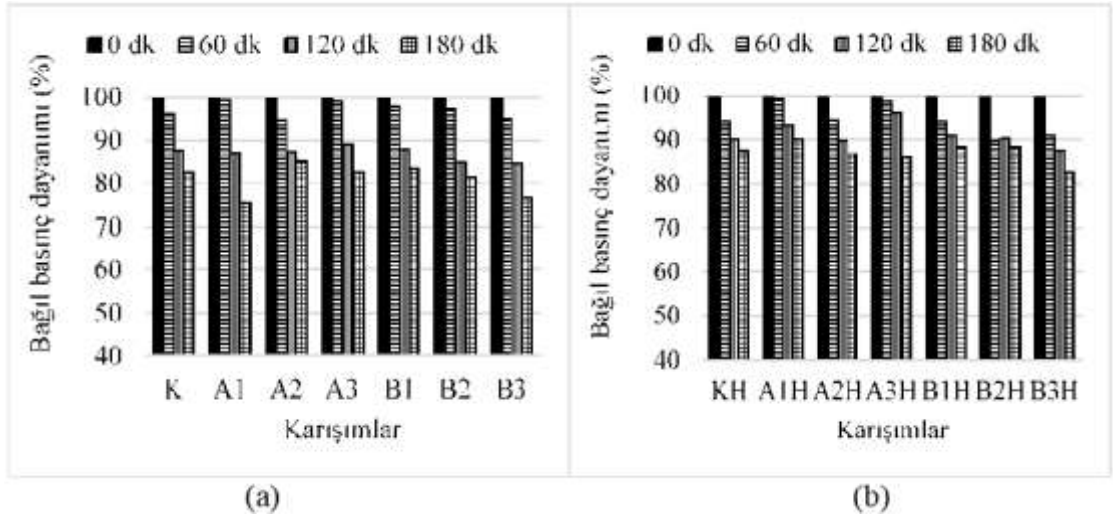
İkinci katmanın yerleştirme zamanının gecikmesinin SSB'lerin dayanımına etkisini daha iyi anlamak için ikinci katmanı hemen yerleştirilen (0. dk) numunelerin dayanımları esas alınarak 60, 120 ve 180 dakika sonra yerleştirilen numunelerin 28 günlük bağıl basınç, yarmada-çekme ve eğilme dayanımları sırasıyla Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13'te gösterilmiştir.

Sonuçlardan anlaşıldığı gibi ikinci katmanının 60 dakika sonra yerleştirilmesi durumunda basınç dayanımı bakımından B2H ve B3H karışımları hariç diğer karışımlarda kayda değer bir dayanım kaybı gözlemlenmemiştir. Yarmada-çekme dayanımı bakımından ise katmanlar arası harç uygulanan numuneler olumlu performans gösterirken, A2, A3, B1 ve B2 karışımları hariç diğerlerinde olumsuz etkiler görülmüştür. Eğilme dayanımları incelendiğinde A3, KH, A1H ve A2H karışımları hariç diğerlerinde %20 mertebelerine kadar dayanımlarda azalma meydana gelmiştir.

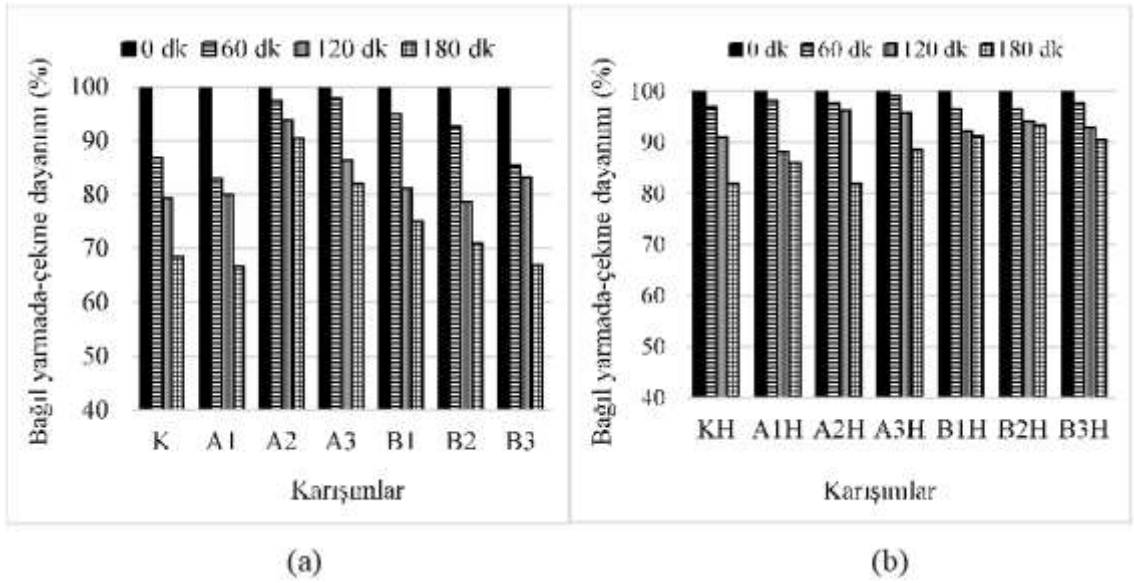
İkinci katmanı 120 ve 180 dakika gecikmeli yerleştirilen numunelerde söz konusu dayanımların kaybının daha fazla olduğu görülmüştür. Bu durum katmanlar arası gecikme zamanının artmasıyla soğuk derz etkilerinin meydana gelmeye başladığını göstermektedir. Özellikle katmanlar arası gecikmenin 180 dk olmasıyla katmanlar arası kenetlenmenin zamana bağlı zayıfladığını ve soğuk derz oluşumunun bariz bir şekilde ortaya çıktığını göstermektedir (Qian vd., 2018).

İkinci katmanı 180 dakika gecikme ile yerleştirilen SSB numuneleri karşılaştırıldığında, katmanlar arasında harç kullanılmayan karışımların basınç dayanımı, yarmada-çekme dayanımı ve eğilme dayanımı sırasıyla %15-24, %10-33, %22-43 mertebelerinde azalırken, katmanlar arasında harç kullanılan karışımlarda ise bu azalma %10-17, %7-18 ve %17-25 oranlarında olmuştur. Söz konusu azalma oranlarından da görüldüğü gibi katmanların yerleştirme gecikmesinden en az basınç dayanımı etkilenirken, en fazla eğilme ve yarmada-çekme dayanımları etkilenmiştir. Bu bağlamda katmanlar arası harç uygulaması eğilme ve yarmada-çekme dayanımlarının korunmasında basınç dayanımına kıyasla daha başarılı olmuştur.

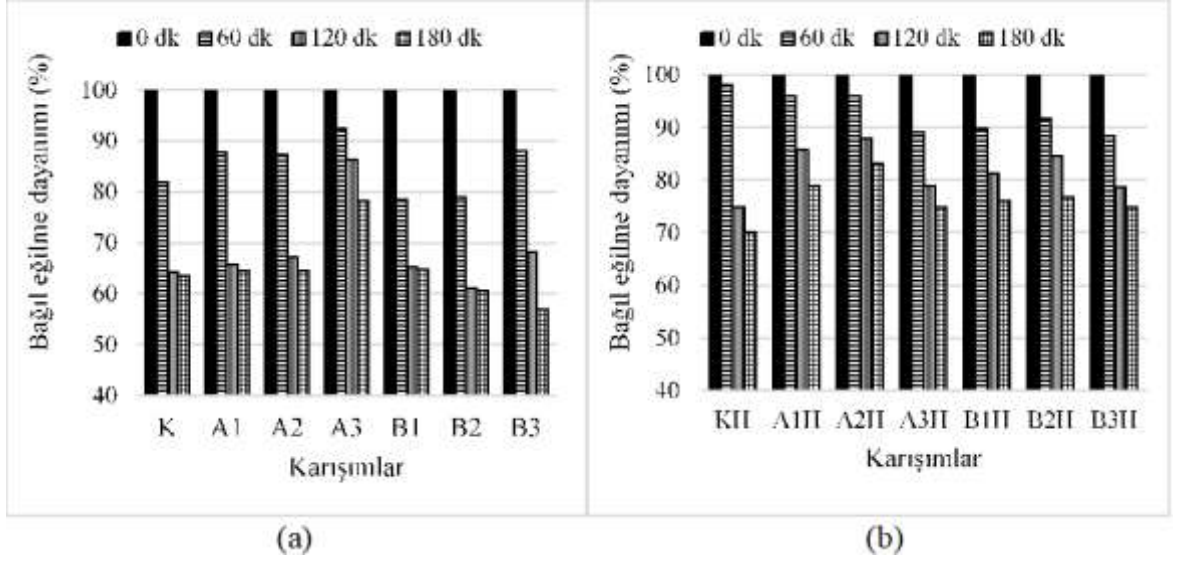
Ayrıca numunelerin kürlenme sürelerinin 90 güne çıkarılmasıyla bu oranlarda azalma meydana gelmiştir. Bu bağlamda katmanlar arasında meydana gelen soğuk derzin dayanım üzerindeki olumsuz etkisi katmanlar arasında harç kullanılması ve kürlenme süresinin artırılması ile azalmaktadır.



Şekil 4.11. Karışımların ikinci katmanın yerleştirme zamanına göre 28 günlük bağıl basınç dayanımı (%). (a) katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmamış. (b) Katmanlar arası harç uygulanmış



Şekil 4.12. Karışımların ikinci katmanın yerleştirme zamanına göre 28 günlük bağıl yarmada-çekme dayanımı (%). (a) katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmamış. (b) Katmanlar arası harç uygulanmış.

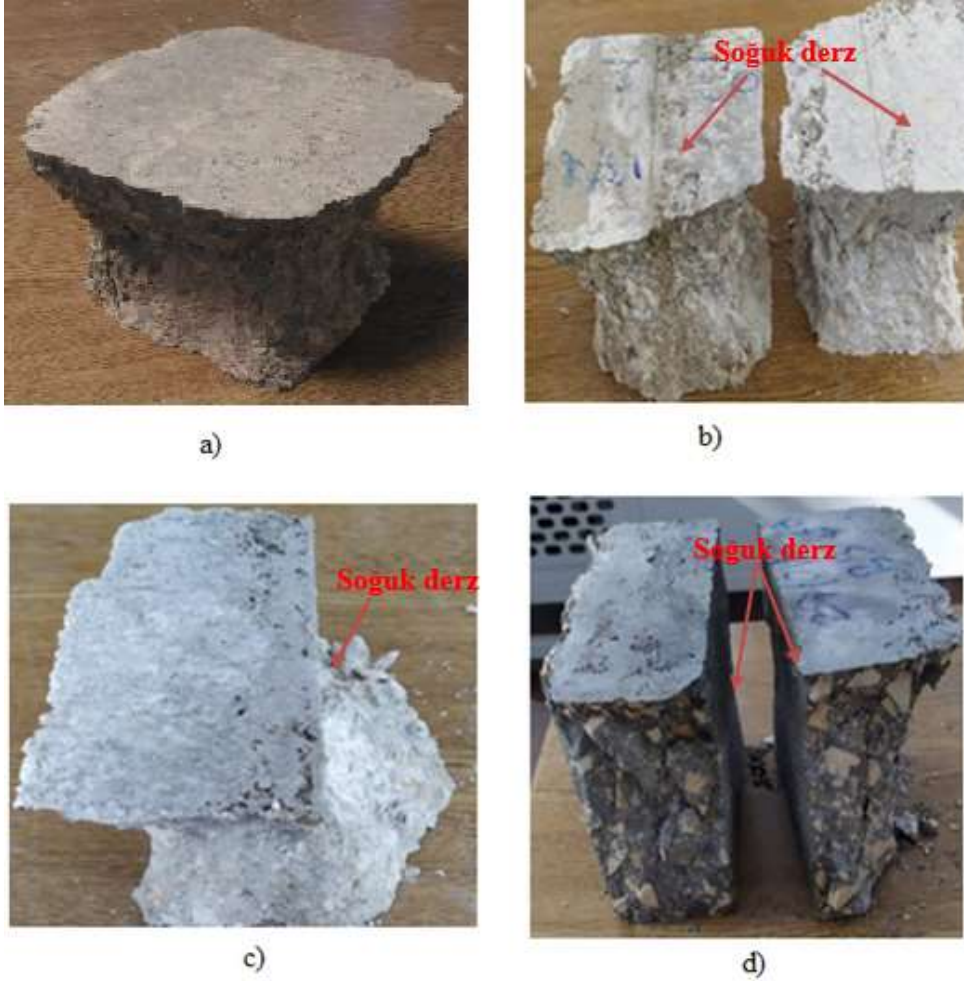


Şekil 4.13. Karışımların ikinci katmanın yerleştirme zamanına göre 28 günlük bağıl eğilme dayanım kaybı (%). (a) katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmamış. (b) Katmanlar arası harç uygulanmış.

İlk tabakanın dökümünden sonra geçen zamanla hidrasyon sonucu C-S-H jellerinin artmasıyla çimentolu sistem tiksotropik davranışını kaybeder ve betonun yüzeyi sertleşmeye başlar. Bu aşamada, ikinci tabakanın yerleştirilmesi esnasında agregalarının ilk tabakaya nüfuz etmesi zorlaşmaktadır. Böylece, iki katman arasında soğuk derz oluşmaktadır. Bu derz kesitine, betonun iç kısmından daha az agrega parçacıkları ve daha yüksek hamur hacmi geçer. İlk katmanın yüzeyi sertleştiği zaman, bu yüzeyde pürüzlülük de az olduğundan kesitte bir duvar etkisi oluşur ve katmanlar arasındaki kenetlenme zayıflar (Ribeiro vd., 2001; Aguiar vd., 2002; Qian vd., 2018; Liu vd., 2018).

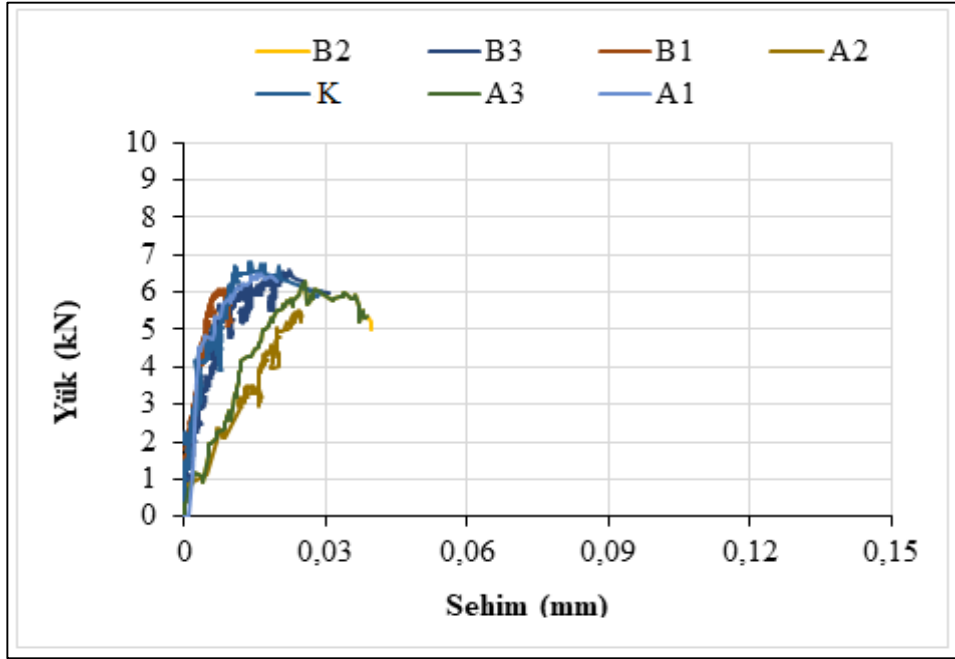
İkinci katmanı 0, 60, 120 ve 180 dakika gecikme ile yerleştirilmiş SSB numunelerin basınç deneyi sonrası görünüşleri Şekil 4.14'te gösterilmiştir. Şekil 4.14'te görüldüğü gibi ikinci katmanın yerleştirme zamanı geciktikçe oluşan soğuk derzin etkisi artmıştır. Örneğin, ikinci katmanı 60 dakika sonra yerleştirilen numunelerde katmanların birleştiği yerden hafif bir derz oluşmuştur (Şekil 4.14b). 180 dakika ara ile ikinci katmanı yerleştirilen numunelerde ise soğuk derze paralel uygulanan basınç yükü etkisiyle, numunelerin soğuk derz kesitinden yarıldığı gözlemlenmiştir (4.14d). Bu bağlamda SSB'lerde iki katmanın birleştiği bölgede katmanların yerleştirme zamanına bağlı olarak

soğuk derz oluşumunun kaçınılmaz olduğu, bu etkinin gecikme süresinin artışıyla daha da belirgin olduğu tespit edilmiştir.

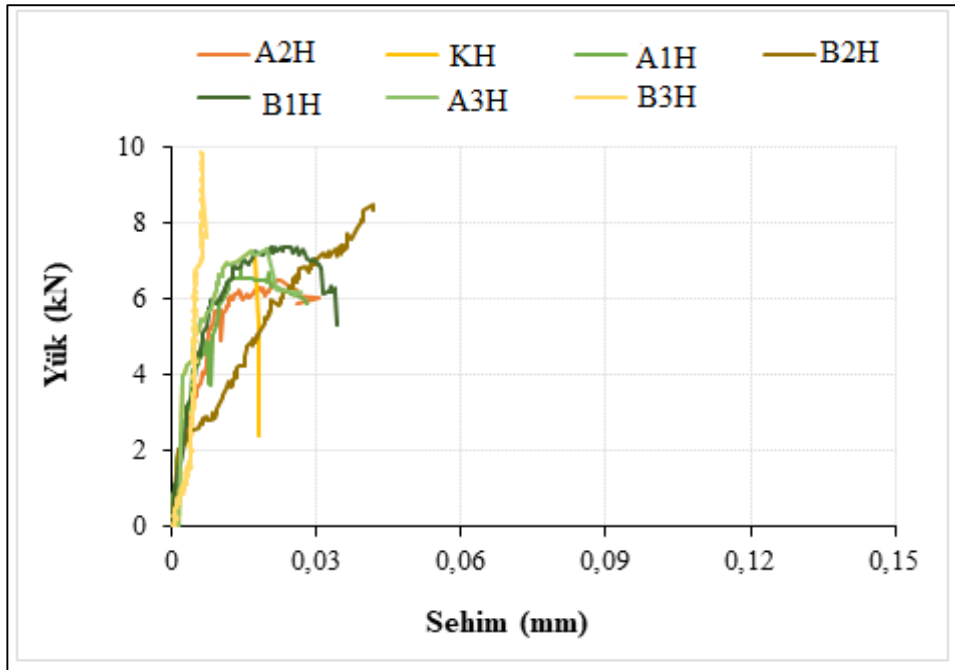


Şekil 4.14. Basınç deneyi uygulanmış SSB numuneler. İkinci katmanı; a) 0. dk gecikme ile yerleştirilen numune, b) 60. dk gecikme ile yerleştirilen numune, c) 120. dk gecikme ile yerleştirilen numune, d) 180. dk gecikme ile yerleştirilen numune

Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan ve katmanlar arası harç uygulanan karışımların eğilme deneyi sırasında ölçülen yük-sehim grafikleri sırasıyla Şekil 4.15 ve 4.16'da gösterilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü gibi SSB karışımları eğilme yüklemesi altında lifli betonlar kadar sünek davranış göstermeden geleneksel betonda olduğu gibi gevrek kırılma davranışı göstermiştir. Bu yüzden sehim değerleri geleneksel lifli betonlara kıyasla çok düşük mertebelerde olmuştur.

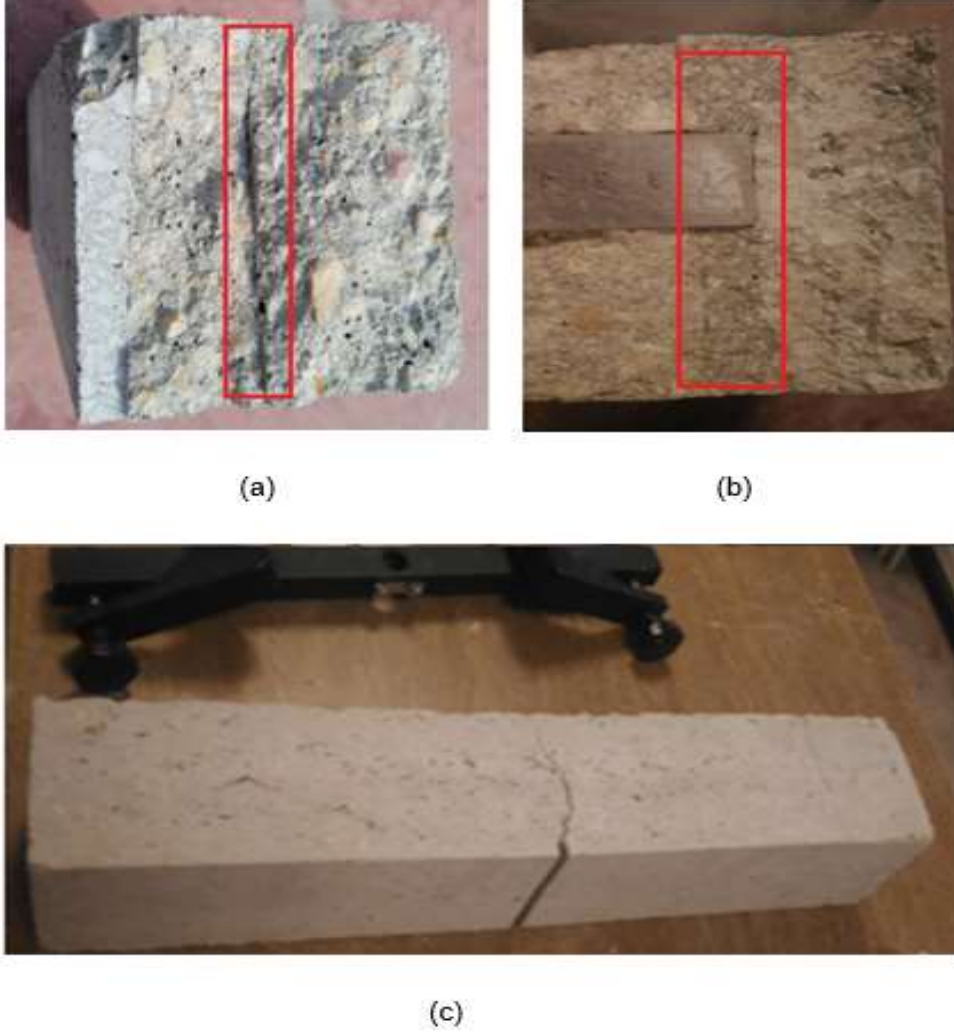


Şekil 4.15. Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan SSB karışımlarının yük-sehim eğrileri



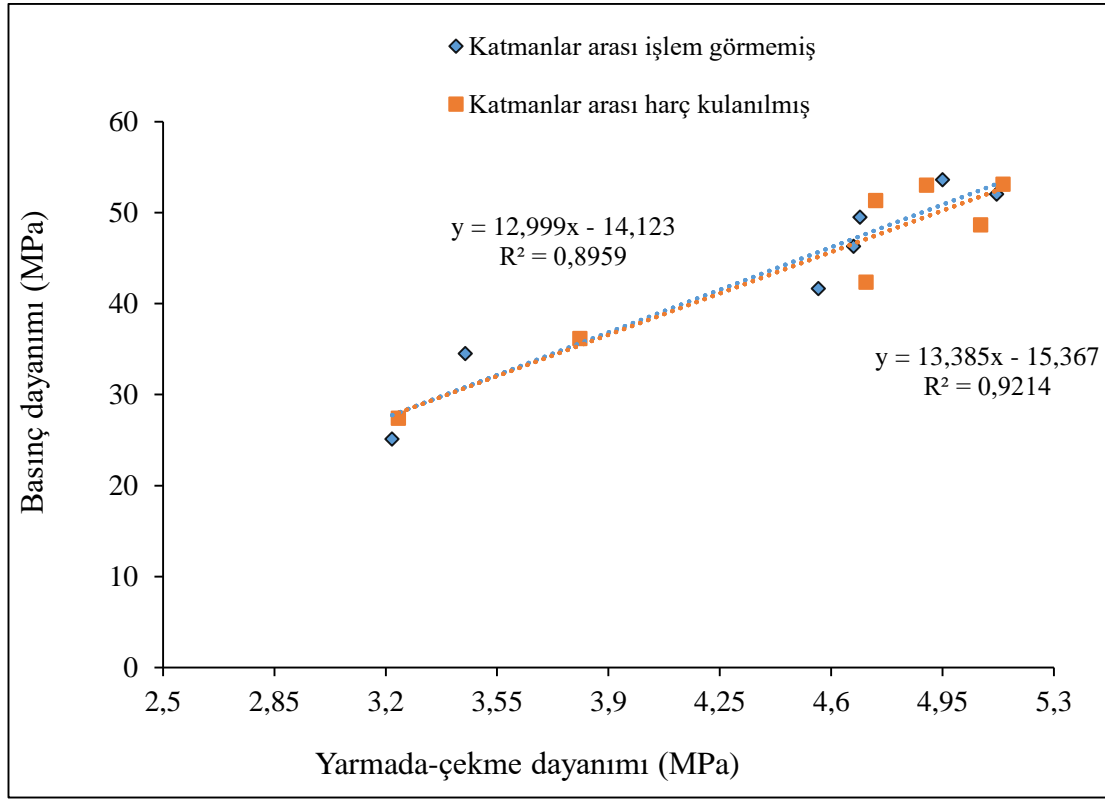
Şekil 4.16. Katmanlar arası harç uygulanan SSB karışımlarının yük-sehim eğrileri

İkinci katmanı 180 dakika gecikmeli yerleştirilen SSB numunelerin eğilme deneyi sonrası çatlak gelişimi ve kesitleri Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Şekil 4.17a’da görüldüğü gibi 2. katmanı 180 dakika sonra yerleştirilen kiriş numunelerinde katmanlar arasında soğuk derz oluştuğu fiziksel olarak görülmektedir. Şekil 4.17b’de ise katmanlar arası harç uygulanmasının Şekil 4.17a’daki uygulamaya göre fiziksel olarak katmanların aderansını artırdığı görülmüştür. Şekil 4.17c’de çatlak gelişimi gösterilmiştir.

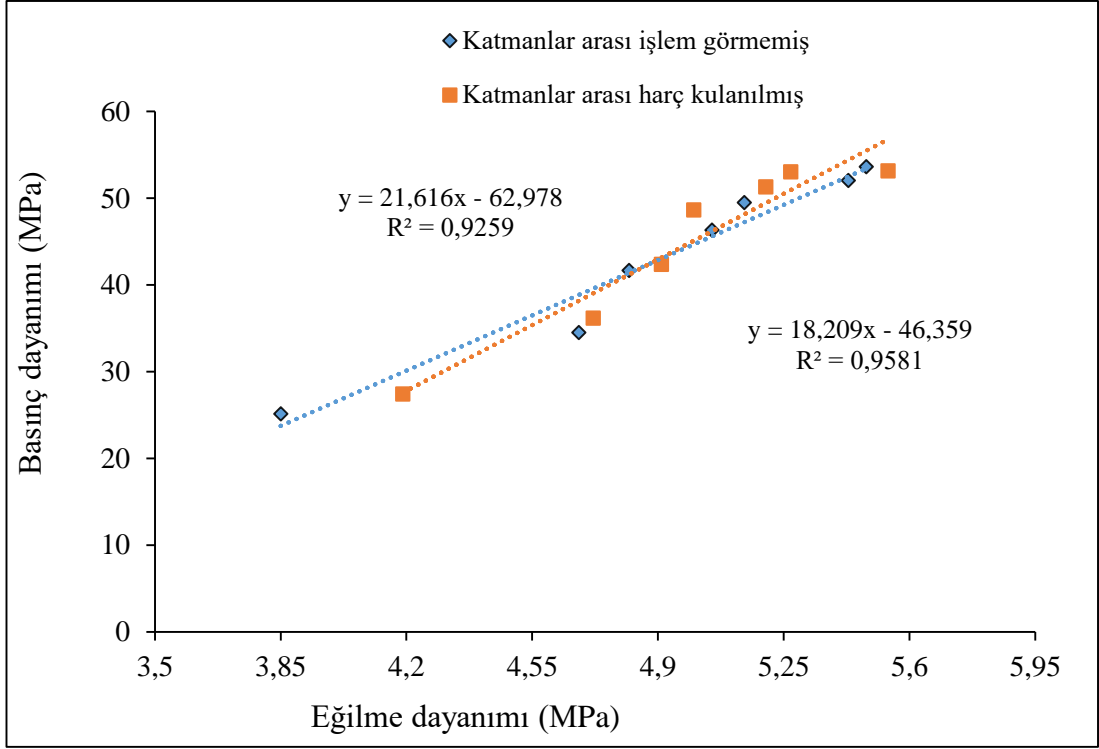


Şekil 4.17. İkinci katmanı 180 dakika sonra yerleştirilen numunelerin eğilme deneyi sonrası görünümü. **a)** Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan numune, **b)** Katmanlar arası 1 cm harç uygulanan numune, **c)** Eğilme deneyi sonrası çatlak gelişimi

SSB karışımların basınç ve yarmada-çekme dayanımı arasındaki ilişki Şekil 4.18’de, basınç ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki ise Şekil 4.19’da gösterilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi geleneksel betonlara benzer olduğu gibi SSB karışımlarının basınç-eğilme ve basınç-yarmada çekme dayanımları arasında doğrusal bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.18. SSB karışımların basınç ve yarmada çekme dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 4.19. SSB karışımların basınç ve eğilme dayanımı arasındaki ilişki

SSB karışımlarının basınç-eğilme ve basınç-yarmada çekme dayanımı oranları sırasıyla Çizelge 4.16 ve 4.17’de verilmiştir.

Çizelge 4.16 ve 4.17’de görüldüğü gibi ikinci katmanın 60, 120 ve 180 dakika gecikmeli yerleştirilen numunelerde, katmanlar arası gecikme uygulanmayan numunelere göre basınç dayanımı/eğilme dayanımı oranında cüzi bir artış görülmüştür. Ayrıca, sonuçlardan basınç dayanımının yarmada çekme ve eğilme dayanımına oranları yaklaşık 10 olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 4.16. SSB karışımlarda basınç dayanımının eğilme dayanımına oranı

Karışımlar	σ_b / σ_f	σ_b / σ_f	σ_b / σ_f	σ_b / σ_f
	0 dk	60 dk	120 dk	180 dk
K	9,2	10,8	12,5	12,0
A1	8,7	9,9	11,4	10,1
A2	7,3	8	11,4	10,1
A3	6,5	7	6,8	6,9
B1	9,6	12	13	12,4
B2	9,6	11,8	13,3	12,9
B3	9,8	10,6	12,2	13,2
Ortalama	8,7	10,0	11,5	10,9
KH	9,3	8,8	11,7	12,2
A1H	8,6	8,9	9,4	9,8
A2H	7,7	9,2	7,8	7,6
A3H	7,7	7,4	8	7,5
B1H	9,9	10,4	11	11,5
B2H	10,1	9,9	10,7	11,6
B3H	9,6	9,8	10,6	10,5
Ortalama	9,0	9,2	9,9	10,1

* σ_b ; Basınç dayanımı * σ_f ; Eğilme dayanımı

Çizelge 4.17. SSB karışımlarda basınç dayanımının yarmada çekme dayanımına oranı

Karışımlar	σ_b / σ_c	σ_b / σ_c	σ_b / σ_c	σ_b / σ_c
	0 dk	60 dk	120 dk	180 dk
K	9,9	10,9	11,0	12,0
A1	9,1	10,9	9,8	10,5
A2	9,9	9,6	9,4	9,5
A3	9,1	7,8	8,0	8,0
B1	10,5	10,7	11,5	11,8
B2	10,2	10,5	11,0	11,8
B3	10,7	12,1	11,0	12,5
Ortalama	9,9	10,4	10,2	10,9
KH	9,5	9,4	9,5	10,1
A1H	9,0	9,2	9,4	9,3
A2H	9,5	9,2	8,8	10,1
A3H	8,6	8,6	8,5	8,1
B1H	10,9	10,5	10,6	10,5
B2H	10,8	10,1	10,4	10,2
B3H	10,4	9,7	9,7	9,3
Ortalama	9,8	9,5	9,6	9,7

* σ_b ; Basınç dayanımı * σ_c ; Yarmada-çekme dayanımı

4.7.2. Elastisite modülü ve Poison oranı

Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmamış ve katmanlar arası harç uygulanan 28 ve 90 günlük numunelerin elastisite modülü değerleri Çizelge 4.18’de gösterilmiştir. 90 günlük numuneler üzerinde hesaplanan elastisite modülü değerleri puzolanik reaksiyon ve hidrasyon sürecinin devam etmesinden dolayı 28 günlüklerden daha yüksek olmuştur. SSB karışımlarına uçucu külün ikame edilmesiyle genellikle A serisinde kontrol karışımına göre elastisite modülü değerlerinde azalmalar görülürken, B serisinde artış tespit edilmiştir.

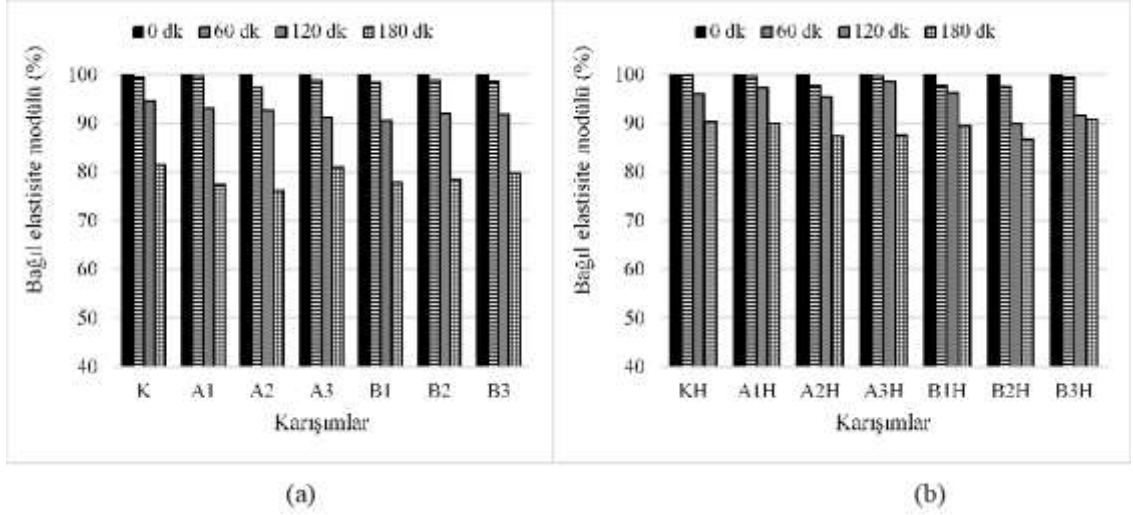
Katmanlar arası yerleştirme aralığının artmasıyla soğuk derzin olumsuz etkisinden dolayı numuneler üzerinde yük artışına bağlı olarak şekil değiştirmelerin daha fazla olduğu düşünülmektedir. Bu bağlamda Çizelge 4.18’de de görüldüğü gibi son katmanın yerleştirme zamanının gecikmesiyle bütün karışımların elastisite modülü değerleri azalmıştır.

28 günlük numunelerde katmanlar arasına harç uygulanmasıyla ikinci katmanı 0 ve 60 dakika sonra yerleştirilen numunelerin elastisite modülleri, benzeri harçsız numunelere göre %1-5 artarken, 120 ve 180 dakika sonra yerleştirilen numunelerde %2-19 bandında artış gözlemlenmiştir. 90 günlük numunelerde bu oranların %1 ve %1-11 mertebelerine kadar azaldığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda SSB karışımlarda katmanlar arasında harç uygulanması soğuk derz etkilerini azaltmış ve elastisite modülü değerleri üzerinde, göreceli olarak az da olsa, olumlu etki meydana getirmiştir.

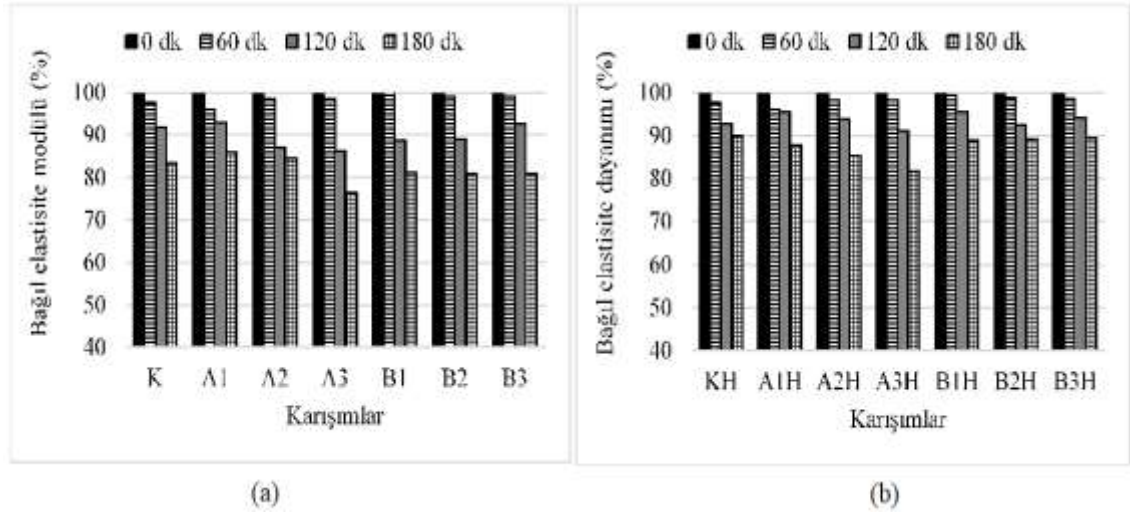
Çizelge 4.18. 28 ve 90 günlük SSB karışımların elastisite modülü değerleri (MPa).

Karışımlar	0 dakika		60 dakika		120 dakika		180 dakika	
	28 günlük	90 günlük	28 günlük	90 günlük	28 günlük	90 günlük	28 günlük	90 günlük
K	32746	33925	32554	33127	30971	31115	26664	28274
A1	31281	32312	31152	31012	29102	30054	24236	27745
A2	28501	31256	27715	30751	26386	27241	21713	26451
A3	25372	28411	25042	28015	23125	24464	20527	21678
B1	33156	34759	32625	34786	30012	30879	25815	28254
B2	33516	35174	33137	34815	30872	31274	26274	28465
B3	33874	35571	33401	35243	31106	32957	27011	28764
KH	32849	33975	32815	33251	31548	31476	29683	30579
A1H	31285	32570	31146	31274	30429	31104	28110	28564
A2H	29531	31442	28845	30874	28155	29537	25814	26846
A3H	26309	28817	26187	28314	25903	26275	23006	23572
B1H	33635	35186	32894	34985	32372	33558	30108	31312
B2H	35019	35532	34124	35104	31514	32894	30354	31657
B3H	35105	35870	34925	35312	32116	33715	31849	32042

Şekil 4.20 ve 4.21’de katmanlar arası harç kullanılan ve kullanılmayan karışımların 0 dakika yerleştirmeye göre 28 ve 90 günlük bağıl elastisite modülü yüzdeleri verilmiştir. İkinci katmanın 60, 120 ve 180 dakika gecikme ile yerleştirilmesi sonucu tüm serilerde bağıl elastisite modülü değerleri azalmıştır. Şekil 4.20’de görüldüğü gibi, zamana bağıl elastisite modülü değerlerindeki azalmalar katmanlar arası yerleştirme gecikmesi 60 dakika olduğunda %1-4 arasında, 120 dakika olduğunda %2-14, 180 dakika olduğunda ise %10-24 mertebelerinde belirlenmiştir. Bu bağlamda 28 ve 90 günlük numunelerde, katmanlar arası yerleştirme zamanının gecikmesinden kaynaklı, soğuk derz oluşumuna bağıl olarak elastisite modülündeki azalma oranları birbirlerine yakın olmuştur.



Şekil 4.20. 28 günlük numunelerin 0 dakikaya göre bağıl elastisite modülü değerleri (%) a)katmanlar arası işlem görmemiş. b) katmalar arası harç uygulanmış



Şekil 4.21. 90 günlük numunelerin 0 dakikaya göre bağıl elastisite modülü değerleri (%); a) katmanlar arası işlem görmemiş. b) katmalar arası harç uygulanmış

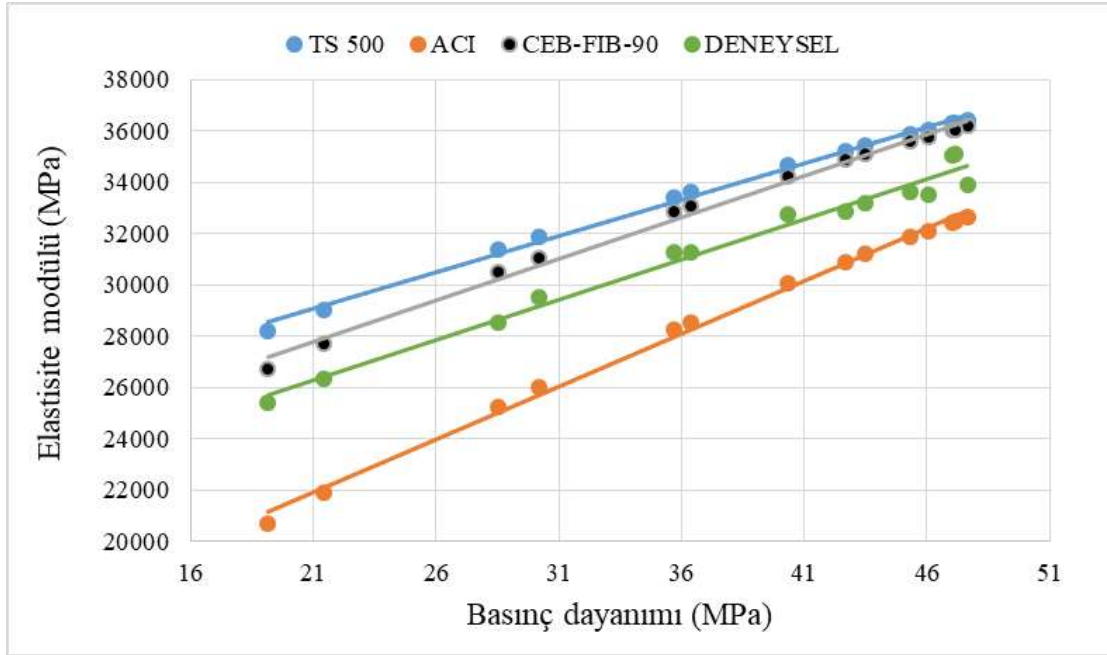
Şekil 4.22, 4.23 ve 4.24 ve 4.25'te katmanlar arası yerleştirme aralığı 0, 60 120 ve 180 dakika olan numunelerin deneysel olarak elde edilen 28 günlük elastisite modülü sonuçları ACI318-95, TS 500 ve CEB-FIB-90 standartların önerdiği ampirik formüller ile kıyaslanmıştır. Söz konusu ampirik formüller sırasıyla denklem 4.1, 4.2 ve 4.3'te verilmiştir. Bu formüllerde f^c betonun 28 günlük 150x300mm silindir dayanımı (MPa cinsinden), f_{cm} ise 28 günlük 150x300 mm ortalama silindir basınç dayanımını (MPa cinsinden) göstermektedir.

$$E_c = 4730\sqrt{f_c} \text{ MPa(ACI318-95)} \quad (4.1)$$

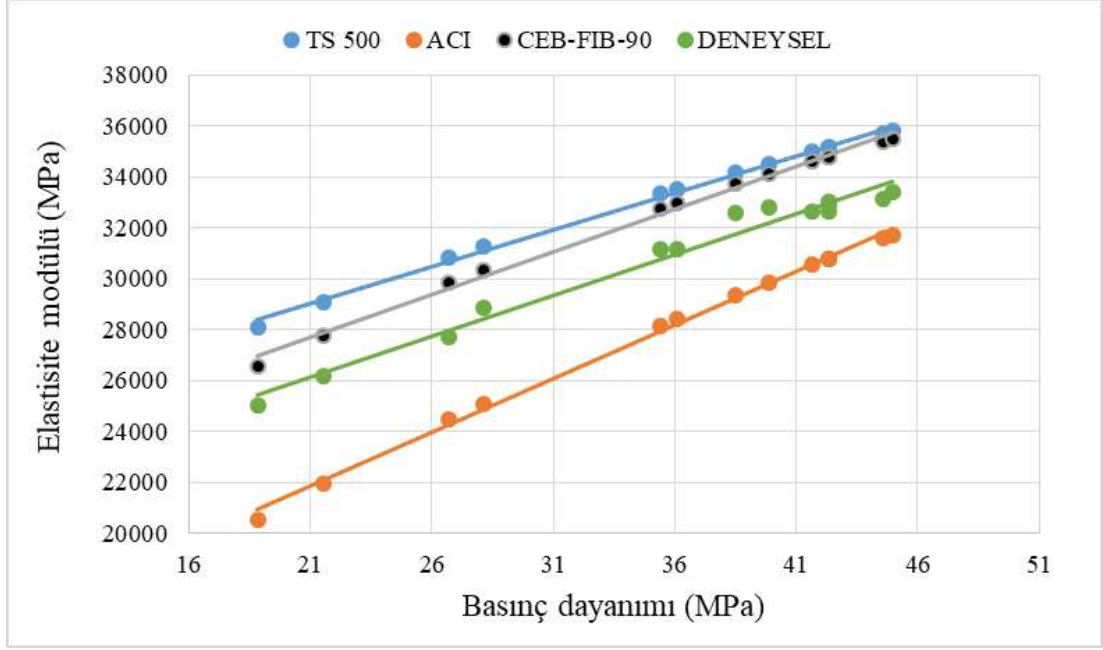
$$E_c = 3250\sqrt{f_{ck}} + 14000 \text{ MPa(TS500)} \quad (4.2)$$

$$E_c = 21500\left(\frac{f_{cm}}{10}\right)^{\frac{1}{3}} \text{ MPa(CEB-FIB-90)} \quad (4.3)$$

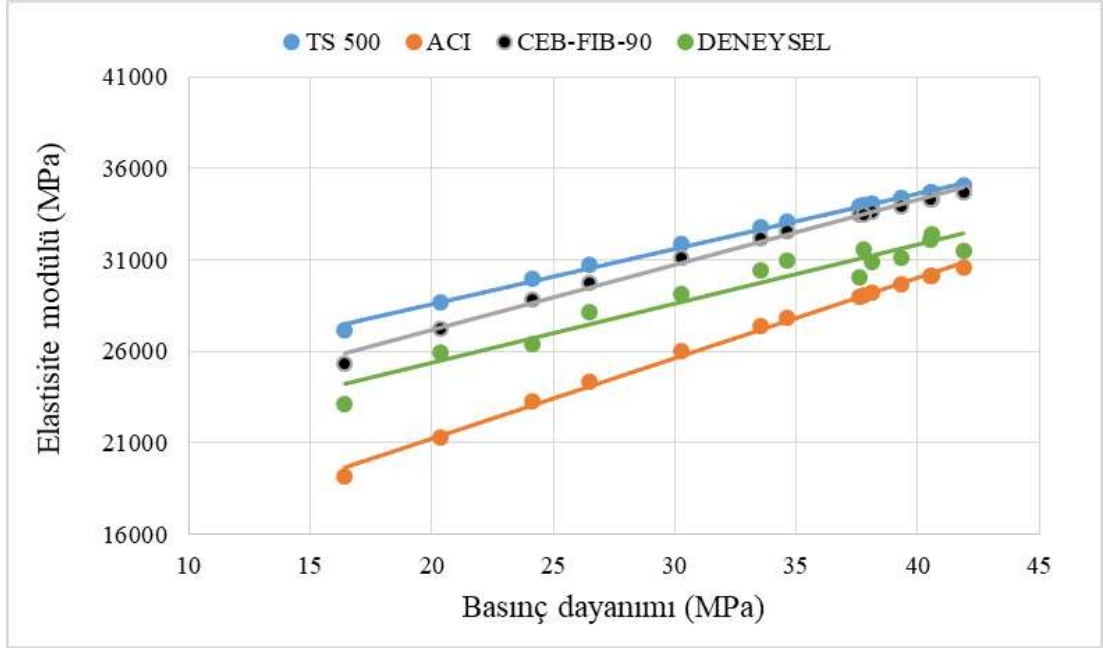
Şekil 4.22, 4.23 ve 4.24'te görüldüğü gibi katmanlar arası yerleştirme aralığı 0, 60 ve 120 dakika olduğunda deneysel olarak elde edilen elastisite modülü CEB-FIB-90 standardının önerdiği formülden elde edilen değerlere daha yakın olduğu görülmüştür. Ancak, Şekil 4.25'te görüldüğü gibi ikinci katmanı 180 dakika sonra yerleştirilen numunelerin elastisite modülü, ACI318-95 standardının önerdiği ampirik formülden elde edilen elastisite modülü değerlerine daha yakın çıkmıştır.



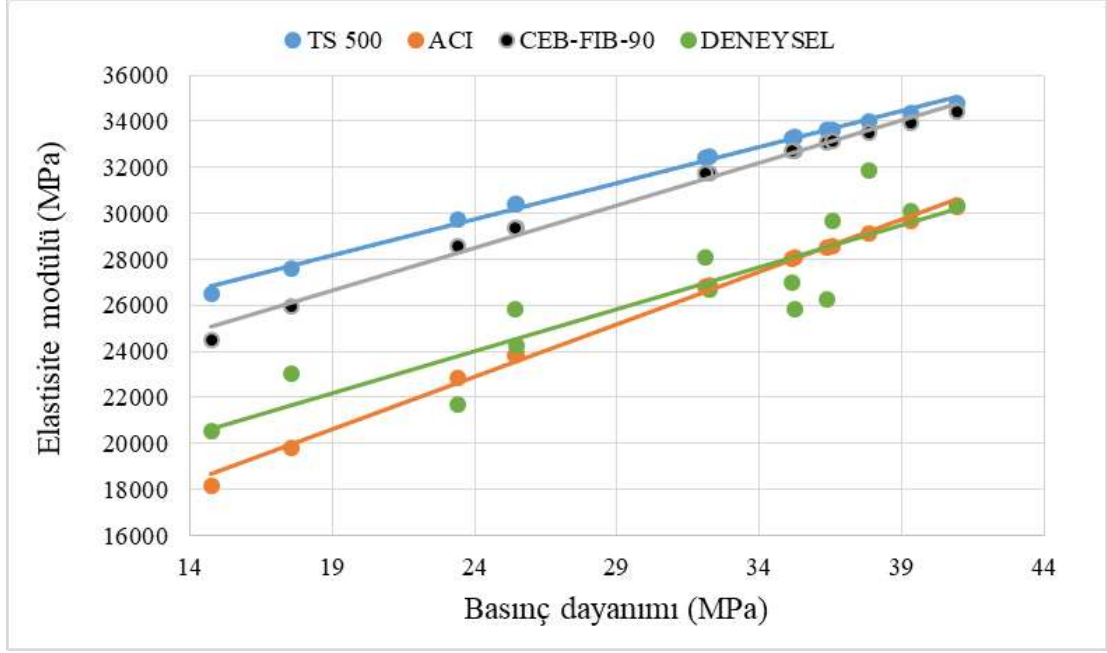
Şekil 4.22. Katmanlar arası gecikme olmayan numunelerin 28 günlük deneysel elastisite modülü değerlerinin farklı standartların önerdiği ampirik formüller ile kıyaslanması



Şekil 4.23. İkinci katmanı 60 dakika sonra yerleştirilen numunelerin 28 günlük elastisite modülü değerlerinin farklı standartların önerdiği ampirik formüller ile kıyaslanması



Şekil 4.24. İkinci katmanı 120 dakika sonra yerleştirilen numunelerin 28 günlük elastisite modülü değerlerinin farklı standartların önerdiği ampirik formüller ile kıyaslanması



Şekil 4.25. İkinci katmanı 180 dakika sonra yerleştirilen numunelerin 28 günlük elastisite modülü değerlerinin farklı standartların önerdiği ampirik formüller ile kıyaslanması

SSB'lerde deneysel çalışmadan elden edilen Poisson oranı 0.14-0.18 arasında değişiklik göstermiştir. Genel eğilim betonun dayanımı yükseldikçe Poisson oranı 0.14 değerine daha yakın olmuştur. Bu bağlamda SSB'lerde Poisson oranı geleneksel betona benzerlik göstermiştir.

4.7.3. Geçirgenlik özellikleri

Basınçlı su altında su işleme derinliği

Katmanlar arası her hangi bir işlem uygulanmamış ve katmanlar arası harç kullanılan karışımların 28 ve 90 günlük su işleme derinliği sonuçları Çizelge 4.19'da verilmiştir. 90 günlük numunelerde 28 günlük numunelere göre tüm serilerde çimentonun hidratasyonu ve puzolanik reaksiyonların devam etmesinden dolayı betonun su işleme derinliği değerlerinin azaldığı görülmektedir.

Çizelge 4.19. Katmanlar arasına harç uygulanan ve uygulanmayan karışımların basınç altında su işleme derinliği (mm)

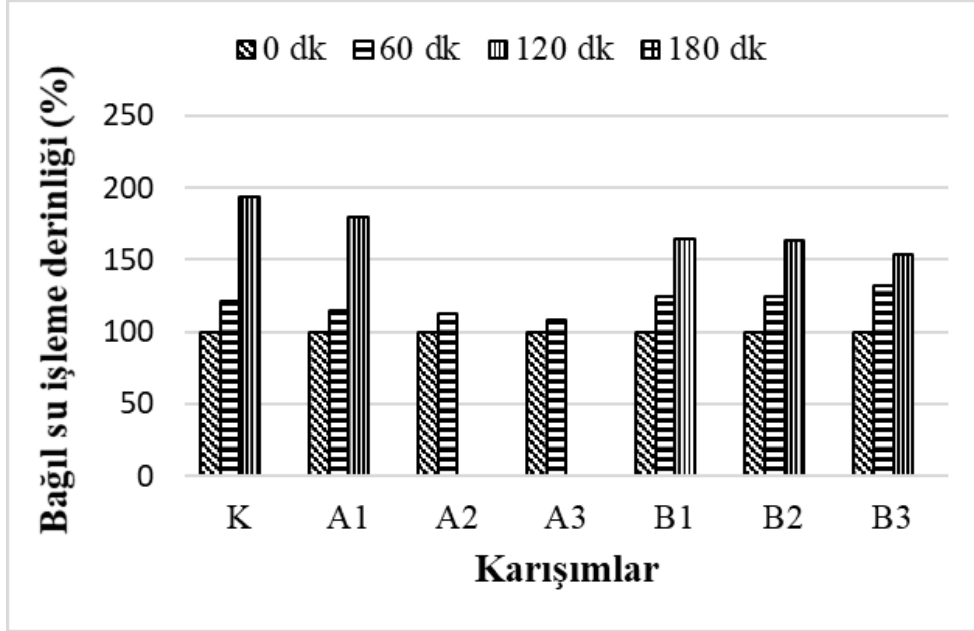
Karışımlar	0.dk				60.dk		120.dk		180.dk	
	28 günlük		90 günlük		28 günlük	90 günlük	28 günlük	90 günlük	28 günlük	90 günlük
	G1	G2	G1	G2	G2	G2	G2	G2	G2	G2
K	21	62	19	57	75	71	120	115	Olumsuz	Olumsuz
A1	25	73	14	70	84	80	131	124	Olumsuz	Olumsuz
A2	34	85	31	79	96	89	Olumsuz	Olumsuz	Olumsuz	Olumsuz
A3	40	99	38	94	107	102	Olumsuz	Olumsuz	Olumsuz	Olumsuz
B1	19	56	18	51	70	72	115	109	Olumsuz	Olumsuz
B2	16	52	14	47	65	58	106	102	Olumsuz	Olumsuz
B3	12	47	11	44	62	53	95	91	Olumsuz	Olumsuz
KH	21	41	19	35	45	42	52	49	68	65
A1H	25	49	14	44	56	51	57	54	71	68
A2H	34	62	31	55	59	54	64	62	69	67
A3H	40	67	38	61	72	68	78	75	86	85
B1H	19	40	18	34	44	41	48	44	55	51
B2H	16	36	14	32	39	35	45	41	51	48
B3H	12	32	11	27	35	32	38	36	46	42

İkinci katmanı 120 dakika gecikme ile yerleştirilen A2 ve A3 karışımlarında ve 180 dakika gecikme ile yerleştirilen katmanlar arası harç içermeyen karışımlarda basınçlı suyun numunenin tüm derinliğinden geçmesinden dolayı geçirgenlik sonucu alınamamıştır. Katmanlar arası harç uygulanan karışımların su işleme derinliği katmanlar arası harç uygulanmayan karışımlarına göre ciddi mertebede azalmıştır. Bu durum harç karışımların katmanlar arasındaki soğuk derz etkisini azaltmasından kaynaklanmaktadır.

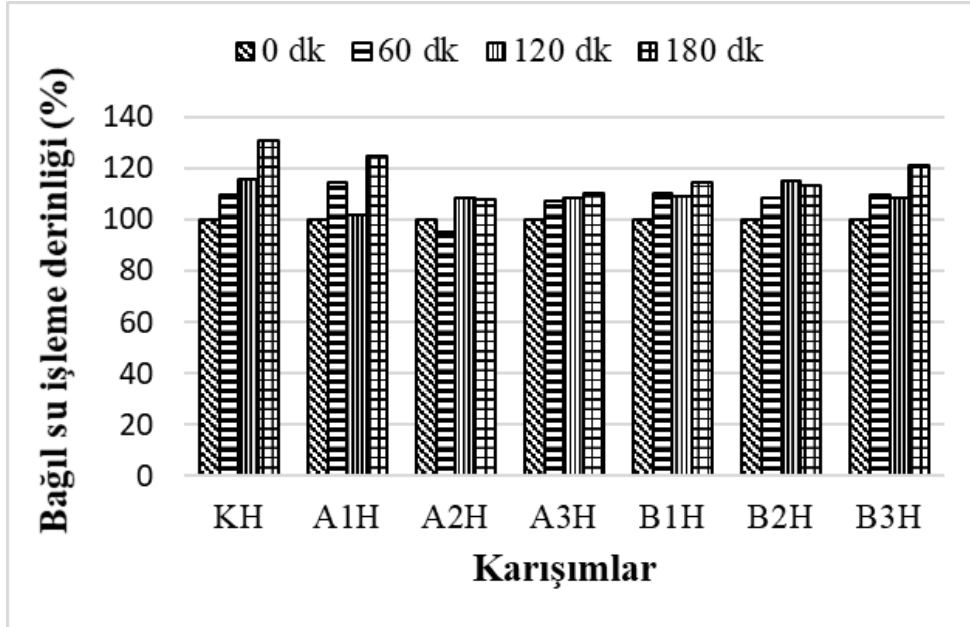
A serisi karışımlarda uçucu kül miktarının artmasıyla uçucu kül içermeyen karışımlara göre su işleme derinliğinin arttığı görülmüştür. Bu durumun karışımlardaki, uçucu kül içeriğinin artmasıyla çimento miktarının azalmasından ve S/B oranındaki artıştan kaynakladığı düşünülmektedir (Mardani-Aghabaglou, 2011).

Katmanlar arasında harç karışımı kullanılan B serisi karışımlarda ise agrega yerine uçucu kül kullanılması numunelerin su işleme derinliği değerlerini azaltmıştır. Önceden de belirtildiği gibi B serisi karışımlarda hamur fazı miktarı artmış ve su/bağlayıcı (S/B) oranı azalmıştır. Böylece katmanlar arası soğuk derz etkisi azalmış ve karışımların genel olarak geçirimsizliği azalma eğiliminde olmuştur.

İki katman arası harç kullanılan ve kullanılmayan karışımların katmanlar arası yerleştirme gecikmesinin etkilerini daha iyi yorumlayabilmek için sırasıyla Şekil 4.26 ve Şekil 27’de karışımların 0. dakikadaki değerleri referans alınıp 60. dakika, 120. dakika ve 180. dakikadaki değerleri bağıl olarak hesaplanmıştır.



Şekil 4.26. Katmanlar arası harç kullanılmayan 28 günlük bağıl su işleme derinliği

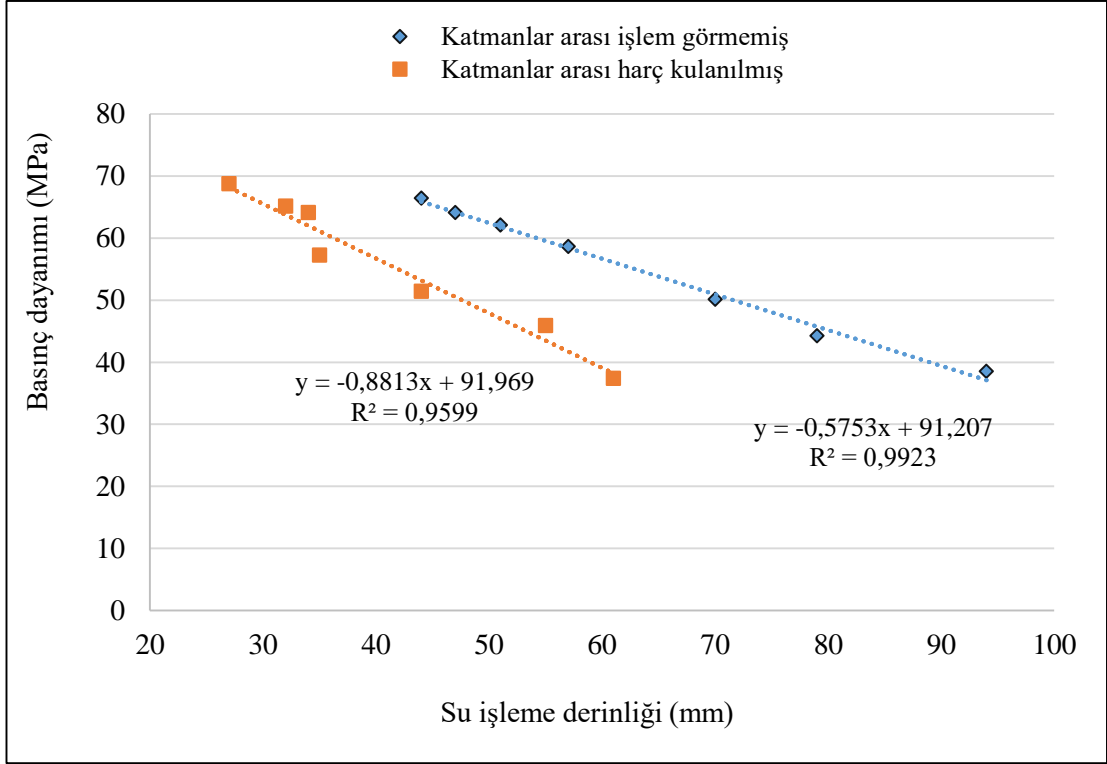


Şekil 4.27. Katmanlar arası harç kullanılan 28 günlük bağıl su işleme derinliği

Tüm karışımlarda ikinci katmanın yerleştirme zamanının gecikmesiyle geçirgenlik değerlerinde artış gözlemlenmiştir. Numunelerde, katmanlar arasına harç uygulanmasıyla (harç kullanılmayan karışımlara göre) geçirgenlik değerlerinde azalmalar görülmüştür. İkinci katmanın 60 dakika gecikmeli yerleştirilmesi, katmanlar arasında harç uygulanmayan karışımlarda %8-32 oranlarında artırmıştır. Ancak bu artış katmanlar arası harç uygulanan karışımlarda %5-14 oranlarında olmuştur. İkinci katmanın 120 ve 180 dakika gecikmeli yerleştirilmesi durumlarında ise katmanlar arasına harç uygulanması ile numune geçirgenliklerinde belirgin bir azalma gözlemlenmiştir. 180 dakika gecikmede harç uygulanan numunelerin geçirgenlik değerlerinde %8-31 arası artış görülürken, harç uygulanmayan numunelerde basınçlı su tüm numune boyunca geçmiştir. Diğer deneylerde olduğu gibi geçirimsizlik deneyinde de katmanlar arasına harç uygulaması ile soğuk derz etkisinin azalmasıyla numunelerin geçirimsizlik performansının arttığı saptanmıştır.

Katmanlar arasında yerleştirme gecikmesinin artmasıyla, katmanlar arasındaki boşluk miktarı arttığı ve bu boşluklar birbirleriyle birleşerek sürekli bir çatlak ağını oluşturduğu beyan edilmektedir. Bu bağlamda iki tabaka arasındaki geçiş bölgesinin düşük dayanımından dolayı bu derz kesitinin zayıf olduğu vurgulanmıştır (Qian vd., 2018). Basınçlı su altında su işleme derinliği deneyinde basınçlı suyun zayıf bölgedeki çatlaklar ve boşluklar vasıtasıyla sızma girişiminde bulunduğu düşünülmektedir. Ayrıca ikinci tabakası 180 dakika gecikmeli dökülen karışımlarda ilk tabakanın prizinin başladığı düşünülmektedir. Literatürde de belirtildiği üzere bu durumlarda katmanlar arasında soğuk derzin olumsuz etkileri bariz bir şekilde görülmektedir (Qian vd., 2018).

Şekil 4.28'de su işleme derinliği ve basınç dayanımı arasındaki ilişki gösterilmiştir. Görüldüğü gibi basınç dayanımı ve su işleme derinliği arasında doğrusal ve güçlü bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.28. Basınç dayanımı ve su işleme derinliği arasındaki ilişki

Su emme

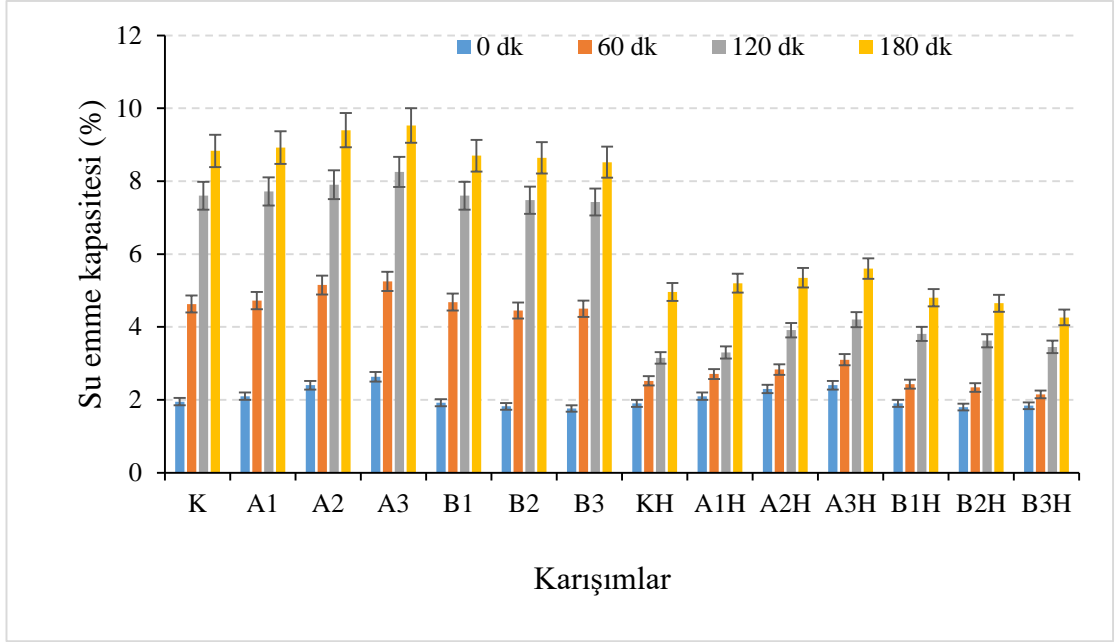
Betonun su emmesi ve geçirgenliği, betonun dayanım ve dayanıklılığını etkileyen önemli parametrelerden biridir (Banthia ve Mindess, 1989). SSB'nin hamur fazı betonun boşluk ve boşluk yapısını etkilemektedir (Yerramala vd., 2011; Azizmohammadi vd., 2021). Baraj yapılarında SSB'ler genellikle farklı zaman aralıklarıyla katmanlar halinde dökülmektedir. Bu yüzden SSB'nin geçirgenlik özellikleri normal betonunkinden çok farklı olmaktadır. Bu şekilde döküm yapıldığı zaman SSB'de katmanlar arasında entegrasyon problemi olabilir (Qian vd., 2018).

Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan ve harç uygulanan karışımların 90 günlük su emme oranları Şekil 4.29'da verilmiştir. Katmanlar arası harç uygulanan numunelerin su emme oranlarında soğuk derz etkilerinin azalmasından dolayı katmanlar arası harç uygulanmayan numunelere kıyasla azalma görülmüştür. ACI 546 (2014) raporunda belirtildiği üzere beton yüzey pürüzlülüğü yeni ve eski beton arasında bağ performansını etkileyen önemli parametrelerdendir. SSB'lerde katmanlar arası harç

uygulanması ile yüzey pürüzlülüğü artmış, böylece katmanlar arası mekanik kenetlenmenin (bağ dayanımı) ve katmanların birbirlerine olan aderansının arttığı düşünülmektedir. Sonuç olarak harç uygulanması ile soğuk derzin olumsuz etkileri azaltılmıştır (Diab vd., 2017; He vd., 2017). Ayrıca bazı araştırmacılar soğuk derz etkilerinin azalması için katmanlar arası harç uygulanmasını önermişlerdir (Qian vd., 2018; Liu vd., 2018; Zhu vd., 2020; Azizmohammadi vd., 2021).

Yerleştirme esnasından ikinci katmanın gecikmeli olarak yerleştirilmesi tüm karışımlarda su emme oranlarını artırmıştır. Söz konusu gecikmeye bağlı artış katmanlar arası harç uygulanan numunelerde daha az olmuştur. SSB'lerde katmanlar gecikmeli olarak yerleştirildiğinde karışımın su emmesi üzerinde soğuk derzin olumsuz yönde etkisi olmaktadır. İlk tabaka döküldükten sonra geçen zamanla hidrasyon ürünleri ve C-S-H jelleri oluşması ile karışım tiksotropik davranışını kaybeder. Betonun yüzeyinden su buharlaşmaya ve yüzey sertleşmeye başlar. Bu durumda ikinci tabaka agregalarının ilk tabakanın betonuna nüfuz etmesi zorlaşır ve iki tabaka arasında ayırım oluşmaktadır. Derz kesitinde betonun iç kesiminden daha az agrega ve daha fazla hamur fazı bulunmaktadır. Böylece ilk tabakanın yüzeyi sertleştiğinde derz kesitinde duvar etkisi (Wall effect) meydana gelmektedir (Ribeiro vd., 2001; Aguiar vd., 2002; Qian vd., 2018; Liu vd., 2018).

Ayrıca katmanlar arasında yerleştirme gecikmesinin artmasıyla, tabakalar arasında boşluk miktarının arttığı ve bu boşlukların birbirleriyle birleşerek sürekli bir çatlak ağını oluşturduğu Qian vd., (2018) ve Liu vd. (2018) tarafından beyan edilmektedir. Bu bağlamda iki tabaka arasındaki geçiş bölgesinin boşluk ve çatlaklara bağlı olarak düşük dayanımından dolayı bu derz kesitinin zayıf olduğu düşünülmektedir. Özellikle ikinci tabakası 180 dakika gecikmeli dökülen karışımlarda ilk tabakanın prizinin başladığı düşünülmektedir. Ayrıca katmanlar arası kenetlenmenin artmasını sağlayan katman yüzeyinin pürüzlülüğü de zamanla kaybolmaktadır (Aguiar vd., 2002). Bu durumlarda katmanlar arasında soğuk derzin olumsuz etkileri bariz bir şekilde görülmektedir. Bu sebeplere dayanarak Şekil 4.29'dan da görüldüğü üzere katmanlar arası gecikmenin artmasıyla numunelerin su emme oranlarının arttığı düşünülmektedir.



Şekil 4.29. Katmanlar arası harç uygulanan ve katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan 90 günlük karışımların su emme oranları

İkinci katmanın gecikmeli yerleştirilmesine bakılmaksızın, SSB karışımlarda çimento yerine ağırlıkça uçucu kül kullanılması (A serisi) numunelerin su emme oranlarını kontrol numunesine kıyasla artırmıştır. Bu olumsuz etkinin çimentonun yerine kül ikamesi ile karışımların optimum su muhtevasının artışına bağlı olarak su/bağlayıcı oranının artmasından kaynaklanmıştır. Benzer sonuçlar Mardani vd., (2013) tarafından da bildirilmiştir. Ancak A serisi karışımlarda katmanlar arası gecikmenin artması ile su emme oranlarındaki artış kontrol karışımına kıyasla daha az olmuştur. Bu artış oranındaki azalmada etkili parametre A serisi karışımların su/bağlayıcı oranlarının yüksek olması ve uçucu kül içermesidir. Karışımlarda su/bağlayıcı oranının artmasıyla tanecikler arasındaki mesafe artmakta ve yoğun kristalize bir hidrate yapı oluşturmak için daha fazla zamana ihtiyaç olmakta ve karışımın prizi gecikmektedir (Karimpour vd., 2010). A serisi karışımlarda bu mekanizmaların gerçekleşmesinden dolayı hidrate ürünler geç oluşmakta ve priz gecikmektedir. Böylece katmanlar arasında soğuk derzin olumsuz etkileri azalmaktadır.

Karışımlarda agrega yerine uçucu kül kullanılması (B serisi) su emme oranlarını düşürmüştür. Benzer davranış katmanlar arası harç uygulanan numunelerde de görülmüştür. Bu olumlu davranışın bağlayıcı miktarının artmasından ve uçucu külün fiziko-kimyasal etkisine bağlı olarak karışım boşluk hacminin azalmasından kaynaklandığı düşünülmektedir (Hazaree vd., 2011).

A serisi karışımlarda uçucu kül oranının artması olumsuz etki göstererek su emme oranlarının daha fazla artmasına sebep olurken, B serisi karışımlarda ise tersine su emme oranlarında daha belirgin bir azalma sağlamıştır.

Katmanlar arası gecikme olmayan tüm karışımların su emme değerlerinin, CEB-FIB (1989)'ın yaptığı sınıflandırmaya göre "iyi beton" için belirlenen sınır olan %3'ün altında olduğu tespit edilmiştir.

Katmanlar arası herhangi bir uygulama yapılmayan ve ikinci katmanı 60 dakika ve daha uzun sürede yerleştirilen numunelerin su emme oranları %3'ün üzerinde olmuştur. İkinci katmanı 60 dakika gecikmeli dökülen karışımlarda A2 ve A3 karışımları hariç CEP-FIB (1989)'a göre "orta beton (average concrete) (%3-5 arası)" sınıfındadır. İkinci katmanı 120 ve 180 dakika gecikmeli dökülen numuneler ise %5'ten daha fazla su emme oranına sahip olduğundan dolayı "kötü beton (bad concrete)" olarak sınıflandırılmıştır.

Katmanlar arası harç uygulanan ve ikinci katmanı 60 dk gecikmeli yerleştirilen numunelerin su emme oranı %3'ün altında olmuştur. İkinci katmanın yerleştirme süresi 120 ve 180 dakikaya yükselmesi durumunda numunelerin su emme kapasitesi %3'ün üzerinde olduğu tespit edilmiştir. İkinci katmanı 120 dakika gecikmeli dökülen numuneler "average concrete" sınıfındadır. Ancak ikinci katmanı 180 dk gecikmeli dökülen A serisi karışımların su emme oranları %5'in üzerinde olmuş ve CEP-FIB (1989)'a göre "kötü beton (bad concrete)" sınıfında olmuştur. Diğer kontrol ve B serisi karışımlar ise ikinci katmanı 180 dakika gecikmeli dökülmesine rağmen "average concrete" sınıfını korumuştur.

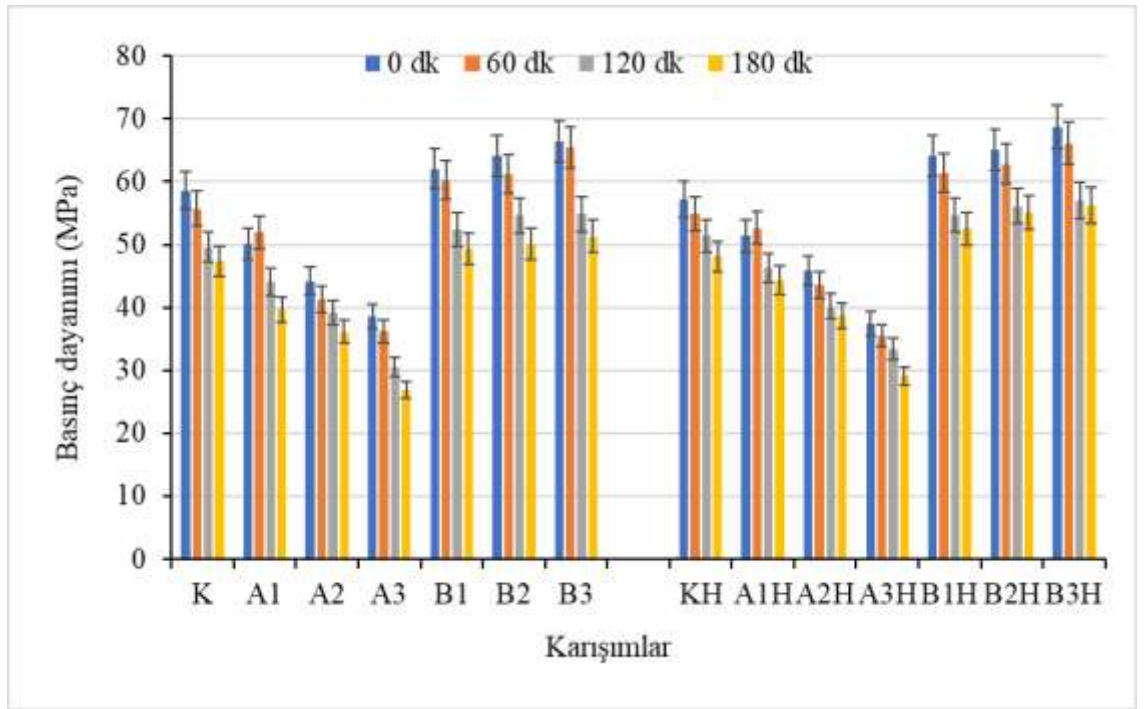
Sonuçlardan görüldüğü gibi SSB karışımlarda su emme oranlarında artışın SSB'de katmanlar arası kenetlenme zayıflığından ve soğuk derz oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca ikinci katmanın gecikmeli olarak yerleştirilmesi su emme

oranındaki artışın daha belirgin artmasına sebep olmuştur. Literatürde yapılan benzer çalışmalardan görüldüğü üzere katmanlar arası yerleştirme süresinin artışıyla soğuk derz oluşumunun kaçınılmaz olduğu açıklamıştır (Ribeiro vd., 2001; Aguiar vd., 2002; Qian vd., 2018; Liu vd., 2018). Ancak katmanlar arası harç uygulaması soğuk derz etkilerini azaltacağından su emme oranlarının azalmasını sağlamıştır.

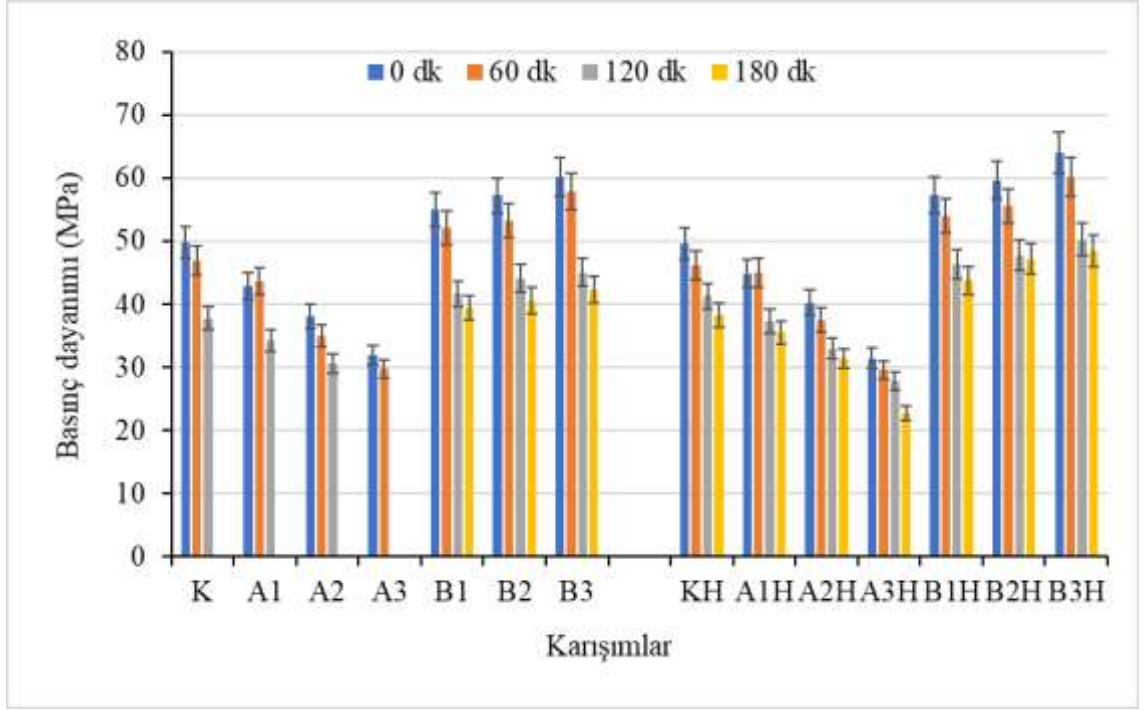
4.7.4. Donma-Çözülme Direnci

Donma-çözülme etkisinde kalan SSB karışımlarının basınç dayanım kaybı

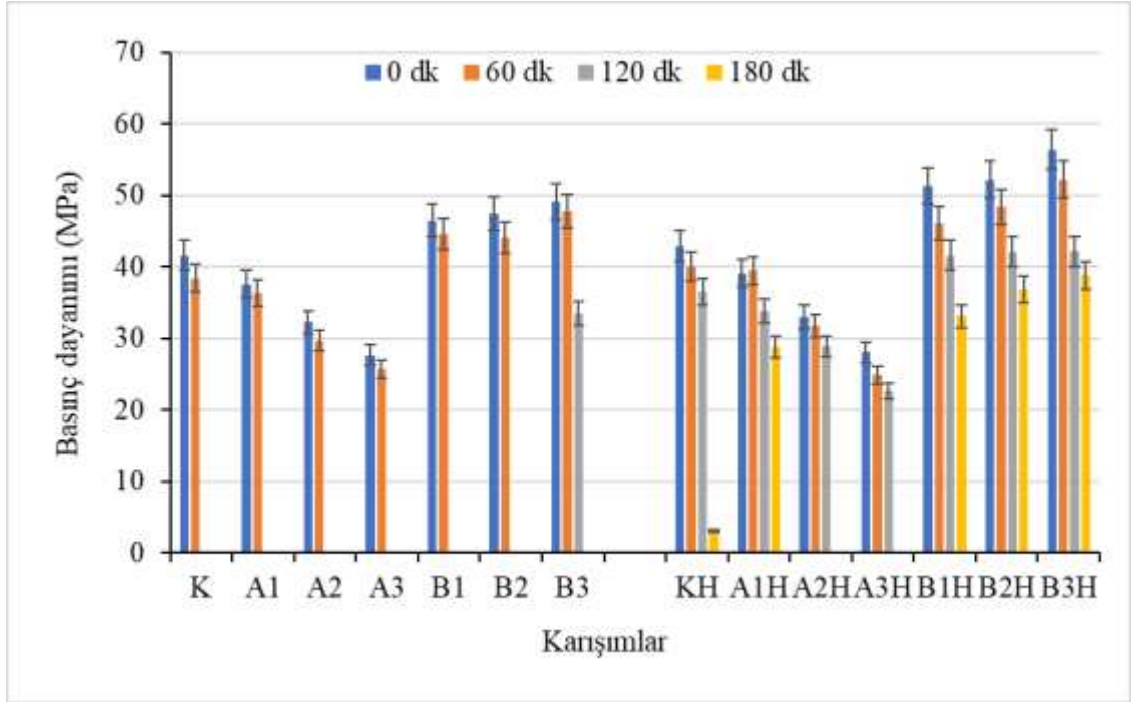
90 günlük SSB numunelerinin 0, 100, 200 ve 300 donma-çözülme (DÇ) çevrimi sonunda elde edilen basınç dayanımı sonuçları sırasıyla Şekil 4.30, 4.31, 4.32 ve 4.33'te verilmiştir.



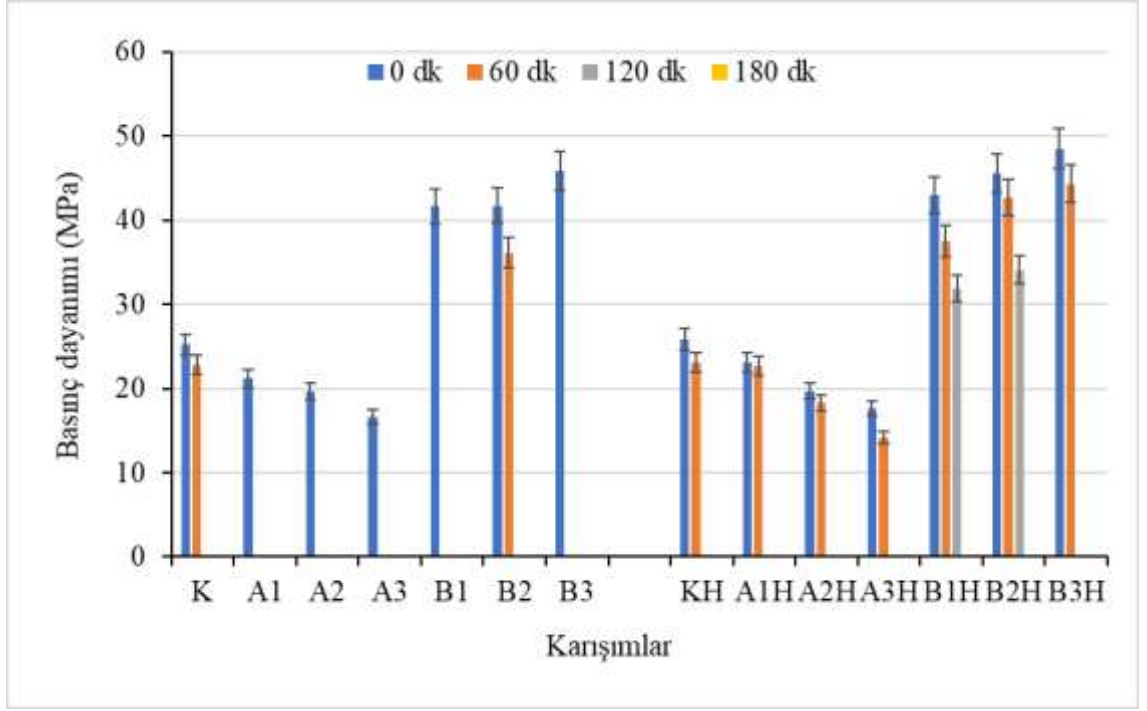
Şekil 4.30. 90 günlük SSB'lerin basınç dayanımı (0 DÇ)



Şekil 4.31. 90 günlük SSB'lerin 100 DÇ çevrimi sonrası basınç dayanımı



Şekil 4.32. 90 günlük SSB'lerin 200 DÇ çevrimi sonrası basınç dayanımı



Şekil 4.33. 90 günlük SSB'lerin 300 DÇ çevrimi sonrası basınç dayanımı

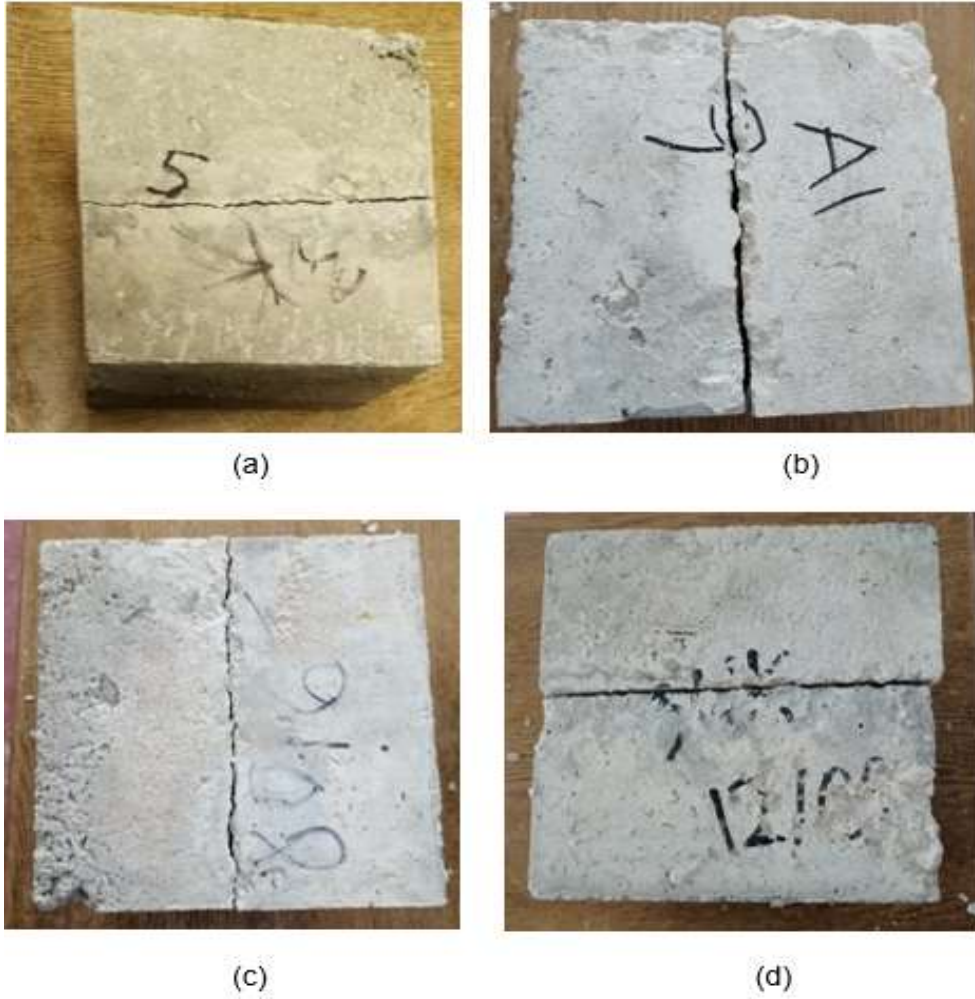
Beklenildiği gibi donma-çözölmeye maruz kalan tüm numunelerin basınç dayanımında azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca katmanlar arası yerleştirme aralığının ve DÇ çevrim sayısının artmasıyla artakalan dayanımda kayda değer mertebede azalma görölmüştür.

Genel olarak karışımlarda katmanlar arasına harç uygulanması ve uçucu kül oranının artması SSB'lerin donma çözölmeye karşı olan direncinin artmasını sağlamıştır. Ayrıca, uçucu külün agrega yerine ikame edilmesi (B serisi) çimento yerine ikame edilen karışımlara göre (A serisi), SSB karışımlarının donma-çözölmeye karşı direncinin artmasında daha etkili olduğu görölmüştür.

Katmanlar arası yerleştirme süresi ve DÇ çevriminin artmasıyla bazı numunelerin iki katmanın birleştiği yerden ayrıldığı için basınç deneyine tabi tutulamamıştır (Şekil 4.34). Bu durum 200 DÇ çevrimine kadar çoğunlukla katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan numunelerde görölmüştür. Katmanlar arası harç uygulanan numunelerde ise 200 DÇ çevrimine kadar dayanımda azalmalar olmasına rağmen, numuneler belirli mertebelerde dayanım performansı göstermiştir. Ancak ikinci katmanı 120 ve 180 dk

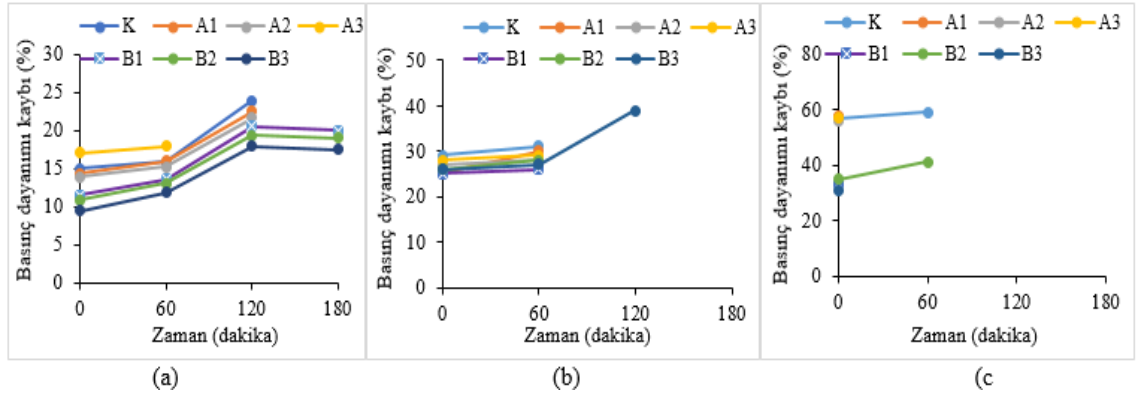
gecikmeli yerleştirilen numunelerin büyük bir çoğunluğu 300 D çevriminde çok fazla hasar gördüğünden basınç deneyine tabi tutulamamıştır.

Literatürde yapılan çalışmalarda katmanların gecikmeli olarak dökülmesiyle tabakalar arasında oluşan boşluk ve mikro çatlakların betonun dayanım ve geçirgenliğini olumsuz yönde etkilediği belirtilmiştir. Ayrıca kıvamını oldukça kaybeden beton katmanının üzerine gecikmeli olarak dökülen taze betonun suyunun buharlaşması sonucu büzülme meydana gelir. Bzlmeye bağlı gerilme konsantrasyonundan dolayı çatlaklar oluşabilir (He vd., 2017; Ma vd., 2014; Elsharief vd., 2003). Bu çalışmada görüldüğü üzere ikinci katmanın gecikmeli olarak dökülmesiyle katmanlar arası boşluk ve çatlaklara bağlı SSB numunelerinin katmanlarının zayıf kenetlenmesine sebep olmuştur. Böylece numunelerin geçirgenliği artmıştır. Şekil 4.29'de numunelerin su emme oranlarından görüldüğü üzere katmanlar arası yerleştirme süresinin artması su emme oranlarını artırmıştır. Numunelerde su emme miktarı geçirgenliğin bir ölçüsüdür. Bu bağlamda numune içine giren su numunelerin D direncini zayıflatmış ve daha fazla hasar görmesine sebep olmuştur (Mehta vd., 2006; Williams vd., 2013).

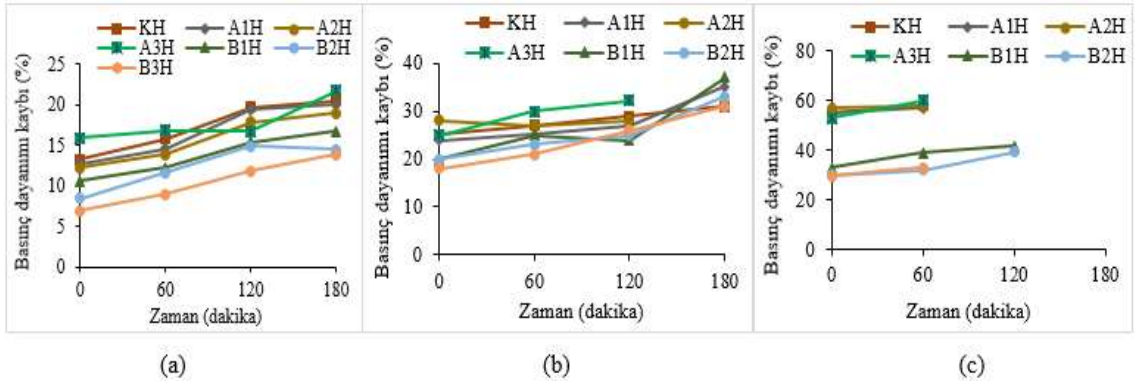


Şekil 4.34. İkinci katmanı 180 dakika sonra yerleştirilen ve katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan numunelerin 100 donma-çözülme çevrimi sonrasındaki görüntüsü: a) K karışımı, b) A1 karışımı, c) A2 karışımı, d) A3 karışımı

100, 200 ve 300 DÇ çevrimi sonrası katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan ve katmanlar arası harç uygulanan karışımların katmanları arası yerleştirme aralığına bağlı dayanım kaybı yüzdeleri Şekil 4.35 ve 4.36'da verilmiştir. Şekillerden görüldüğü gibi karışımlara uçucu kül ikame edilmesi ve katmanlar arası harç uygulanması SSB'lerin dayanım kaybı oranlarını azaltmış ve DÇ direncini artırmıştır. Ancak katmanlar arası yerleştirme aralığının ve DÇ çevrim sayılarının artmasıyla tüm numunelerde artakalan dayanım azalmıştır.



Şekil 4.35. Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımların a) 100 b) 200 ve c) 300 donma-çözülme çevrimi sonrası basınç dayanımı kaybı.



Şekil 4.36. Katmanlar arası harç kullanılan karışımların a) 100 b)200 ve c) 300 donma-çözülme çevrimi sonrası basınç dayanımı kaybı.

Şekil 4.35 ve 4.36'dan görüldüğü gibi 100 DÇ çevrimi sonrasında ikinci katmanı gecikme olmadan yerleştirilen ve katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan numunelerde dayanım kaybı %9-17 bandında olurken, katmanlar arasına harç uygulanmasıyla dayanım kaybı %7-15 bandına inmiştir. İkinci katmanı 60 dakika sonra yerleştirilen ve katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan numunelerde basınç dayanımı kaybı %12-18 arasındayken katmanlar arası harç uygulanan karışımlarda ise %8-17 arasında olmuştur. İkinci katmanı 120 ve 180 dakika sonra yerleştirilen numunelerde dayanım kaybı oranları daha da artış göstermiştir.

200 ve 300 DÇ çevrimi sonrasında dayanım kaybı oranlarında önemli mertebelerde artış tespit edilmiştir. Özellikle katmanlar arası yerleştirme aralığı 120 ve 180 dk olan

numunelerin büyük çoğunluğu, 300 DÇ çevrimi sonrasında aşırı hasar gördüğünden basınç deneyine tabi tutulamamıştır.

Önceden de belirtildiği üzere katmanlar arası harç uygulaması ile yüzey pürüzlülüğünün artmasına bağlı olarak katmanların aderansı artmaktadır. Ayrıca harç uygulanması ile katmanlar arasında hidrasyon ürünlerinin yapısı daha yoğun hale gelmekte ve ara yüzeydeki porozite azalmaktadır (Azizmohammadi vd., 2021; Diab ve ark 2017; He vd., 2013). Böylece SSB numunelerinin soğuk derz etkileri ve geçirimsizliği azalmış, DÇ direnci artmıştır. Ancak 300 DÇ çevrimi sonrasında katmanlar arası yerleştirme aralığı 120 ve 180 dakika olan numunelerde soğuk derz etkisi aşırı olduğundan birkaç numune hariç, harç uygulaması da numunenin DÇ etkisiyle parçalanmasını önleyememiştir (Şekil 4.37).



Şekil 4.37. 300 donma-çözölmeye maruz kalan katmanlar arası harç uygulanan K karışımının görünümü

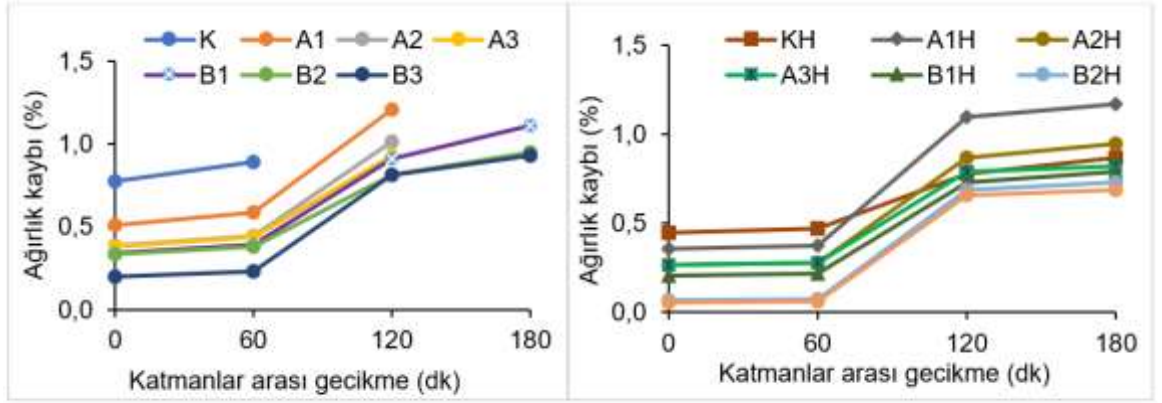
Donma-çözülme etkisinde kalan SSB karışımların ağırlık kaybı

SSB numunelerinin 100, 200 ve 300 DÇ çevrimi sonunda elde edilen ağırlık kaybı oranları sırayla Şekil 4.38, 4.39 ve 4.40'te verilmiştir. Söz konusu şekillerden görüldüğü gibi tüm SSB karışımlarında katmanlar arası yerleştirme aralığının artmasıyla ağırlık kaybı oranlarında artış görülmüştür. Özellikle ikinci katmanı 120 dk gecikmeli yerleştirilen numunelerde DÇ sonrası ağırlık kaybında belirgin bir artış olduğu tespit edilmiştir. Bu numunelerin ağırlık kaybının, ikinci katmanı 180 dk. sonra yerleştirilen (ve DÇ etkisiyle parçalanmayan) numunelere yakın olduğu görülmüştür. Bu bağlamda katmanlar arası gecikmenin artmasıyla soğuk derzin meydana getirdiği olumsuz etkiden dolayı DÇ'ye maruz kalan numuneler daha fazla hasar görmüştür.

Şekil 4.38'de görüldüğü gibi 100 donma-çözülme çevrimi sonrasında ikinci katmanı 0 ve 60 dakika sonra yerleştirilen numunelerde kayda değer bir ağırlık kaybı olmamıştır. İkinci katmanın yerleştirme aralığının giderek artmasıyla DÇ sonrası numunelerdeki ağırlık kaybı yaklaşık %1,25 oranlarında artış görülmektedir. Ancak katmanlar arası harç uygulaması ağırlık kaybı oranlarının bir miktar azalmasını sağlamıştır. İkinci katmanı 180 dakika sonra yerleştirilen ve katmanlar arası harç kullanılmayan K ve A serisi karışımlarda, numuneler katmanların birleştiği yerden ayrıldığı için ağırlık kaybı ölçülememiştir.

Şekil 4.39 ve 4.40'ten görüldüğü gibi numunelerin maruz kaldığı DÇ çevrim sayısı arttıkça ağırlık kaybı oranlarında bariz artışlar tespit edilmiştir. Basınç dayanım kaybına benzer olarak soğuk derz etkilerinden dolayı ağırlık kaybı artış göstermiş, bazı numunelerde aşırı parçalanmaya bağlı olarak ağırlık kaybı ölçülememiştir.

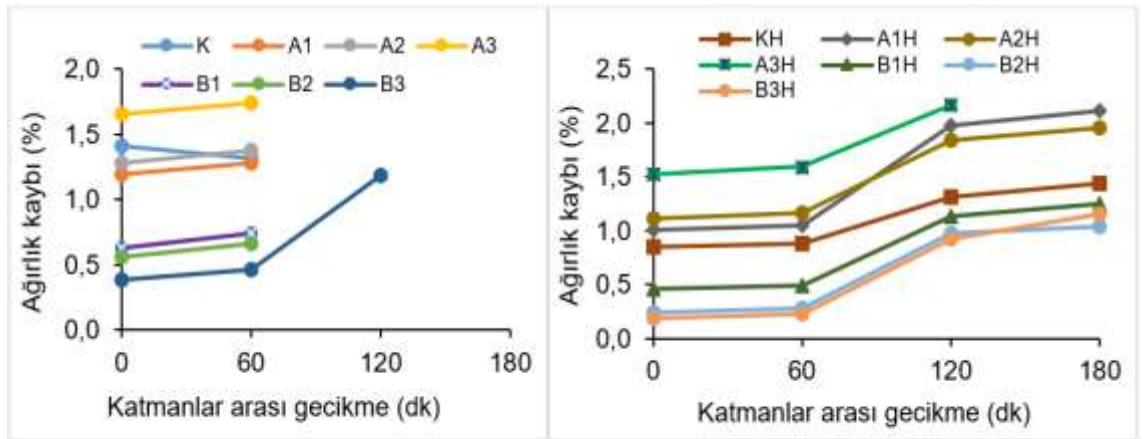
Beklenildiği gibi donma-çözülme maruz kalan tüm numunelerin ağırlık kaybında artış gözlemlenmiştir. Katmanlar arası yerleştirme aralığının ve donma-çözülme döngüsünün artmasıyla ağırlık kaybının arttığı görülmüştür. Ancak karışımlara, özellikle agrega yerine uçucu kül ikame edilmesi ve katmanlar arası harç uygulanması karışımların DÇ direncini artırıcı etki göstermiştir.



(a)

(b)

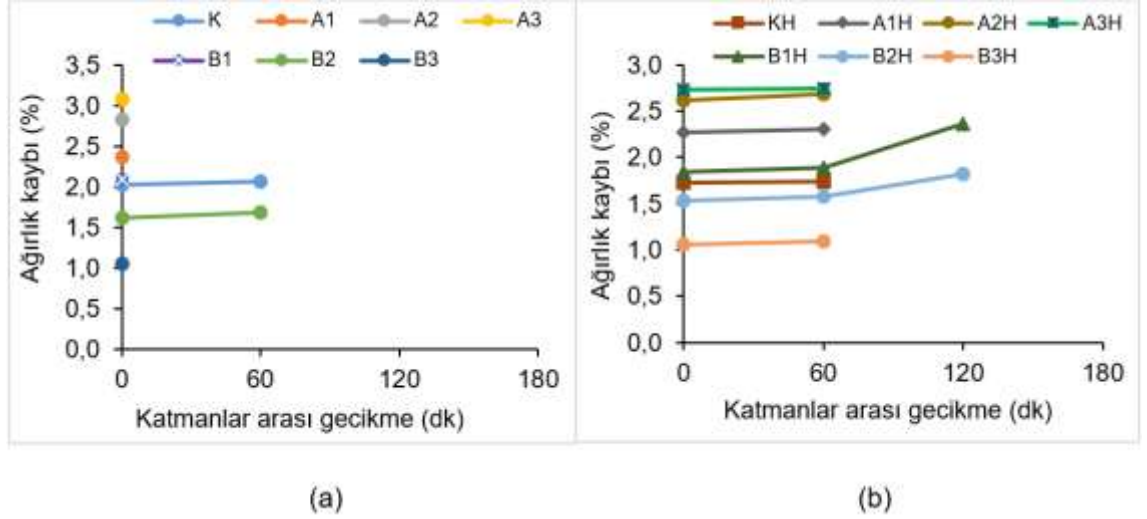
Şekil 4.38. 100 donma-çözülme çevrimi sonrası ağırlık kaybı. a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların



(a)

(b)

Şekil 4.39. 200 donma-çözülme çevrimi sonrası ağırlık kaybı. a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların



Şekil 4.40. 300 donma-çözülme çevrimi sonrası ağırlık kaybı. a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların

Donma-çözülme etkisinde kalan SSB karışımlarının ultrases geçiş hızının incelenmesi

DÇ çevrimine maruz kalmayan ve 100 DÇ çevrimine maruz kalan numunelerin ultrases geçiş hızı sonuçları Çizelge 4.20’de ve 200, 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan numunelerin ultrases geçiş hızı sonuçları ise Çizelge 4.21’de verilmiştir.

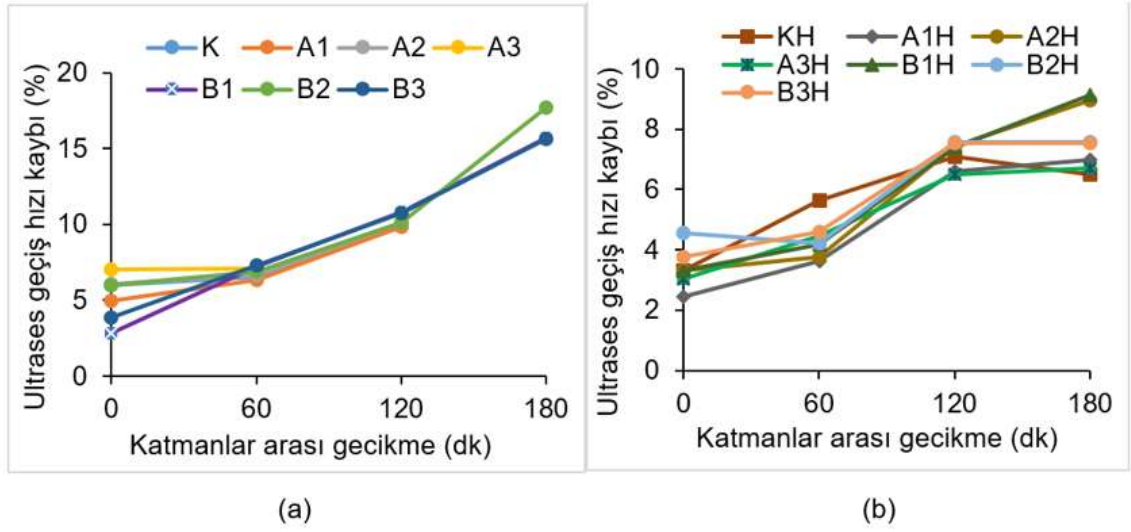
Çizelge 4.20. DÇ çevrimine maruz kalmayan ve 100 DÇ çevrimine maruz kalan numunelerin ultrases geçiş hızı sonuçları

Karışımlar	DÇ öncesi UPV (km/sn)				100 DÇ sonrası UPV (km/sn)			
	0 dk	60 dk	120 dk	180 dk	0 dk	60 dk	120 dk	180 dk
K	5,2	5,1	4,8	4,6	4,9	4,8	4,4	Başarısız
A1	4,9	4,9	4,6	4,4	4,7	4,6	4,2	Başarısız
A2	4,9	4,8	4,5	4,3	4,6	4,5	4,1	Başarısız
A3	4,4	4,3	4,1	3,9	4,1	4,0	Başarısız	Başarısız
B1	5,2	5,1	4,8	4,6	5,0	4,7	4,3	3,9
B2	5,2	5,1	4,9	4,6	4,9	4,8	4,4	3,8
B3	5,4	5,3	5,0	4,8	5,2	5,0	4,5	4,1
KH	5,3	5,2	5,0	4,9	5,1	4,9	4,7	4,6
A1H	4,8	4,7	4,6	4,5	4,7	4,6	4,3	4,2
A2H	4,6	4,6	4,4	4,3	4,5	4,4	4,1	3,9
A3H	4,4	4,3	4,1	4,1	4,2	4,1	3,9	3,8
B1H	5,2	5,2	5,0	4,9	5,0	5,0	4,6	4,4
B2H	5,3	5,3	5,1	5,0	5,1	5,1	4,7	4,6
B3H	5,6	5,5	5,3	5,2	5,4	5,3	4,9	4,8

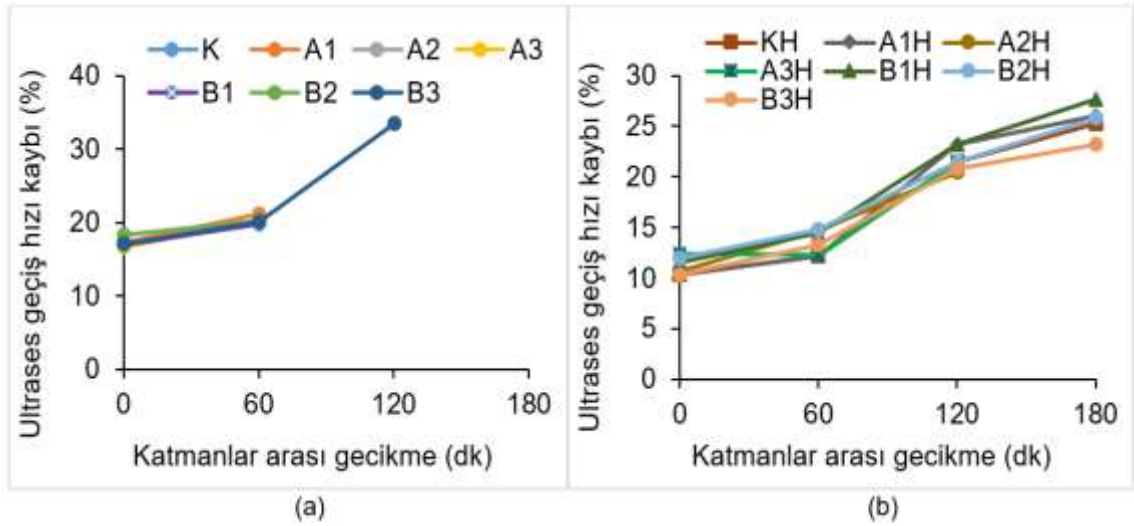
Çizelge 4.21. 200 ve 300 donma-çözülme çevrimine maruz kalan numunelerin ultrases geçiş hızı sonuçları

Karışımlar	200 DÇ sonrası UPV (km/sn)				300 DÇ sonrası UPV (km/sn)			
	0 dk	60 dk	120 dk	180 dk	0 dk	60 dk	120 dk	180 dk
K	4,3	4,1	Başarısız	Başarısız	3,1	2,8	Başarısız	Başarısız
A1	4,1	3,8	Başarısız	Başarısız	3,1	Başarısız	Başarısız	Başarısız
A2	4,0	3,8	Başarısız	Başarısız	3,0	Başarısız	Başarısız	Başarısız
A3	3,7	3,5	Başarısız	Başarısız	3,0	Başarısız	Başarısız	Başarısız
B1	4,3	4,1	Başarısız	Başarısız	3,2	Başarısız	Başarısız	Başarısız
B2	4,2	4,1	Başarısız	Başarısız	3,3	2,9	Başarısız	Başarısız
B3	4,5	4,3	3,4	Başarısız	3,4	3,3	Başarısız	Başarısız
KH	4,7	4,6	3,9	3,7	4,2	3,9	Başarısız	Başarısız
A1H	4,3	4,2	3,5	3,3	3,8	3,6	Başarısız	Başarısız
A2H	4,1	3,9	3,5	3,1	3,8	3,4	Başarısız	Başarısız
A3H	3,8	3,8	3,3	3,0	3,6	3,2	Başarısız	Başarısız
B1H	4,6	4,4	3,8	3,5	4,3	4,0	3,5	Başarısız
B2H	4,7	4,5	4,0	3,7	4,4	4,1	3,5	Başarısız
B3H	5,0	4,8	4,2	4,0	4,4	4,3	Başarısız	Başarısız

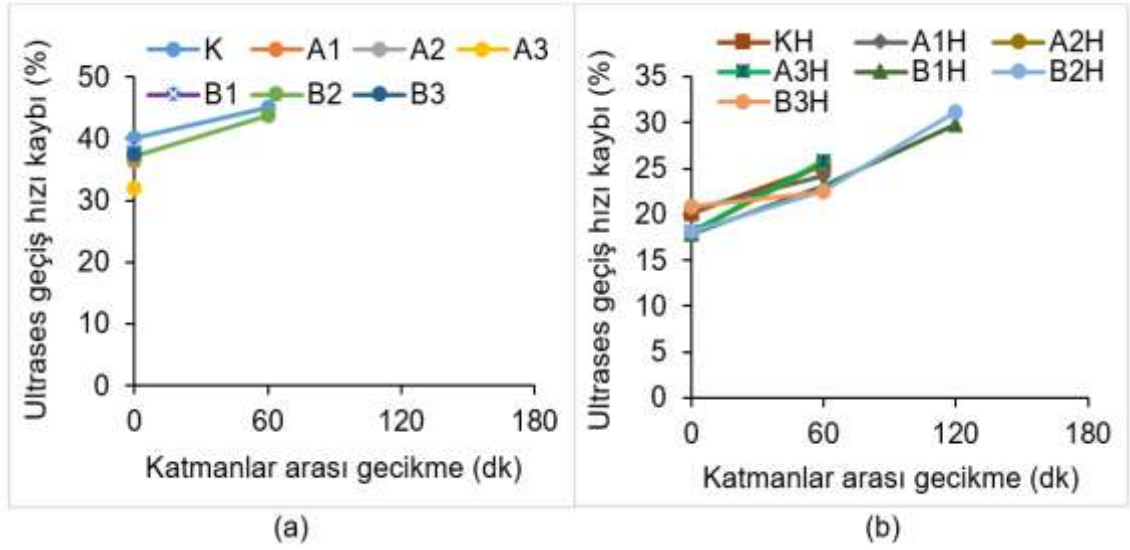
100, 200 ve 300 DÇ çevrimi sonrası, katmanları gecikmeli yerleştirilen, katmanlar arasında harç uygulanan ve uygulanmayan numunelerin ultrases geçiş hızı kaybı Şekil 4.41, 4.42 ve 4.43'te verilmiştir. SSB karışımlarının ultrases geçiş hızı değerleri basınç dayanımlarına benzer şekilde değişmiştir. Katmanlar arasında harç uygulanmayan ve DÇ'ye maruz kalan numunelerin ultrases geçiş hızı değerlerinde oluşan azalmanın katmanlar arasında harç uygulanmasıyla azaldığı saptanmıştır.



Şekil 4.41. 100 donma-çözülme çevrimi sonrası ultrases geçiş hızı kaybı. a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların



Şekil 4.42. 200 donma-çözülme çevrimi sonrası ultrases geçiş hızı kaybı. a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların



Şekil 4.43. 300 donma-çözülme çevrimi sonrası ultrases geçiş hızı kaybı. a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların

Şekil 4.41’de görüldüğü gibi, ikinci katmanı gecikme olmadan yerleştirilen ve katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan numunelerde 100 donma-çözülme çevrimi sonunda ultrases geçiş hızı kaybı %2-7 arasındayken, katmanlar arasına harç uygulanmasıyla bu kayıp %2-4 arasında olmuştur. İkinci katmanı 60 dakika sonra yerleştirilen ve katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanamayan numunelerde ultrases geçiş hızı kaybı %6-7 arasındayken, katmanlar arası harç uygulanan karışımlarda %3-5 arasında olmuştur. İkinci katmanı 120 ve 180 dakika sonra yerleştirilen numunelerde 60 dk. sonra yerleştirilen numunelere kıyasla ultrases geçiş hızı kaybının çok daha yüksek oranlarda olduğu görülmüştür.

Şekil 4.42 ve 4.43’den görüldüğü gibi DÇ çevrim sayısının artmasıyla ultrases geçiş hızı kayıplarında belirgin bir artış görülmüştür. DÇ çevrim sayısının 200 ve 300’e çıkmasıyla katmanlar arası gecikme olmayan numunelerde ultrases geçiş hızı kaybı %20-40 oranlarına yükselirken, katmanlar arası harç uygulanmasıyla bu kaybın %15-20’lere kadar azaldığı görülmüştür. Özellikle 300 DÇ çevrimi esnasında, ikinci katmanı 120 ve 180 dk. sonra yerleştirilen numuneler (B1H ve B2H karışımları hariç) iki katmanın birleştiği kesitten ayrıldığından ultrases ölçümü yapılamamıştır.

Ultras ses geçiş hızına göre beton karışımlarının kalitesi ile ilgili olarak Leslie vd. (1949) ve Feldman (1977) tarafından önerilen sınıflandırma izelge 4.22’de gösterilmiştir. Bu bağlamda izelge 4.22’deki sınıflandırmaya göre D evrimleri öncesi ve ikinci katmanı 0, 60 ve 120 dakika sonra yerleştirilen karışımlar genel olarak “mükemmel” durumundayken, 180 dakika gecikme ile yerleştirilen numunelerin “iyi” durumunda olduğu grlmştir. 100 donma-çözülme çevrimine maruz kalan karışımların %34’ “mükemmel”, %55’i “iyi” ve %2’si “normal” olarak sınıflandırılmaktadır. D esnasında karışımların %9’u da katmanların birleştiği yerden ayıldığı için sonuç alınamamıştır.

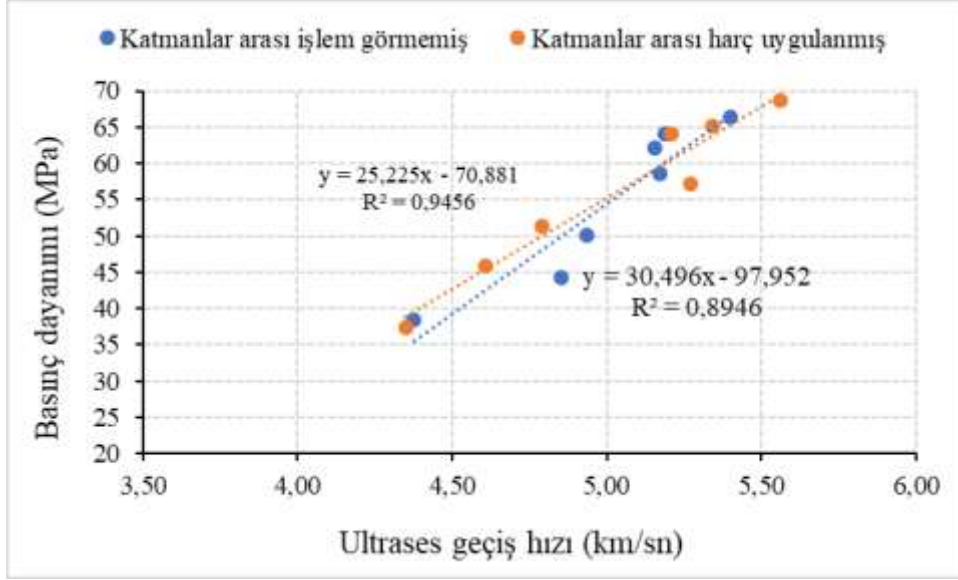
200 D çevrimine maruz kalan karışımların %9’u “mükemmel”, %57’si “iyi”, %7’si “normal” ve %3’ “kötü” olarak sınıflandırılmıştır. D esnasında karışımların %24’ katmanların birleştiği yerden ayıldığı için sonuç alınamamıştır.

300 D çevrimine maruz kalan karışımların %19’u “iyi”, %23’ “normal” ve %2’si “kötü” olarak sınıflandırılmıştır. D esnasında karışımların %56’sı da katmanların birleştiği yerden ayıldığı için ölçüm yapılamamıştır. Söz konusu karışımlarda katmanlar arası harç kullanılan numunelerin daha iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. En kötü performansı A3 karışımı gösterirken en iyi performansı B3H karışımı göstermiştir.

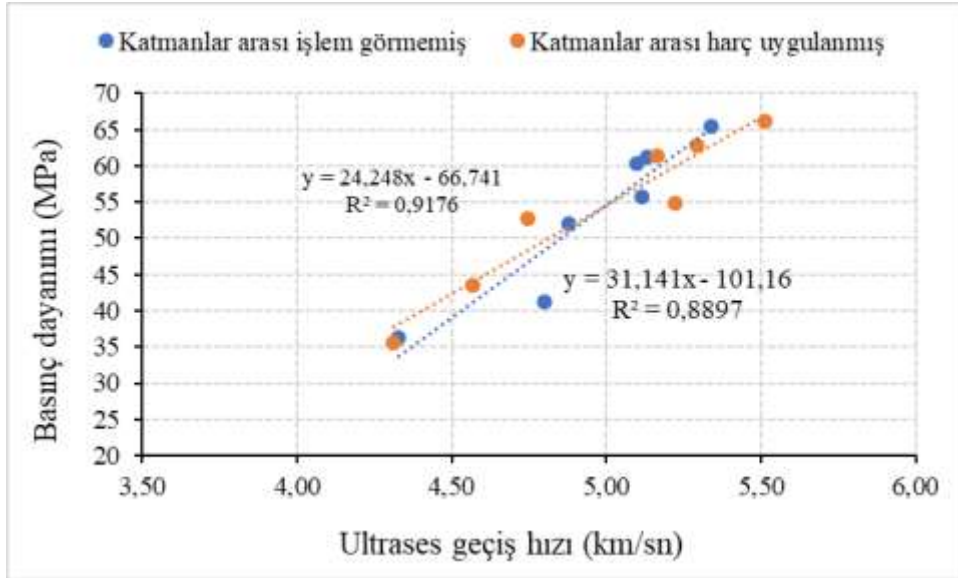
Çizelge 4.22. Ultras ses geçiş hızına göre beton kalitesi sınıflandırılması (Leslie vd., 1949; Feldman, 1977)

Ultras ses geçiş hızı (km/sn)	Beton Kalitesi
>4,5	Mükemmel
3,6-4,5	İyi
3,0-3,6	Normal
2,1-3,0	Kötü
<2,1	çok kötü

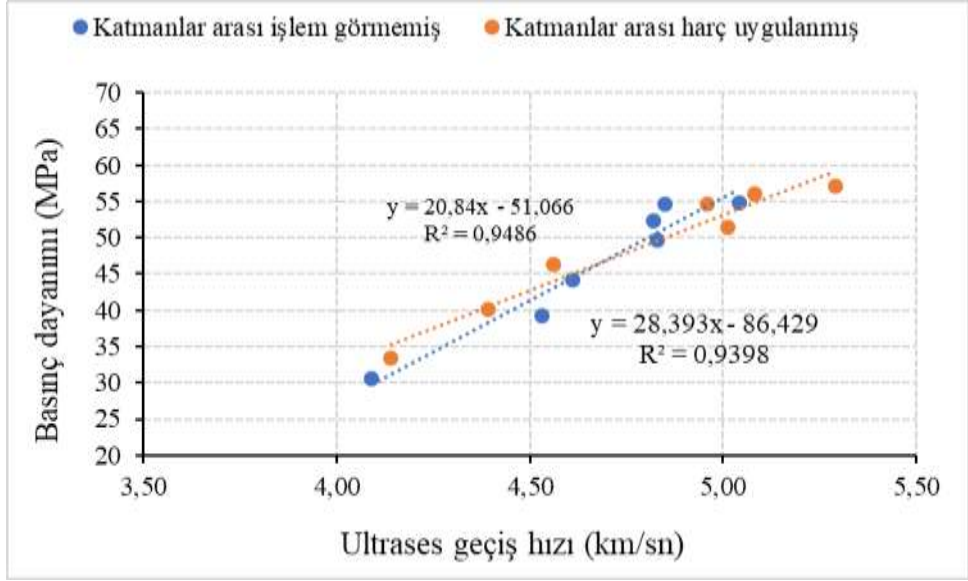
İkinci katmanın yerleştirme süresi 0, 60, 120 ve 180 dakika olan numunelerin ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki sırasıyla Şekil 4.44-4.47’de gösterilmiştir. Sonuçlardan görüldüğü gibi tüm karışımlarda ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasında güçlü bir doğrusal ilişkinin olduğu tespit edilmiştir.



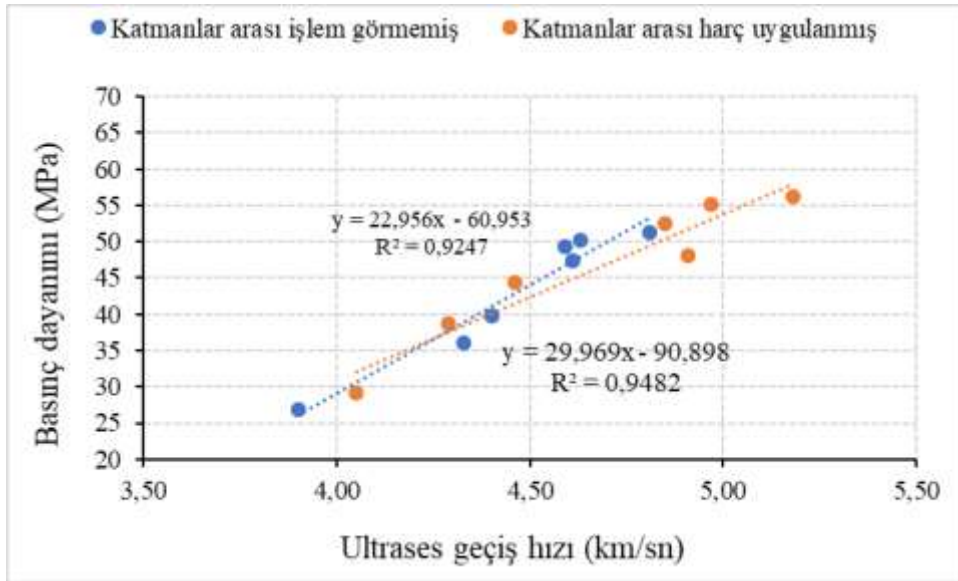
Şekil 4.44. İkinci katmanı gecikme olmadan (0 dakika) yerleştirilen numunelerde ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 4.45. İkinci katmanı 60 dakika sonra yerleştirilen numunelerde ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

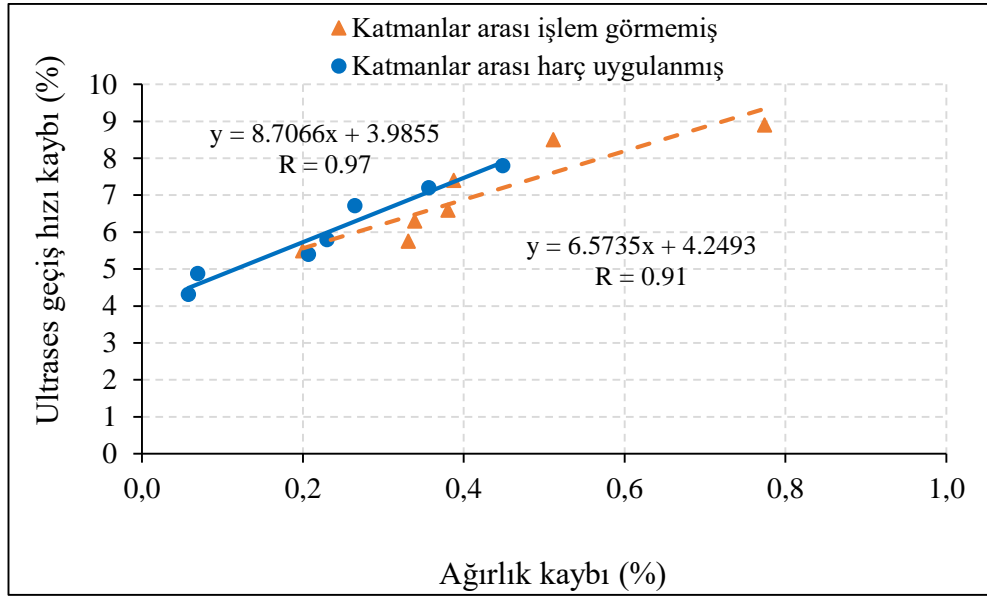


Şekil 4.46. İkinci katmanı 120 dakika sonra yerleştirilen numunelerde ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki



Şekil 4.47. İkinci katmanı 180 dakika sonra yerleştirilen numunelerde ultrases geçiş hızı ve basınç dayanımı arasındaki ilişki

Katmanlar arası yerleştirme gecikmesi olmayan numunelerin ultrases geçiş hızı kaybı ve ağırlık kaybı arasındaki ilişki Şekil 4.48’de gösterilmiştir. Şekil 4.48’de görüldüğü gibi katmanlar arası harç kullanılan karışımlarda ultrases geçiş hızı kaybı ve ağırlık kaybı doğrusal ilişki gösterirken, bu durum katmanlar arası işlem görmemiş karışımlarda daha az olmuştur.



Şekil 4.48. Katmanlar arası yerleştirme aralığı olmayan karışımların ultrases geçiş hızı kaybı ve ağırlık kaybı arasındaki ilişki

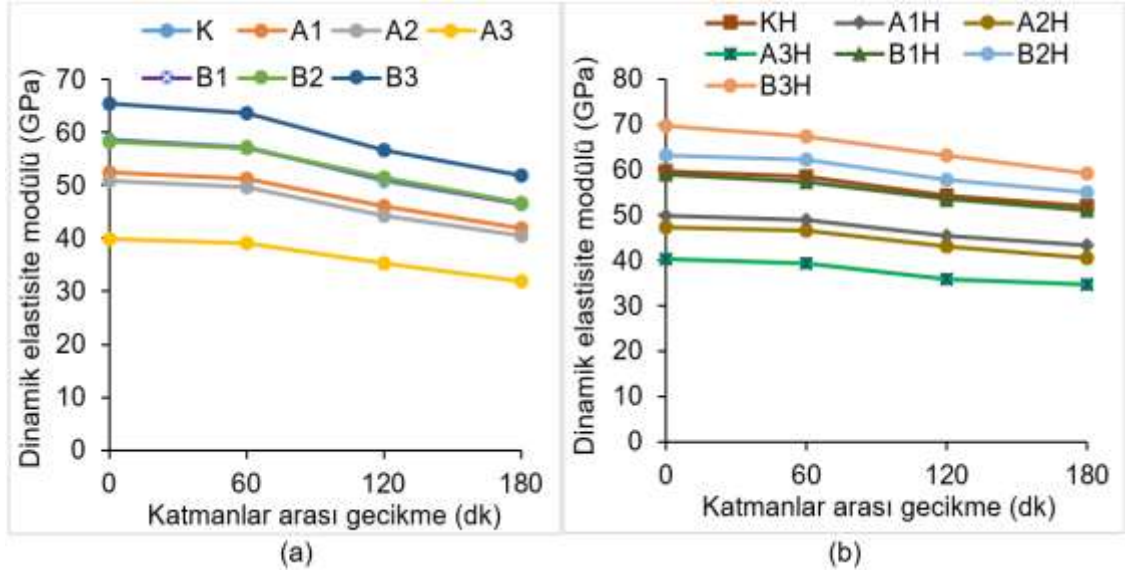
SSB karışımların dinamik elastisite modülleri denklem 4.4 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$E_{dn} = \rho \cdot c^2 \frac{(1+\nu) \cdot (1-2\nu)}{(1-\nu)} \quad (4.4)$$

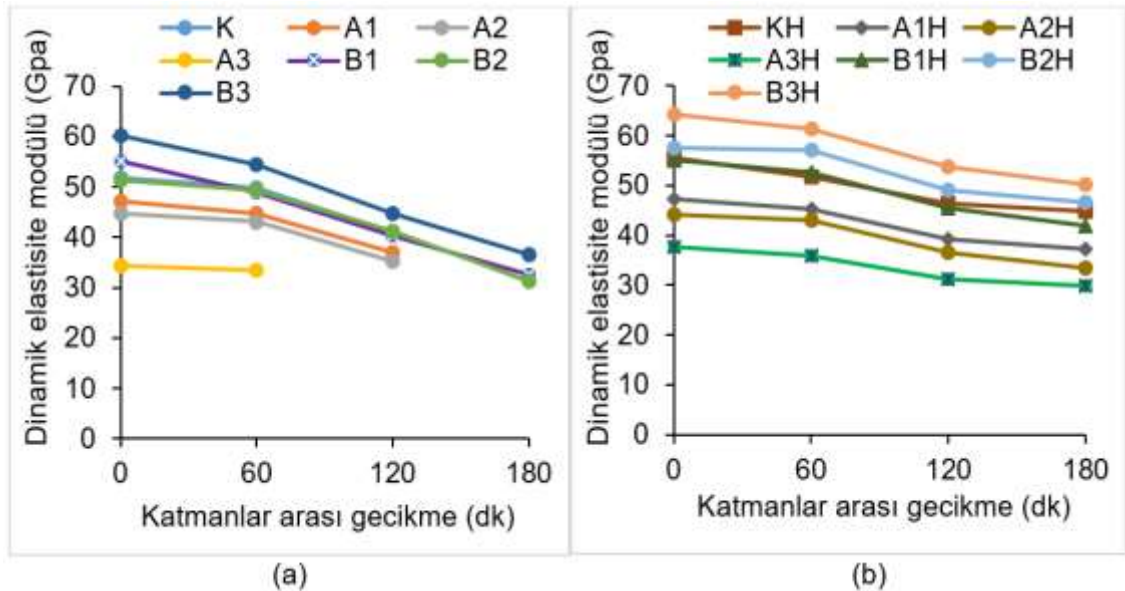
Denklemden E_{dn} dinamik elastisite modülünü (MPa), ρ sertleşmiş beton yoğunluğunu (kg/m^3), c Ultrases geçiş hızını (km/sn) ve ν Poisson oranını ifade etmektedir.

SSB karışımlarının dinamik elastisite modülü sonuçları Şekil 4.49-4.52’de verilmiştir. Literatürden bilindiği üzere betonlarda dinamik elastisite modülü statik elastisite modülünden genel olarak %20-40 arasında daha yüksek olmaktadır. Betonun dinamik elastisite modülünü etkileyen faktörler agrega, çimento hamuru ve agrega-hamuru ara yüzeyi miktarı ve özellikleridir (Mehta ve Monteiro, 2005). Bu bağlamda SSB karışımlarındaki agrega içeriği geleneksel betonunkinden daha fazla olduğundan agrega özelliklerinin SSB'nin dinamik elastisite modülüne etkisi daha baskın olmaktadır.

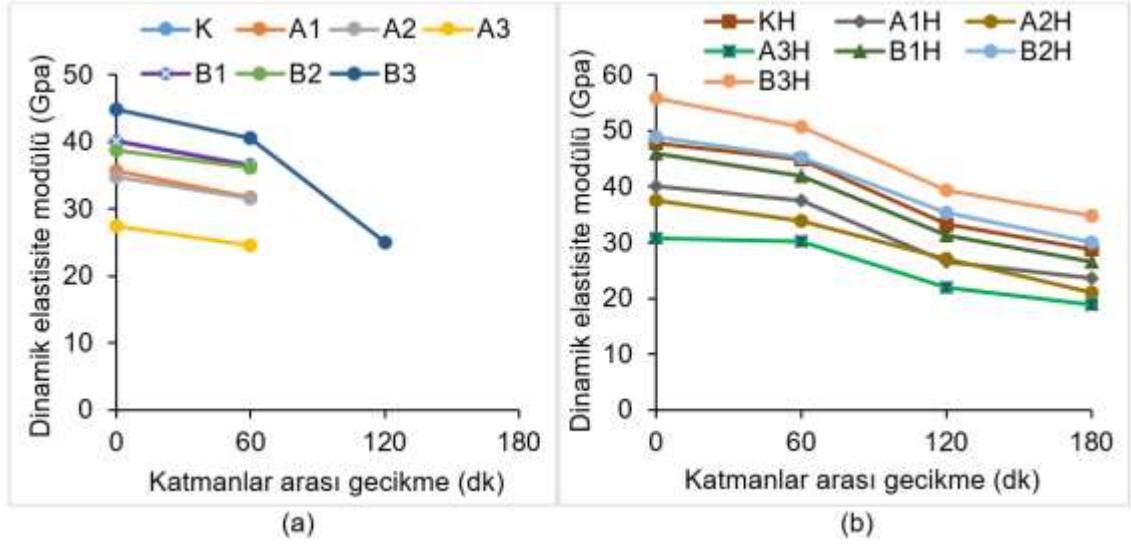
(Gauthier ve Marchand, 2005). Şekil 4.49-4.52’de, A serisi karışımların dinamik elastisite modülünün kontrol karışımlara göre daha düşük olduğu görülmüştür. Bu durumun kontrol karışımına kıyasla A serisi karışımlarda uçucu kül içeriğinin artmasıyla agrega miktarının ve sertleşmiş beton yoğunluğunun azalmasından ve su/bağlayıcı oranının artmasından kaynaklanmaktadır.



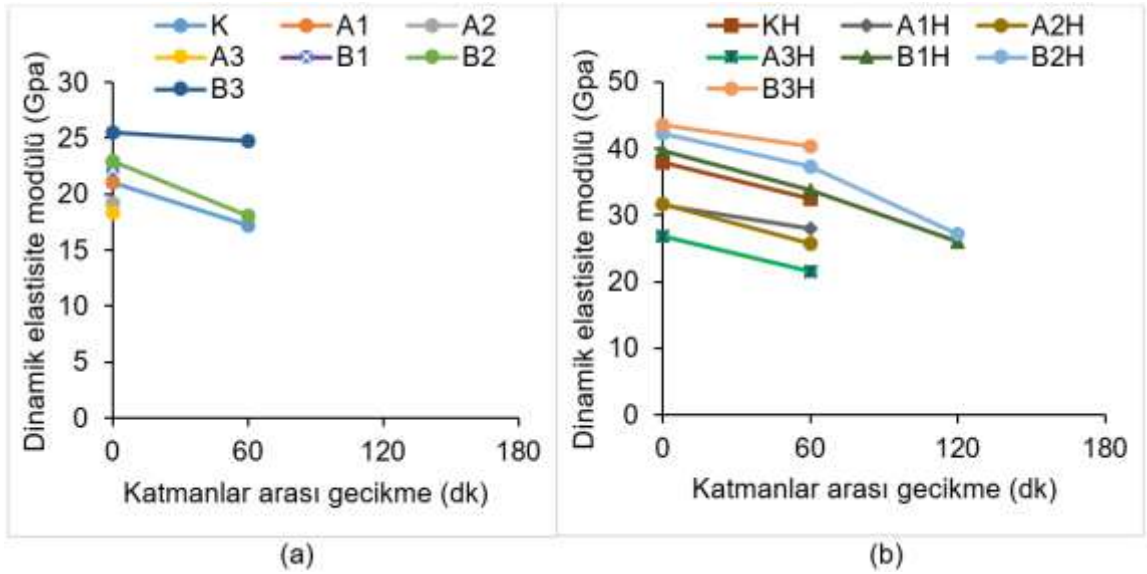
Şekil 4.49. Donma-çözülme çevrimi öncesi dinamik elastisite modülü, a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların



Şekil 4.50. 100 Donma-çözülme çevrimi sonrası dinamik elastisite modülü. a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların



Şekil 4.51. 200 Donma-çözülme çevrimi sonrası dinamik elastisite modülü. a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların



Şekil 4.52. 300 Donma-çözülme çevrimi sonrası dinamik elastisite modülü. a) Katmanlar arası herhangi bir işlem uygulanmayan karışımlar. b) Katmanlar arası harç kullanılan karışımların

DÇ sonrası numunelerin ultrases geçiş hızları azalmış ve buna bağlı olarak SSB karışımların dinamik elastisite modülü azalmıştır.

İkinci katmanı 0 dakika gecikmeli yerleştirilen ve katmanlar arası harç uygulanmayan numunelerde 100 DÇ çevrim sonrası dinamik elastisite modülü değerlerinde %11-17 arasında düşüş meydana gelirken, katmanlar arası harç uygulanan numunelerde bu oran %8-15 düzeylerine kadar inmiştir. Ayrıca, ikinci katmanın yerleştirme zamanının gecikmesiyle dinamik elastisite modülü değer kaybı giderek artış göstermiştir. Numunelerin parçalanmasından dolayı ultrases geçiş hızı belirlenemeyen, ikinci katmanı 120 ve 180 dk gecikmeli yerleştirilen A3, 180 dakika gecikmeli yerleştirilen K, A1 ve A2 karışımlarının dinamik elastisite modülleri hesaplanamamıştır. 200 ve 300 DÇ çevrimlerinde ise ultrases geçiş hızındakine benzer olarak dinamik elastisite modülü değerlerinde azalma olmuştur.

SSB karışımların 300 DÇ çevrimi sonrası dinamik elastisite modülü değerleri kullanılarak, ASTM C666'da önerilen denklem 4.5'ten durabilite faktörleri hesaplanmıştır.

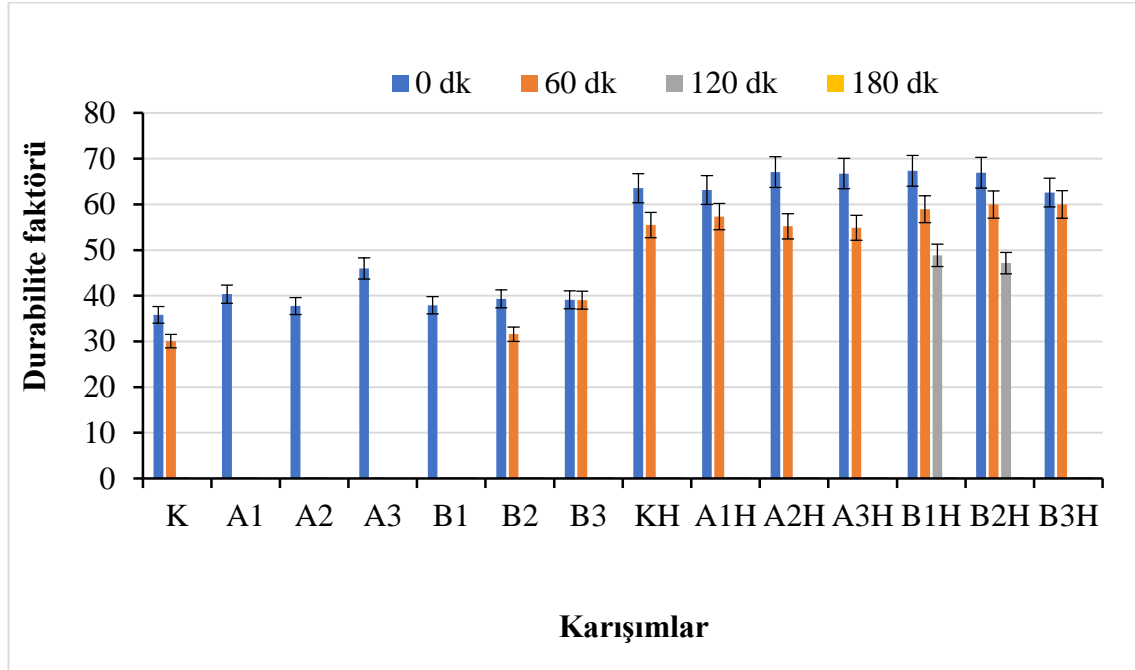
$$D_f = \frac{n}{3} \cdot \left[\frac{E_{dn}}{E_{d0}} \right] \quad (4.5)$$

Eşitlikte D_f durabilite faktörünü, n DÇ çevrim sayısını, E_{dn} 300 DÇ çevrimi sonrasında numunenin dinamik elastisite modülünü ve E_{d0} ise DÇ çevrimi öncesi numunenin dinamik elastisite modülünü ifade etmektedir.

Şekil 4.53'te 300 DÇ çevrimine maruz kalan SSB karışımların katmanlar arası yerleştirme aralığına bağlı durabilite faktörleri gösterilmiştir. Şekil 4.53'te görüldüğü gibi ikinci katmanın yerleştirme zamanının gecikmesiyle tüm karışımların durabilite faktörleri azalma eğiliminde olmuştur. Bazı karışımların ultrases geçiş hızı ölçümü yapılamadığından durabilite faktörleri hesaplanmamıştır.

İkinci katmanın yerleştirme zamanından bağımsız olarak katmanlar arasına harç uygulanması, soğuk derz etkilerini baskıladığından, SSB karışımların durabilite faktörünü artırıcı bir etkisi olmuştur. Katmanlar arasında harç kullanılmasıyla ikinci katmanı 0 dakika sonra yerleştirilen A serisi karışımlarda %45-78 arasında, B serisi

karışımlarda %60-78 arasında ve kontrol karışımında ise %77 oranında durabilite faktörü artış göstermiştir.



Şekil 4.53. 300 DÇ çevrimi sonrası durabilite faktörü

Durabilite faktörü açısından betonların uygunluk veya uygunsuzluk kriterleri bulunmamaktadır. Bu değer, betonların arasında kıyaslama amacıyla kullanılabilir. Ancak Neville'in (2011) belirttiğine göre, durabilite faktörünün 40'tan düşük olması betonun muhtemelen donma-çözölmeye karşı yeterli direnci olmadığı anlamına gelmektedir. 40 ila 60 arasında olması şüpheli performanssa sahip betonlarda söz konusu olmaktadır. 60'ın üzerinde olması, beton muhtemelen yeterli direnci olduğunu, 100 civarında olması ise tatmin edici donma-çözölmeye direncine sahip olduğunun göstergesi olabilmektedir. Katmanlar arası gecikme olmaksızın ve harç uygulanmayan karışımlarda A1 ve A3 karışımı hariç durabilite faktörleri 40'ın altında olmuştur. Ancak katmanlar arası gecikme olmaksızın, harç uygulanan tüm karışımların ise durabilite faktörü 60'ın üzerinde olduğundan DÇ bakımından dirençli sınıfta değerlendirilmiştir. Söz konusu katmanlar arası harç uygulanan karışımlarda 60 dakika gecikmeli olarak ikinci katmanın yerleştirilmesi durumunda bile durabilite faktörü 40'ın altına düşmemekte SSB numuneleri DÇ direncini korumaktadır

5. SONUÇ

Bu çalışmada yüksek oranda uçucu kül içeren SSB karışımlarında zamana bağlı katmanlar arası soğuk derz oluşumu ve iyileştirmesine yönelik yapılan deneysel çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- Karışımlardaki uçucu kül miktarının artması, optimum su muhtevasını arttırdığı, maksimum kuru birim hacim ağırlığını ise azalttığı tespit edilmiştir.
- Çimento yerine uçucu kül kullanıldığında işlenebilirliğinin artmasının ve buna bağlı olarak Vebe zamanının azalmasının, uçucu kül ikame edilen SSB karışımların su/bağlayıcı miktarının kontrol karışımına göre bir miktar yüksek olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Uçucu külün agrega yerine kullanıldığı B serisi karışımlarda Vebe zamanının azalması matristeki bağlayıcı miktarının artmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.
- SSB karışımlarında katmanlar arası soğuk derzin olumsuz etkilerini engellemek için priz geciktirici kimyasal katkı uygulanması, katmanlar arası harç uygulanması ve aderans artırıcı kimyasal yapıştırıcı uygulaması olmak üzere 3 metot uygulanmıştır. Bu metotlardan deneysel sonuçlara göre en başarılı olanı katmanlar arası harç uygulaması olmuştur.
- SSB karışımlarına çimento yerine uçucu kül ikame edilmesi SSB'lerin 28 ve 90 günlük basınç, yarmada-çekme ve eğilme dayanımlarını ile elastisite modüllerini azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca SSB karışımların çimento yerine ilave edilen uçucu kül oranı arttıkça geçirgenlik özellikleri olumsuz etkilenmiştir.
- SSB karışımlara agrega yerine çimento ağırlığınca ek bağlayıcı olarak uçucu kül ilave edilmesi SSB'lerin mekanik ve geçirgenlik performansları artış göstermiştir.
- Katmanlar arası yerleştirme süresi uzadıkça soğuk derz etkilerinden dolayı SSB'lerin mekanik ve geçirgenlik özellikleri olumsuz yönde etkilenmiştir. Bu sürenin artışı, yarmada-çekme ve eğilme dayanımlarına kıyasla basınç dayanımını daha az etkilemiştir.

- Soğuk derzin meydana getirdiği olumsuz etkiler katmanlar arası yerleştirme süresinin artmasıyla daha belirgin hale gelmiştir. Bu soğuk derz etkileri fiziksel olarak gözlenmiştir. Özellikle ikinci katmanı 180 dakika gecikmeli yerleştirilen numunelerin mekanik ve geçirgenlik performanslarını bariz bir şekilde azaltmıştır.
- Katmanlar arası oluşan soğuk derz etkileri basınç altında su işleme derinliği yöntemi ile daha belirgin olarak tespit edilmiştir.
- Kontrol karışımına kıyasla, çimento yerine uçucu külün kullanıldığı karışımlarda (A serisi), uçucu kül miktarı arttıkça su emme oranlarının arttığı görülmüştür. Ancak agrega yerine uçucu kül kullanılan karışımlarında ise, uçucu kül miktarı arttıkça su emme oranlarının azaldığı görülmüştür. Tüm karışımlarda ikinci katmanın yerleştirme aralığı arttıkça su emme oranı artmıştır.
- SSB'lerde katmanların gecikmeli olarak dökümü, katmanlar arasında soğuk derz oluşumuna yol açmıştır. Soğuk derzin olumsuz etkileri, katmanların yerleştirme aralığı arttıkça artmıştır.
- Katmanlar arası yerleştirme aralığının ve donma çözülme çevrim sayısının artmasıyla SSB karışımlarının basınç dayanımında, ağırlığında, UPV ve dinamik elastisite modülü değerlerinde kayda değer mertebede azalma görülmüştür.
- SSB karışımlarında katmanlar arasında harç uygulanması donma çözülmeye karşı olan direncinin artmasını sağlamıştır.
- Durabilite faktörü açısından katmanlar arası harç uygulanan karışımların performansı daha yüksek olmuştur.

Öneriler

- Bu çalışmada uçucu kül kullanılmıştır. Farklı mineral katkı kullanımının soğuk derz oluşumuna etkisi araştırılabilir.
- SSB karışımlarda katmanlar arası gecikme süresi daha uzun tutularak soğuk derz oluşumuna etkisi araştırılabilir.
- Farklı çimento dozajı içeren SSB karışımlarda soğuk derzin oluşumu incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Abbaszadeh, R., & Modarres, A. (2017). Freeze-thaw durability of non-air-entrained roller compacted concrete designed for pavement containing cement kiln dust. *Cold Regions Science and Technology*, 141, 16-27.
- Abrams, J. M., & Jackshaw, J. L. (1987). An airport Apron and a county road. *Concrete International*, 9(2), 30-36.
- Abu-Khashaba, M. I., Adam, I., & El-Ashaal, A. (2014). Investigating the possibility of constructing low cost roller compacted concrete dam. *Alexandria Engineering Journal*, 53(1), 131-142.
- ACI (American Concrete Institute). (2011). Report on roller-compacted mass concrete. ACI 207.5R. Farmington Hills, MI: ACI.
- ACI 207 5R-99. (1999). Roller-compacted Mass Concrete. ACI Manual of Concrete Practice. Part 1, USA 47p.
- ACI 325.10R-99. (2004). State of the art report on roller compacted concrete pavement. ACI Manual of Concrete Practice, Author, USA, 32.
- ACI Committee 207.5R-99. (1988). Roller-compacted mass concrete. Reported by ACI Committee 207; 1988.
- Adamu, M., Mohammed, B. S., & 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.
- Aghaeipour, A., & Madhkhan, M. (2017). Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability. *Construction and Building Materials*, 141, 533-541.
- Aguiar, J. L., Camelo, A. M. R. O., & Ribeiro, A. C. B. S. (2002). Roller compacted concrete (RCC): strength and permeability of horizontal joints.
- Ağralıoğlu, N. (2004). Baraj planlama ve tasarımı: cilt 1. Su Vakfı Yayınları.
- Albuquerque, M. C., Balbo, J. T., Sansone, E. C., & Pinto, P. C. (2011). Fracture characterization of roller compacted concrete mixtures with blast furnace slag and industrial sand. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 4(4), 244.
- Andriolo, F. R. (1998). The use of roller compacted concrete. Oficina de textos
- Andriolo, F.R., Polat, O. (2006). Beydağ Barajı Gövde inşaatında Kullanılacak SSKD Agregası Raporu, İzmir, 17p.
- ASTM C109. (2021). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens), ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- ASTM C1170. (2020). Standard Test Method for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2020, www.astm.org
- ASTM C1435. (2020). Standard Practice for Molding Roller-Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- ASTM C642-13. (2013). Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org
- ASTM C666. (2015). Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org

- ASTM C672/C672M-03. (2012). Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals.
- ASTM D1557. (2007). Standard Test Methods For Laboratory Compaction Characteristics Of Soil Using Modified Effort. West Conshohocken, PA, USA: ASTM.
- ASTM D698. (2000). Standard Test Methods For Laboratory Compaction Characteristics Of Soil Using Standard Effort.
- ASTM C944. (2005). Standard Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Cutter Method.
- Atis, C. D. (2001). Uçucu külçeren, silindirle sıkıştırılabilen betonların özellikleri. *Turk J Engin Environ Sci*, 25, 503-515.
- Atiş, C. D., Sevim, U. K., Özcan, F., Bilim, C., Karahan, O. K. A. N., Tanrikulu, A. H., & Ekşi, A. (2004). Strength properties of roller compacted concrete containing a non-standard high calcium fly ash. *Materials Letters*, 58(9), 1446-1450.
- Azizmohammadi, M., Toufigh, V., & Ghaemian, M. (2021). Experimental and analytical investigation on the interlayer of roller compacted concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(5), 04021090.
- Banthia, N., & Mindess, S. (1989). Water permeability of cement paste. *Cement and Concrete Research*, 19(5), 727-736.
- Banthia, N., Pigeon, M., Marchand, J., & Boisvert, J. (1992). Permeability of roller compacted concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 4(1), 27-40.
- Bentz, D. P., & Ferraris, C. F. (2010). Rheology and setting of high volume fly ash mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 32(4), 265-270.
- Bily, P., Fládr, J., & Haase, M. (2015). Experimental verification of properties of roller-compacted concrete for pavements. In *Advanced Materials Research* (Vol. 1124, pp. 307-312). Trans Tech Publications Ltd.
- Cao, C., Sun, W., & Qin, H. (2000). The analysis on strength and fly ash effect of roller-compacted concrete with high volume fly ash. *Cement and Concrete Research*, 30(1), 71-75.
- CEB-FIP. (1989). Diagnosis and assessment of concrete structures, *state of art report*. *CEB Bull.* 192:83-5.
- Chhorn, C., Hong, S. J., & Lee, S. W. (2017). A study on performance of roller-compacted concrete for pavement. *Construction and Building Materials*, 153, 535-543.
- Chi, M., & Huang, R. (2014). Effect of circulating fluidized bed combustion ash on the properties of roller compacted concrete. *Cement and Concrete Composites*, 45, 148-156.
- Courard, L., Michel, F., & Delhez, P. (2010). Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 24(3), 390-395.
- Debieb, F., Courard, L., Kenai, S., & Degeimbre, R. (2009). Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, 23(11), 3382-3387.
- Delatte, N., Amer, N., & Storey, C. (2003). Improved management of RCC pavement technology. *UTCA Report*, 1231, 54.
- Diab, A. M., Abd Elmoaty, M., & Eldin, M. R. T. (2017). Slant shear bond strength between self compacting concrete and old concrete. *Construction and Building Materials*, 130, 73-82.

- Duan, Y., & Lai, G. (1995). Study on failure mechanism of roller compacted concrete gravity dam (in Chinese). In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts* (Vol. 8, No. 32, p. 401A).
- Elsharief, A., Cohen, M. D., & Olek, J. (2003). Influence of aggregate size, water cement ratio and age on the microstructure of the interfacial transition zone. *Cement and concrete research*, 33(11), 1837-1849.
- Army Corps of Engineers. (2000). Roller-Compacted Concrete. EM 1110-2-2006, Department of the Army, Washington, DC 15 January.
- Erdoğan, T. Y., Beton. (2003). O. D. T. Ü. Geliştirme Vakfı Yay. ve İletişim AŞ. 741s.
- Fakhri, M., & 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. (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.
- Gauthier, P., & Marchand, J. (2005). Design and construction of roller compacted concrete in Quebec. *The Cement Association of Canada (CAC), Ottawa, Canada*.
- Ghahari, S. A., Mohammadi, A., & Ramezani pour, A. A. (2017). Performance assessment of natural pozzolan roller compacted concrete pavements. *Case studies in Construction Materials*, 7, 82-90.
- Guerinet, M. (1997). Roller Compacted Concrete, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. *Ponts formation édition*, 17-29.
- Hansen, K. D., & Reinhardt, W. G. (1991). Roller-compacted concrete dams. McGraw-Hill Companies.
- Harrington, D., Abdo, F., Ceylan, H., Adaska, W., Hazaree, C., & Bektas, F. (2010). Guide for roller-compacted concrete pavements. PCA.
- Hashemi, M., Shafiqh, P., Karim, M. R. B., & Atis, C. D. (2018). The effect of coarse to fine aggregate ratio on the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 169, 553-566.
- Hazaree, C. V. (2007). Transport properties and freeze-thaw resistance of roller compacted concrete (RCC) for pavement applications. Master's thesis, Iowa State University, Ames, USA.
- Hazaree, C., Ceylan, H., Wang, K. (2011). Influences of mixture composition on properties and freeze-thaw resistance of RCC. *Construction and Building Materials*, 25(1): 313-319.
- He, Y., Zhang, X., Hooton, R. D., Zhang, X. (2017). Effects of interface roughness and interface adhesion on new-to-old concrete bonding. *Construction and Building Materials*, 151: 582-590.
- Hesami, S., Modarres, A., Soltaninejad, M., Madani, H. (2016). Mechanical properties of roller compacted concrete pavement containing coal waste and limestone powder as partial replacements of cement. *Construction and Building Materials*, 111: 625-636.
- Holder, R. (1984). Roller compacted concrete pavement tactical equipment hardstand, line item 434. *Contract No. DACA83-C-0188, Fort Hood, Tex., Fort Worth District, Corps of Engineers*.
- Horzum, U.S. (2009). Silindirle sıkıştırılmış betonun basınç dayanımının hızlandırılmış deney yöntemleri kullanılarak belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye.

- Huang, Y. H. (1993). Pavement analysis and design. Upper Saddle River, United States, 2nd edition, 14-16.
- LaHucik, J., Roesler, J. (2015). Low fines content roller-compacted concrete. *In Airfield and Highway Pavements*, (441-452).
- Jaafar, M. S., Noorzaei, J., Abdulrazeg, A. A., Mohammed, T. A., Khanehzaei, P. (2011). A Spatial fem model of thermal and mechanical action in rcc dam. *Structural Longevity*, 5(3): 147-155.
- Junrui, C., Kanghong, L., Yanqing, W., Shouyi, L. (2005). Coupled seepage and stress fields in roller compacted concrete dam. *Communications in Numerical Methods in Engineering*, 21(1): 13-21.
- Karimpour, A. (2010). Effect of time span between mixing and compacting on roller compacted concrete (RCC) containing ground granulated blast furnace slag (GGBFS). *Construction and Building Materials*, 24(11): 2079-2083.
- Khayat, K. H., & Libre, N. A. (2014). Roller compacted concrete: field evaluation and mixture optimization. Missouri University of Science and Technology. Center for Transportation Infrastructure and Safety.
- Khayat, K. H., Libre, N. A., & Wu, Z. (2019). *Roller compacted concrete for rapid pavement construction*. Research on Concrete Applications for Sustainable Transportation (RE-CAST) (UTC).
- Koichi, U., Yajima, K. (1991). Miyagase Dam to employ innovative RCD methods. *Water Power & Dam Construction*, 17-20.
- Kokubu, K., Cabrera, J. G., Ueno, A. (1996). Compaction properties of roller compacted concrete. *Cement and Concrete Composites*, 18(2): 109-117.
- Larson, J. L. (1986). Roller-compacted concrete pavement design practices for intermodal freight terminals at the port of Tacoma. *State-of-the-art Report*, (4).
- Leslie, J. R., Cheesman, W. J. (1949). An ultrasonic method of studying deterioration and cracking in concrete structures. *Journal of the American Concrete Institute*, 21(1): 17-36.
- Li, M. C., Guo, X. Y., Shi, J., Zhu, Z. B. (2015). Seepage and stress analysis of anti-seepage structures constructed with different concrete materials in an RCC gravity dam. *Water Science and Engineering*, 8(4): 326-334.
- Li, Q., Zhang, F., Zhang, W., Yang, L. (2002). Fracture and tension properties of roller compacted concrete cores in uniaxial tension. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 14(5): 366-373.
- Lin, Y., Karadelis, J. N., Xu, Y. (2013). A new mix design method for steel fibre-reinforced, roller compacted and polymer modified bonded concrete overlays. *Construction and Building Materials*, 48: 333-341.
- Liu, D., Li, Z., Liu, J. (2015). Experimental study on real-time control of roller compacted concrete dam compaction quality using unit compaction energy indices. *Construction and Building Materials*, 96: 567-575.
- Liu, G., Lu, W., Lou, Y., Pan, W., Wang, Z. (2018). Interlayer shear strength of Roller compacted concrete (RCC) with various interlayer treatments. *Construction and Building Materials*, 166: 647-656.
- Liu, S., Li, Q., Rao, M., Wang, L. (2017). Properties and microstructure of roller compacted concrete with high volume low quality fly ash. *Materials Science*, 23(3): 273-279.
- Ludwig, D., Nanni, A., Shoenberger, J. E. (1994). Application of roller-compacted concrete (rcc) technology to roadway paving.

- Ma, H., Li, Z. (2014). Multi-aggregate approach for modeling interfacial transition zone in concrete. *ACI Materials Journal*, 111(2): 189.
- Madhkan, M., Azizkhani, R., Harchegani, M. T. (2012). Effects of pozzolans together with steel and polypropylene fibers on mechanical properties of RCC pavements. *Construction and Building Materials*, 26(1): 102-112.
- Mardani-Aghabaglou, A. (2011). Uçucu Küllü Silindirle Sıkıştırılmış Betonlarda Dayanıklılık. Yüksek Lisans Tezi, Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Mardani-Aghabaglou, A., Ramyar, K. (2013). Mechanical properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method. *Construction and Building Materials*, 38: 356-364.
- Mardani-Aghabaglou, A., Andiç-Çakir, Ö., Ramyar, K. (2013). Freeze–thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method. *Cement and Concrete Composites*, 37: 259-266.
- Meddah, A., Beddar, M., Bali, A. (2014). Use of shredded rubber tire aggregates for roller compacted concrete pavement. *Journal of Cleaner Production*, 72: 187-192.
- Mehta P.K. and Monteiro P.J.M. (2006). Concrete: Microstructure, Properties, and Materials, Third Edition, McGraw-Hill, 659p.
- Mehta, P. K. (1999). Concrete technology for sustainable development: An overview of essential principles. In Vancouver CANMET/ACI International Symposium on Concrete Technology for Sustainable Development, Dec (Vol. 14).
- Mindness, S., Young J.F., Darwin D. (1981). Concrete, Second Edition, Pearson Education, Inc. Upper Saddle River, NJ 07458, 543p.
- Modarres, A., Hosseini, Z. (2014). Mechanical properties of roller compacted concrete containing rice husk ash with original and recycled asphalt pavement material. *Materials & Design*, 64: 227-236.
- Mohammadi Rad, S. A., Modarres, A. (2017). Durability properties of non-air entrained roller compacted concrete pavement containing coal waste ash in presence of de-icing salts. *Cold Regions Science and Technology*, 137: 48-59.
- Nagataki, S., Fujisawa, T., Kawasaki, H. (2008). State of art of RCD dams in Japan. In 50° Congresso brasileiro do concreto, Salgado (1st Brazilian RCC Symposium september 2008).
- Neville, A. M. (2011). Properties of concrete. 5th edition. Pearson Education Limited. London: Longman.
- Nili, M., Zaheri, M. (2011). Deicer salt-scaling resistance of non-air-entrained roller-compacted concrete pavements. *Construction and Building Materials*, 25(4): 1671-1676.
- Omran, A., Harbec, D., Tagnit-Hamou, A., Gagne, R. (2017). Production of roller-compacted concrete using glass powder: Field study. *Construction and Building Materials*, 133: 450-458.
- Ouellet, E. (1998). Design and study of the mechanical behaviour of Roller Compacted Concrete. Master Thesis, Université Laval, Canada.
- Özcan, S. (2008). Bonding efficiency of roller compacted concrete with different bedding mixes (Master's thesis, Middle East Technical University).
- Özkan, Ö. (2006). Çelikhane ve yüksek fırın cürufu katkılı portland çimentosunun özellikleri. *Teknik Dergi*, 17(83): 3893-3902.
- Pavan, S., Rao, S. K. (2014). Effect of fly ash on strength characteristics of roller compacted concrete pavement. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 11(6): 04-08.

- PCA. (2004). Portland Cement Association, Frost Durability of Roller Compacted Concrete Pavements, Service d'Expertise en Matériaux Inc., Research and Development Bulletin RD135, Canada, 138p.
- Piggott, R. W. (1999). Roller-compacted Concrete Pavements: A Study of Long Term Performance. Portland Cement Association.
- Pittman, D. W. (1994). Development of a design procedure for roller-compacted concrete (RCC) pavements. Geotechnical Laboratory (U.S.) Engineer Research and Development Center (U.S.)
- Postacıoğlu, B. (1987). Beton: bağlayıcı maddeler, agregalar, beton. Teknik Kitaplar Yayınevi.
- Qasrawi, H. Y., Asi, I. M., Wahhab, H. A. A. (2005). Proportioning RCCP mixes under hot weather conditions for a specified tensile strength. *Cement and Concrete Research*, 35(2): 267-276.
- Qian, P., Xu, Q. (2018). Experimental investigation on properties of interface between concrete layers. *Construction and Building Materials*, 174: 120-129.
- Ramezaniyanpour, A. A., Mohammadi, A., Dehkordi, E. R., Chenar, Q. B. (2017). Mechanical properties and durability of roller compacted concrete pavements in cold regions. *Construction and Building Materials*, 146: 260-266.
- Rao, S. K., Sravana, P., Rao, T. C. (2015). Strength and Compaction Characteristics of Fly Ash Roller Compacted Concrete. *International Journal of Scientific Research in Knowledge*, 3(10): 260-269.
- Rao, S. K., Sravana, P., Rao, T. C. (2016a). Investigating the effect of M-sand on abrasion resistance of roller compacted concrete containing GGBS. *Construction and Building Materials*, 122: 191-201.
- Rao, S. K., Sravana, P., Rao, T. C. (2016b). Investigating the effect of M-sand on abrasion resistance of fly ash roller compacted concrete (FRCC). *Construction and Building Materials*, 118: 352-363.
- Rao, S. K., Sravana, P., Rao, T. C. (2016c). Abrasion resistance and mechanical properties of Roller Compacted Concrete with GGBS. *Construction and Building Materials*, 114: 925-933.
- Ribeiro, A. B., Diez-Cascon, J., Gonçalves, A. F. (2001). Roller compacted concrete-tensile strength of horizontal joints. *Materials and Structures*, 34(7): 413-417.
- Rongmei, J., Wei, F. (2007). Impact of Interlayer and size effect on the mechanical performances of fully graded RCC [J]. *Water Power*, 4: 008.
- Schnabel Engineering Associates, Inc. (2003). Design manual for small rcc dams, portland cement association.
- Sha, S., Lei, Z., Zhang, X. (2016). Study on failure mechanism of roller compacted concrete gravity dams by an isotropic damage model. In 2016 International Conference on Smart City and Systems Engineering (ICSCSE), November, 2016. (pp. 68-71).
- Sun, W., Liu, J., Qin, H., Zhang, Y., Jin, Z., Qian, M. (1998). Fatigue performance and equations of roller compacted concrete with fly ash. *Cement and Concrete Research*, 28(2): 309-315.
- Tayabji, S. D., Sherman, T. W., Keifer, O., Nanni, A., Piggott, R. W., Pittman, D., Scott, J. A. (1995). State-of-the-art report on roller-compacted concrete pavements.
- Tokuyai, M. (2016). Cement and concrete mineral admixtures. CRC Press.

- Topličić-Ćurčić, G., Grdić, D., Ristić, N., Grdić, Z. (2015). Properties, materials and durability of rolled compacted concrete for pavements. *Zaštita materijala*, 56(3): 345-353.
- TS EN 197-1. (2012). Cement - Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements, 40p.
- TS EN 206+A2. (2021). Concrete - Specification, performance, production and conformity, 105p.
- TS EN 450-1. (2013). Fly ash for concrete - Part 1: Definition, specifications and conformity criteria, P 33.
- US Army Corps of Engineers (USACE). (2000). Roller Compacted Concrete, Engineer Manual, EM 1110-2-2006, 56p.
- Üte, A. A. (2008). Uçucu kül ve polipropilen lif kullanımının silindirle sıkıştırılmış beton özelliklerine etkisi, Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Vahedifard, F., Nili, M., Meehan, C. L. (2010). Assessing the effects of supplementary cementitious materials on the performance of low-cement roller compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 24(12): 2528-2535.
- Vahidi, E. K., Malekabadi, M. M., Rezaei, A., Roshani, M. M., Roshani, G. H. 2017. Modelling of mechanical properties of roller compacted concrete containing RHA using ANFIS. *Computers and Concrete*, 19(4): 435-442.
- Van den Heede, P., Gruyaert, E., De Belie, N. (2010). Transport properties of high-volume fly ash concrete: Capillary water sorption, water sorption under vacuum and gas permeability. *Cement and Concrete Composites*, 32(10): 749-756.
- Williams, B. A., Green, B. H., Andreatta, R. A., Morson, J. A., Taylor, M. K., Walker, K. E., Hart, W. S. (2013). Investigation of lift bonding for roller-compacted concrete with low normal loads at variable placement times. Engineer research and development center vicksburg ms geotechnical and structures lab. US Army Corps of Engineers Washington, DC.
- Williams, S. G. (2014). Construction of roller-compacted concrete pavement in the Fayetteville Shale Play area, Arkansas. *Transportation Research Record*, 2408(1): 47-54.
- Won, J.P., Jang, C-II., Lee, S-W., Kim, W-Y. (2009). Durability performance of roller compacted concrete using fly ash. Proc. Int. Symp. "Brittle Matrix Composites 9", October 25-28, 2009, Warsaw, Poland.
- Wu, Z., Mahdi, M., Rupnow, T. D. (2016). Accelerated pavement testing of thin RCC over soil cement pavements. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 9(3): 159-168.
- Yerramala, A., Babu, K. G. (2011). Transport properties of high volume fly ash roller compacted concrete. *Cement and Concrete composites*, 33(10): 1057-1062.
- Zdiri, M., Abriak, N. E., Ouezdou, M. B., Neji, J. (2009). The use of fluvial and marine sediments in the formulation of roller compacted concrete for use in pavements. *Environmental Technology*, 30(8): 809-815.
- Zhang, G. X., Liu, G. T., Wu, Y. (1996). Harmonic thermal fracture of multiple crack system and the stability of cracks in RCC arch dam. *Engineering fracture Mechanics*, 54(5): 653-665.
- Zhang, S. R., Wang, X. H., Wang, C., Song, R., Huo, H. Y. (2017). Compressive behavior and constitutive model for roller compacted concrete under impact loading: Considering vertical stratification. *Construction and Building Materials*, 151: 428-440.

Zhu, X., Guo, Z., Yang, W., Cheng, B. (2020). Effects of double expansion agents on the properties of interlayer in roller-compacted concrete. *Construction and Building Materials*, 262: 120909.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Sultan Husein BAYQRA

Doğum Yeri ve Tarihi:

Yabancı Dil: İngilizce, Almanca, Farsça, Özbekçe

Eğitim Durumu

Lisans: Gaziosman paşa üniversitesi

Yüksek Lisans :Uludağ üniversitesi

İletişim (e-posta):

Yayınları: