
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILABİLİR İKİ TABAKALI BETON KAPLAMALAR ARASI BAĞ PERFORMANSININ DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

Ahmet Gürkan GÜNGÖR

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

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

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ahmet Gürkan GÜNGÖR

20/12/2021

SİLİNDİRLE SIKIŞTIRILABİLİR İKİ TABAKALI BETON KAPLAMALAR ARASI BAĞ PERFORMANSININ DENEYSEL OLARAK BELİRLENMESİ

(Doktora Tezi)

Ahmet Gürkan GÜNGÖR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2021

ÖZET

Bu çalışmada, son yıllarda kullanımı yaygınlaşmakta olan silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) yol üstyapıların Türkiye için önemi değerlendirilmiştir. Bununla birlikte; iki tabaka serilen SSB kaplamalar arası bağ performansını değerlendirmek amacıyla, farklı ürünler kullanılarak laboratuvar ölçeğinde deneyler yapılmış, en iyi sonucu veren ara yüzey elemanı ile gerçek bir yol kesiminde iki tabaka SSB inşa edilmiş ve sonuçlar değerlendirilmiştir. Aynı trafik, çevre ve iklim koşulları ile aynı taban zemini dayanımlarında; SSB yol üstyapıların, bitümlü sıcak karışım (BSK) yol üstyapılara göre genel olarak %33-38 daha ekonomik olduğu belirlenmiştir. Tüm proje sürelerinde ve düşük yoğunlukta trafik hacimlerinde ortalama %27,5 olan ekonomiklik oranı, yüksek yoğunlukta trafik hacimlerinde %43,5 olmaktadır. Bağ performansının incelenmesi amacıyla, karışım tasarımı ile belirlenen 300 kg çimento ve %5 optimum su içeriğinde hazırlanan SSB tabakaları arasına, altı farklı ara yüzey elemanı/işlemi uygulanarak eğimli kesme deneyleri yapılmıştır. Eğimli kesme deneyinde en iyi performansı veren aderans harçlı ara yüzey elemanı ile hazırlanan kiriş numuneleri üzerinde, dört nokta kiriş eğilme dayanımı tayini deneyi gerçekleştirilmiştir. Aderans harcı kullanılarak hazırlanan numunelerin basınç dayanımı ve kiriş eğilme dayanımları, tek tabaka numuneye yakın değerler verdiğinden, aderans harcının ara yüzey elemanı olarak kullanılabileceği görülmüştür. Gerçek bir yol kesiminde; tek tabaka, iki tabaka arası aderans harçlı ve iki tabaka ara yüzey elemansız SSB olmak üzere üç kesim halinde uygulama yapılmıştır. Uygulama sonrasında alınan açılı karot ve kiriş numunelerine eğimli kesme ve dört nokta kiriş eğilme dayanımı deneyleri yapılmış, her iki deneyde de aderans harçlı numuneler, referans numune dayanımlarının %98 ine ulaşmıştır. İki tabaka ara yüzey elemansız SSB kaplamadan alınanan kiriş numuneleri eğilme dayanımları referans numunenin %54 üne ulaşabilmiştir.

Bilim Kodu	:	91105
Anahtar Kelimeler	:	Silindirle sıkıştırılabilir beton, iki tabaka, bağ peformansı bağ dayanımı, eğimli kesme deneyi, kiriş eğilme deneyi
Sayfa Adedi	:	166
Danışman	:	Prof. Dr. Yüksel YILMAZ
İkinci Danışman	:	Prof. Dr. İ. Özgür YAMAN

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF BONDING PERFORMANCE BETWEEN TWO LAYER ROLLER COMPACTED CONCRETE PAVEMENT

(Ph. D. Thesis)

Ahmet Gurkan GUNGOR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2021

ABSTRACT

In this study, the importance of roller compacted concrete (RCC) pavements in Turkey was evaluated. Additionally, taking into account the lack of research on this topic, various laboratory experiments were conducted using different products to measure the bond performance between two-layer RCC pavements and the best resulting bond material was used to build RCC pavements on a real road and its performance was assessed. Under same traffic, environmental and climatic factors and same bearing capacity of subgrade, RCC pavements were determined to be 33% to 38% more economical than their hot mix asphalt mixture (HMA) pavement counterparts. While revenue to cost ratio in all project durations and low density traffic volumes was 27,5%, this ratio increased to 43,5% for high density traffic volumes. In order to evaluate the bond performance, RCC layers were prepared mixing 300 kg cement with the optimum 5% water content and six different bond materials/processes were used for slant shear test. Then, four-point flexural strength test and depth penetration under water pressure test were conducted on beam specimens made with coating material containing silica fume, the best performing bonding material. Since compressive strength and flexural strength of the specimens prepared with the silica fume were similar to those of single layer specimen, it was seen that silica fume specimens could be used as bonding mixtures. On a real road, RCC pavements were applied as three sections: one layer, two-layer with silica fume bonding material and two-layer without any bonding material. After this application, slant shear test and four-point flexural strength test were conducted on the angular core and beam specimens. Based on the results of both tests, the sample containing silica fume bonding material was measured to reach 98% of the reference sample strength; whereas flexural strength of the two-layer RCC pavement with no bonding material included was only measured at 54% of the reference sample.

Science Code : 91105
Key Words : Roller compacted concrete, two layer, bonding performance, bond strength, flexural strength, slant shear test
Page Number : 166
Supervisor : Prof. Dr. Yuksel YILMAZ
Co-Supervisor : Prof. Dr. I. Ozgur YAMAN

TEŞEKKÜR

Doktora tez çalışmamda değerli fikirlerini, tecrübe ve bilgi birikimlerini esirgemeyen danışman hocalarım Sayın Prof. Dr. Yüksel YILMAZ ve Sayın Prof. Dr. İ. Özgür YAMAN'a çok teşekkür ederim. Değerli hocalarımın mesleklerini sevmeleri, iş disiplinleri, çalışma şekilleri, öğretme yöntemleri ve tarafıma yapıcı yaklaşımları için kendilerine minnettar kalacağımı belirtmek isterim.

Doktora tez çalışmam sırasında tez izleme toplantılarına katılarak değerli görüşlerini esirgemeyerek beni yönlendiren, Sayın Prof. Dr. Ali Payidar AKGÜNGÖR ile Sayın Doç. Dr. M. Kürşat ÇUBUK'a teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım kapsamında, ODTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarında deneylerin tasarlanması ve gerçekleştirilmesinde tecrübelerini paylaşan ve yardımlarını esirgemeyen Dr. Burhan Aleessa ALAM'a, laboratuvar çalışanları Sn. Cuma YILDIRIM ve Sn. Sadık KARAKAŞ ile Türkiye Çimento Sanayicileri Birliği Derneği'nden İnş. Müh. Barış Can AKBELEN ve "Geopave Müş. Müh. Prj. Ltd. Şti.'den İnş. Müh. Murat Can YILMAZ'a çok teşekkür ederim.

Son olarak, doktora çalışmalarım sürecinde beni hiç yalnız bırakmayarak sağladığı motivasyon, sonsuz destek ve sabrı için sevgili eşim ve meslektaşım Sn. Nehir GÜNGÖR ile babaları olmakla gurur duyduğum oğlum Ahmet Berk ve kızım Nilüfer Sena'ya teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ xi

ŞEKİLLERİN LİSTESİ xiv

RESİMLERİN LİSTESİ xvi

SİMGELER VE KISALTMALAR xix

1. GİRİŞ 1

2. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI 9

2.1. Giriş 9

2.2. Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar 9

2.2.1. Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) karışım tasarımı 9

2.2.2. Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) karışımlarda lif kullanımı 14

2.2.3. SSB sıkıştırılmasında kullanılan laboratuvar teknikleri 15

2.2.4. SSB karışımlarda çimento ikame edici malzeme kullanımı 18

2.2.5. SSB karışımlarda agrega ikame edici malzeme kullanımı 22

2.3. İki Tabakalı Beton Kaplamalar 23

2.3.1. İki tabakalı geleneksel beton kaplamalar 23

2.3.2. İki tabakalı silindirle sıkıştırılmış beton kaplamalar 27

3. SSB YOLLARIN TÜRKİYE İÇİN ÖNEMİ 31

3.1. Türkiye'de Beton Yollar 31

3.2. KGM Pratiğinde BSK ve SSB Üstyapıların Kalınlık Tasarımı 34

3.2.1. Yol sınıfı, güvenilirlik, SSB plak bozulma oranı ve proje ömrü 34

Sayfa

3.2.2. Trafik hesapları için parametreler 35
3.2.3. Tasarım trafiği 36
3.2.4. Zemin sınıflarına ilişkin parametreler 39
3.2.5. SSB ve BSK üstyapı tabakaları malzeme özellikleri 40
3.2.6. Zayıf taban zeminlerinde koruyucu tabaka kalınlıkları 41
3.3. Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) Üstyapı Kalınlık Tasarımı 42
3.4. Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Yol Kalınlık Tasarımı 45
3.5. BSK Yol Birim Fiyatları 47
3.5.1. Birim fiyata dâhil olan masraflar 47
3.5.2. Birim fiyata dâhil olmayan masraflar 49
3.6. SSB Yol Birim Fiyatları 51
3.6.1. SSB yollarda kür uygulaması ve derz yapılması birim fiyatları 52
3.6.2. SSB donatı miktarı ve maliyetleri 53
3.7. Temel ve Alttemel Tabakaları Birim Fiyatları 56
3.7.1. Birim fiyata dâhil olmayan masraflar 56
3.7.2. Temel ve alttemel birim fiyatları toplam maliyeti 57
3.8. Koruyucu Tabaka Maliyetleri 57
3.9. Reglaj Yapılması Maliyeti 58
3.10. Ekonomik Karşılaştırma ve Değerlendirmeler 59
3.10.3. İl yolu geometrik özellikleri 59
3.10.4. BSK ve SSB maliyet kıyaslaması 60
4. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI 65
4.1. Malzemeler 66
4.1.1. Agrega 66
4.1.2. Çimento 67
4.1.3. Su 68

Sayfa

4.2. Karışım Tasarımı 68
4.2.1. Sıkıştırma yöntemi 72
4.2.2. Vebe deneyi 74
4.2.3. Su içeriği basınç dayanımı ilişkisi 76
4.3. İki Tabaka Arası Bağ Dayanımı Deneyleri 81
4.3.1. Ara yüzey elemanları ve işlemleri 82
4.3.2. Eğimli kesme deneyi 87
4.3.3. Kiriş eğilme deneyleri 98
4.3.4. Basınçlı su işleme derinliği tayini 103
5. ARAZİ ÇALIŞMALARI 107
5.1. Arazi Çalışmalarının Lokasyonu 107
5.2. Arazide Uygulanan Karışım Tasarımı 108
5.3. Beton Santrali ve Serme Sıkıştırma Ekipmanları 111
5.4. Uygulama Aşamaları 114
5.4.1. SSB serimi yapılacak yüzeyin hazırlanması 114
5.4.2. SSB üretilmesi ve nakli 114
5.4.3. SSB serimi ve sıkıştırılması 114
5.4.4. İki tabaka SSB uygulamasında aderans harcının kullanımı 115
5.4.5. Kür işlemleri 116
5.4.6. Derz işlemleri 117
5.4.7. SSB imalatın kalite kontrol çalışmaları 118
5.5. Karot Çalışmaları ve Deneyleri 120
5.5.1. Açılı silindir karot alma çalışmaları ve basınç dayanımı deneyleri 120
5.5.2. Kiriş karot alma çalışmaları ve kiriş eğilme deneyleri 123
6. SONUÇ VE ÖNERİLER 129
6.1. SSB Yolların Türkiye İçin Önemi 129

Sayfa

6.2. Laboratuvar Çalışmaları Sonuçları 130

6.3. Arazi Çalışmaları Sonuçları 132

KAYNAKLAR 135

EKLER 141

EK-1. BSK ve SSB Tasarım Parametre ve Kalınlıkları 142

EK-2. Dört nokta kiriş eğilme deneyi sonucu elde edilen eksenel kuvvet-deplasman ilişkileri 148

ÖZGEÇMİŞ 162

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. KGM beton yol uygulamaları 32

Çizelge 3.2. Trafik artış katsayıları 35

Çizelge 3.3. Taşıt eşdeğerlik faktörleri 35

Çizelge 3.4. Trafik hacimlerine ilişkin toplam standart dingil yükü tekerrür sayıları 36

Çizelge 3.5. 20 yıl proje süresi için toplam standart dingil yükü tekerrür sayıları ($T_{8.2}$) hesap detayları 37

Çizelge 3.6. 30 yıl proje süresi için toplam standart dingil yükü tekerrür sayıları ($T_{8.2}$) hesap detayları 38

Çizelge 3.7. Zemin sınıfları 39

Çizelge 3.8. Zemin yaş CBR % değerleri 39

Çizelge 3.9. Kullanılan SSB karışım özellikleri 40

Çizelge 3.10. Esnek üstyapı tabaka katsayıları 41

Çizelge 3.11. Koruyucu tabaka özellikleri 41

Çizelge 3.12. Koruyucu tabaka kalınlıkları 42

Çizelge 3.13. 20 yıl proje süresi için BSK üstyapı tabaka kalınlıkları 44

Çizelge 3.14. 30 yıl proje süresi için BSK üstyapı tabaka kalınlıkları 45

Çizelge 3.15. 20 yıl proje süresi için SSB üstyapı tabaka kalınlıkları 46

Çizelge 3.16. 30 yıl proje süresi için SSB üstyapı tabaka kalınlıkları 46

Çizelge 3.17. Değişen kalınlıklarda bitümlü temel tabakası yapılmasına ilişkin birim fiyatlar 47

Çizelge 3.18. Değişen kalınlıklarda binder tabakası yapılmasına ilişkin birim fiyatlar . 48

Çizelge 3.19. Taş mastik asfalt aşınma tabakası yapılmasına ilişkin birim fiyat 48

Çizelge 3.20. BSK maliyet hesaplamalarında kullanılan karışım yoğunlukları ve bitümlü bağlayıcı oranları 49

Çizelge 3.21. BSK maliyet hesaplamalarında kullanılan taşıma parametreleri 49

Çizelge 3.22. BSK yol birim fiyata dâhil olmayan masraflar 51

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.23. SSB yol birim fiyatları 53
Çizelge 3.24. Donatı imalatına ilişkin birim fiyatlar 55
Çizelge 3.25. Plentmiks temel ve alttemel tabakası birim fiyatları 56
Çizelge 3.26. Temel ve altemel maliyet hesap parametreleri 56
Çizelge 3.27. Plentmiks temel ve alttemel tabakası toplam birim fiyatları 57
Çizelge 3.28. Koruyucu tabaka yapılması birim fiyatı 58
Çizelge 3.29. Reglaj Maliyetleri 59
Çizelge 3.30. İl yolu geometri özellikleri 59
Çizelge 3.31. 20 yıl proje süresi için maliyet karşılaştırması 60
Çizelge 3.32. 30 yıl proje süresi için maliyet karşılaştırması 62
Çizelge 3.33. Proje süreleri ortalama ekonomiklik oranları 63
Çizelge 4.1. İri agrega fiziksel özellikleri 66
Çizelge 4.2. İnce agrega fiziksel özellikleri 67
Çizelge 4.3. Çimento kimyasal ve fiziksel özellikleri 68
Çizelge 4.4. Çimento dayanım özellikleri 68
Çizelge 4.5. SSB tabakası gradasyon limitleri 69
Çizelge 4.6. 1 m³ SSB için bileşen miktarları 70
Çizelge 4.7. Çalışmada kullanılan iki tabakalı ara yüzey elemanları ve işlemleri 82
Çizelge 4.8. Çalışmada kullanılan Lateks'in fiziksel özellikleri 83
Çizelge 4.9. Epoksi reçinenin fiziksel özellikleri 84
Çizelge 4.10. Aderans harcı fiziksel özellikleri 85
Çizelge 4.11. Bitümlü yapıştırıcı fiziksel özellikleri 86
Çizelge 4.12. Ortalama eğimli kesme dayanım değerleri 96
Çizelge 4.13. Kiriş eğilme dayanımı değerleri 102
Çizelge 5.1. Agrega fiziksel özellikleri 108
Çizelge 5.2. Agrega elek analizi 109

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 5.3. SSB bileşen miktarları 110

Çizelge 5.4. Ekipman listesi..... 111

Çizelge 5.5. İki tabakalı SSB uygulamasının rölatif sıkılıkları 119

Çizelge 5.6. SSB yol uygulamasından alınan numunelerin basınç dayanım değerleri... 122

Çizelge 5.7. Kiriş eğilme dayanımı değerleri 125

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. ABD'de SSB proje büyüklüğü-kullanım alanı ilişkisi 4

Şekil 1.2. ABD'de SSB kaplama proje sayısı - plak kalınlığı ilişkisi..... 6

Şekil 1.3. IRI değişiminin yakıt tüketimine etkisi 7

Şekil 2.1. Vebe süresi – su içeriği ve kum/agrega (s/a=%30,58 ve 70) ilişkisi 10

Şekil 2.2. İri/ince agrega oranı - 28 günlük (a) yarmada çekme dayanımı ve (b) eğilmede çekme dayanımı ilişkisi 11

Şekil 2.3. 28 günlük basınç dayanımı ve porozite ilişkisi..... 12

Şekil 2.4. SEM ve BEM başlangıç kırılma enerjisi s/ç oranı ilişkisi..... 13

Şekil 2.5. Donma çözülme döngüsü sonrası, MS lif katkılı SSB numunelerinin basınç dayanım değerleri 14

Şekil 2.6. Proctor ve yoğurmalı sıkıştırma (çeşitli yoğurma sayıları için) metotları, su içeriği – yoğunluk ilişkisi 16

Şekil 2.7. Basınç dayanımı – rölatif sıkılık ilişkisi 17

Şekil 2.8. Nominal basınç dayanımı – rölatif sıkılık ilişkisi..... 18

Şekil 2.9. Çapraz bağlı polietilen (XLPE) içeriği - eğilme dayanımı ilişkisi 22

Şekil 2.10. İri agrega boyutunun yarmada çekme dayanımına etkisi 25

Şekil 2.11. Farklı yüzey dokularında 10 günlük ortalama bağ dayanımı 26

Şekil 3.1. SN ile tabaka kalınlık kontrolü 43

Şekil 3.2. Kayma demiri yerleşimi 54

Şekil 3.3. Bağ demiri yerleşimi..... 55

Şekil 4.1. Agrega gruplarına ait dane dağılım eğrileri..... 67

Şekil 4.2. SSB karışımı agrega gradasyonu..... 70

Şekil 4.3. Taze yaş yoğunluk, su içeriği ilişkisi..... 73

Şekil 4.4. Rölatif sıkılık - su içeriği ilişkisi 74

Şekil 4.5. Farklı su içeriğinde hazırlanan karışımların Vebe süreleri..... 76

Şekil 4.6. 7 günlük basınç dayanımı su içeriği ilişkisi..... 78

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.7. 28 günlük basınç dayanımı su içeriği ilişkisi 79

Şekil 4.8. 90 günlük basınç dayanımı su içeriği ilişkisi 79

Şekil 4.9. Vebe süresi – basınç dayanımı ilişkisi 80

Şekil 4.10. Basınç dayanımı – Rölatif Sıkılık İlişkisi 81

Şekil 4.11. Ara yüzey elemansız [Y] ve Lateks [L] numunelerin basınç dayanımları ... 89

Şekil 4.12. Ara yüzey elemansız [Y] ve Epoksi reçine [E] numunelerin basınç dayanımları 90

Şekil 4.13. Ara yüzey elemansız [Y] ve Aderans harcı [A] numunelerin basınç dayanımları 91

Şekil 4.14. Ara yüzey elemansız [Y] ve Bitümlü yapıştırıcı [B] numunelerin basınç dayanımları 92

Şekil 4.15. Ara yüzey elemansız [Y] ve Pürüzlü yüzey [P] numunelerin basınç dayanımları 93

Şekil 4.16. Referans [R] ve Ara yüzey elemansız [Y] numunelerin basınç dayanımları 94

Şekil 4.17. Silindir numunelerin kabul edilebilir kırılma şekilleri 97

Şekil 4.18. Kiriş eğilme dayanımı deney düzeneği şematiği 98

Şekil 4.19. Tek tabaka kiriş numunelerinin kür süresi kiriş eğilme dayanımı ilişkisi 102

Şekil 5.1. Karışım gradasyonu ve şartname limitleri 110

Şekil 5.2. Açılı karot numune alımı ve basınç dayanımı deneyine hazırlanmasının şematik gösterimi 121

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 1.1. SSB banket uygulaması, Atlanta, GA..... 2

Resim 1.2. SSB yol uygulaması, Alanya, 2021 2

Resim 4.1. Deneysel çalışmaların yapıldığı sırada, ODTÜ yapı malzemesi laboratuvarı genel görünümü 65

Resim 4.2. SSB karışımın tamburlu karıştırıcıda hazırlanması 71

Resim 4.3. SSB'nin döküm yerinde harmanlanarak homojen hale getirilmesi 71

Resim 4.4. SSB numunelerinin titreşimli tokmak ile sıkıştırılması..... 72

Resim 4.5. Vebe deney düzeneği..... 75

Resim 4.6. Vebe deneyi kısmi harç halkası oluşumu 75

Resim 4.7. Bazı numunelerin kür, kesim ve kükürt başlık aşamaları..... 77

Resim 4.8. Basınç dayanımı test cihazı ve bir numunenin yükleme sırasındaki fotoğrafı..... 78

Resim 4.9. Lateks hazırlanması ve ara yüzey uygulama aşamaları..... 83

Resim 4.10. Epoksi ile ara yüzey uygulaması 84

Resim 4.11. Aderans harcı ile ara yüzey uygulaması 85

Resim 4.12. Bitümlü yapıştırıcı ile ara yüzey uygulaması 86

Resim 4.13. İki tabaka ara yüzeyinde pürüzlendirme işlemi 87

Resim 4.14. Numunelerin kesme makinesi ile 45^{o} lik 2 eşit parçaya bölünmesi 88

Resim 4.15. Titreşimli tokmak başlıkları..... 88

Resim 4.16. Lateks [L] ara yüzeyli numunelerin eğimli kesme deneyi sonrası fotoğrafları..... 90

Resim 4.17. Epoksi reçine [E] ara yüzeyli numunelerin eğimli kesme deneyi sonrası fotoğrafları..... 91

Resim 4.18. Aderans harcı [A] ara yüzeyli numunelerin eğimli kesme deneyi sonrası fotoğrafları..... 92

Resim 4.19. Bitümlü yapıştırıcı [B] ara yüzeyli numunelerin eğimli kesme deneyi sonrası fotoğrafları 93

Resim **Sayfa**

Resim 4.20. Pürüzlü yüzey [P] ara yüzeyli numunelerin eğimli kesme deneyi sonrası fotoğrafları 94

Resim 4.21. Ara yüzey elemansız [Y] numunelerin eğimli kesme deneyi sonrası fotoğrafları 95

Resim 4.22. 45^{o} eğimli ara yüzeyli silindirik numunelerin kırılma şekilleri 97

Resim 4.23. Kiriş numunelerinin hazırlanması 99

Resim 4.24. Ara yüzey elemanı ve kiriş üst yüzeylerinin düzenlenmesi 100

Resim 4.25. Kiriş eğilme deneyleri: a) Referans numune, b) Ara yüzey elemansız, c) Aderans harçlı ara yüzey 101

Resim 4.26. Su işleme derinliği tayini deneyi cihazı 104

Resim 4.27. Su işleme derinliği tayini deneyi sonrası (a) ara yüzey elemansız (b) aderans harçlı ara yüzey 105

Resim 5.1. Uygulama yeri – Çubuk, Yazır Mahallesi yolu (40^{o}10’31.36”K, 33^{o}0’29.87”D) 107

Resim 5.2. SSB uygulamasında kullanılan makina ve ekipmanlar 112

Resim 5.3. Birinci tabaka SSB serimi ve yapım derzi oluşturulması 116

Resim 5.4. Aderans harcı uygulaması ve ikinci tabaka SSB serimi 116

Resim 5.5. Kür uygulanması 117

Resim 5.6. Derz kesilmesi işlemi 118

Resim 5.7. Sıkışma kontrol ölçümleri (a) Kum konisi testi (b) Elektromanyetik test 119

Resim 5.8. Yol düzgünsüzlüğünün 5 m’lik mastarla ölçümü 120

Resim 5.9. 45^{o} açılı karot alma çalışmaları (a) numune alımı (b) ara yüzey uygulamasız iki tabaka numune 121

Resim 5.11. Basınç dayanımı deneyi için hazırlanan karot numuneleri 122

Resim 5.12. Kiriş karot ekipmanları ve kiriş numune alma işlemleri 123

Resim 5.13. Kiriş numuneleri alındıktan sonra SSB yan yüzeyleri 124

Resim 5.14. Kiriş numunelerinin deney için hazırlanması 124

Resim 5.15. Tek tabaka SSB numuneleri kiriş eğilme deneyleri (a) T-K1 numunesi (b) T-K2 numunesi 126

Resim **Sayfa**

Resim 5.16. Aderans harçlı iki tabaka SSB numuneleri kiriş eğilme deneyleri (a) A-K1 numunesi (b) A-K2 numunesi 126

Resim 5.17. Ara yüzey elemansız iki tabaka SSB numuneleri kiriş eğilme deneyleri (a) Ç-K1 numunesi (b) Ç-K2 numunesi 127

Resim 5.18. Kiriş eğilme dayanımı sonrası numuneler 127

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
a	İzafi mukavemet katsayısı
a_1	Kaplama tabakası izafi mukavemet katsayısı
a_2	Temel tabakası izafi mukavemet katsayısı
A	Aderans harcı
B	Bitümlü yapıştırıcı
CBR	California taşıma oranı, %
CoV	Varyasyon katsayısı
D	Tabaka kalınlığı, cm
D_1	Kaplama tabaka kalınlığı, cm
D_2	Temel tabaka kalınlığı, cm
D_3	Alttemel tabaka kalınlığı, cm
DR	Plak bozulma oranı, %
D_r	Rölatif sıkılık, %
E	Epoksi reçine
E_c	Beton elastisite modülü, MPa
$fc_{,cyl,7}$	7 günlük basınç dayanımı, MPa
$f_{c,cyl,28}$	28 günlük basınç dayanımı, MPa
$f_{c,cyl,90}$	90 günlük basınç dayanımı,MPa
f_{ck}	Karakteristik beton basınç dayanımı, MPa
G_f	Kırılma enerjisi, N/m
L	Lateks
M	Taşıma mesafesi, km
m_2	Temel tabakası drenaj katsayısı
MR	Zemin esneklik modülü, psi
P	Pürüzlü yüzey
R	Güvenilirlik, %
r	Trafik artış katsayısı, %

Simgeler	Açıklamalar
S	Donatı aralığı, cm
S_o	Toplam standart sapma
SN	Üstyapı sayısı
SN_1	Temel tabakası üzerinde gerekli SN
SN_2	Alttemel tabakası üzerinde gerekli SN
SN_3	Üstyapı tabanı üzerinde gerekli SN
s/ç	Su/çimento oranı
$T_{8.2}$	Toplam standart dingil yükü (8,2 ton) tekerrür sayısı
T_i	İlk trafik
t_p	Ortalama günlük proje trafiği
T_s	Son trafik
Y	Ara yüzey elemansız
w	Su içeriği, %
W_g	Günlük standart dingil yükü tekerrür sayısı
ZR	Standart normal sapma
η	Şerit dağıtma faktörü
ΔPSI	Servis kabiliyetindeki azalma miktarı
Ø	Donatı çapı, mm

Kısaltmalar	Açıklamalar
AASHTO	American Association of State Highway and Transportation Officials
ACPA	American Concrete Pavement Association
ASTM	American Society for Testing and Materials
BEM	Boundary effect method
BSK	Bitümlü sıcak karışım
ÇŞB	Çevre ve Şehircilik Bakanlığı
ECC	Tasarlanmış çimentolu kompozit
GDA	Geri dönüştürülmüş agrega
HME	Çift genleşmeli ajan

Kısaltmalar	Açıklamalar
HPCP	Yüksek performanslı beton kaplama
IRI	Uluslararası düzgünsüzlük indeksi, m/km
JPCP	Derzli donatısız beton yol
KGM	Karayolları Genel Müdürlüğü
LTTP	Uzun dönem üstyapı performansı
MSC	Mikro-silis beton
OYTT	Orta Yüklü Ticari Taşıt
ÖGYFC	Öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu
PCA	Portland Cement Association
PCI	Üstyapı durum indeksi
PÇ	Portland çimentosu
PMT	Plentmiks temel
SEM	Boyut etkisi metodu
SSB	Silindirle Sıkıştırılmış Beton
TÇMB	Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
TEF	Taşıt Eşdeğerlik Faktörü
TMA	Taş mastik asfalt
UHPC	Ultra yüksek performanslı beton
WFM	Work-of-fracture method
XLPE	Çapraz bağlı polietilen
YOGT	Yıllık Ortalama Günlük Trafik

1. GİRİŞ

Günümüzde uzun ömürlü, konforlu, güvenli, çevre dostu ve aynı zamanda ekonomik yol üstyapılarına her zamankinden daha fazla ihtiyaç vardır. Yol üstyapıları, yol kullanıcılarının kalitesinden doğrudan etkilendiği yolun en önemli yapı elemanıdır ve maliyetleri genel olarak yol yapım maliyetlerinin yarısını oluşturmaktır. Bu önemli yapı elemanının planlama, tasarım, malzeme ve karışım özellikleri, yapım, bakım ve onarım teknolojileri ile sürdürülebilirliği üzerinde sürekli araştırmalar yapılmaktadır.

Rijit yol üstyapı yapım tekniklerinden biri olan, silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) yolların, hazır beton santralinde üretilmesi, kamyonlarla taşınması, geleneksel asfalt uygulama ekip ve makineleri ile hızlı yapılarak trafiğe açılması, alternatiflerine göre daha uzun ömürlü ve ekonomik olması nedeniyle son yıllarda kullanımı gerek yurtdışında (Resim 1.1), gerekse ülkemizde (Resim 1.2) yaygınlaşmaktadır.

SSB kaplama, ince ve iri agreganın sürekli gradasyon verecek şekilde uygun oranlarda su, çimento ve gerekirse katkı malzemeleri ile hazır beton santralinde karıştırılmasıyla üretilen betonun, asfalt finişerleriyle serilerek, çelik tamburlu ve lastik tekerlekli silindirle ile sıkıştırılarak elde edilen taşıyıcı bir kaplama türüdür (ÇŞB, 2020a).

SSB kaplamalar geleneksel beton kaplamalara göre nispeten yeni bir beton kaplama türü olup, yola serilmesi ve sıkıştırılması esnasında esnek üstyapı yapımına benzer teknikler kullanılarak inşa edilmektedir. Geleneksel beton kaplamalara göre çok daha düşük su/çimento (s/ç) içeriğiyle üretilen SSB kaplamalar, bitümlü kaplama yapımında kullanılan araçlarla taşınmakta, serilmekte ve sıkıştırılmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle SSB kaplamalar hızlı ve ekonomik bir şekilde inşa edilebilmekte, böylece de alternatif bir üstyapı olarak kendini göstermektedir (Yaman ve Ceylan, 2013).

Harrington, Abdo, Adaska, Hazaree ve Ceylan'a (2010) göre, SSB kaplamaların kullanım yerleri aşağıda verilmektedir.

- Endüstriyel tesis yolları ve park alanları
- İntermodal taşımacılık depo alanları, limanları ve yükleme iskeleleri

- Tır yükleme sahaları, malzeme depo alanları ve dağıtım merkezleri
- Düşük trafik hacimli şehir içi ve dışı yollar
- Askeri yükleme sahaları, hava meydanları
- Araç bakım, tamir alanları
- Uçak park alanları
- Büyük ticari otoparklar
- Kereste ve tomruk depolama alanları
- Otoyol banketleri
- Servis yolları



Resim 1.1. SSB banket uygulaması, Atlanta, GA (Harrington ve diğerleri, 2010)



Resim 1.2. SSB yol uygulaması, Alanya, 2021

SSB yolların en büyük üstünlüğü, gerek beton kaplamalara gerekse çok tabakalı asfalt kaplamalara kıyasla çok daha hızlı ve ekonomik olarak inşa edilebilmesidir. Bununla birlikte kalıp ve donatı kullanılmaması, düşük geçirgenliği ile donma çözülme döngüsüne dayanıklı

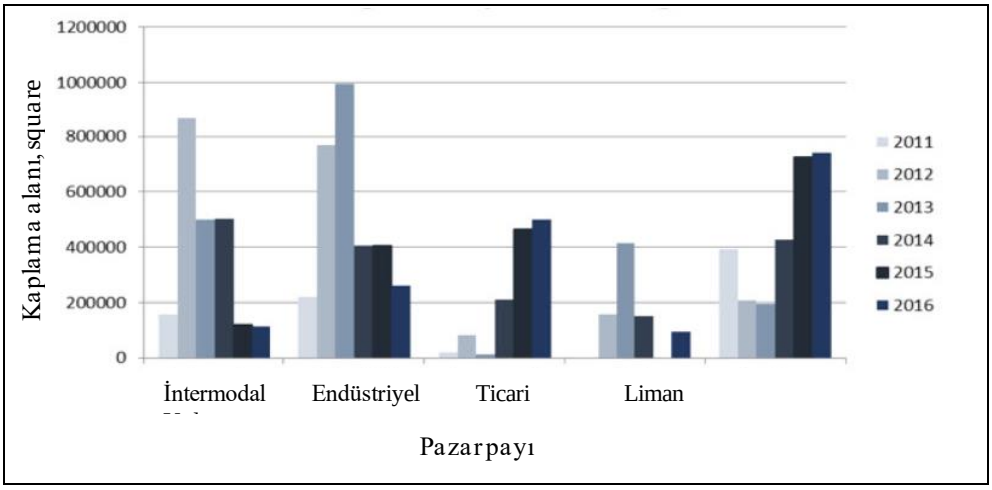
olması, kısa sürede trafiğe açılabilmesi, tekerlek izi vb. kalıcı deformasyonlara karşı dayanıklı ve uzun ömürlü olması da diğer üstünlükleri arasında sayılabilir.

SSB üretimi geleneksel betona göre aynı bileşenlerin farklı oranlarda karşılaştırılması ile elde edilmekte, dolayısıyla işlenebilirlik özellikleri farklı olmakta, ancak bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplama yapımında kullanılan araçlarla taşınabilmekte, serilebilmekte ve sıkıştırılabilmektedir. Buna karşın hidratasyon reaksiyonları değişmediği için geleneksel beton yollara benzer kür gereksinimlerine ihtiyaç duymaktadır (Yaman ve Ceylan, 2013).

SSB karışımların geleneksel beton karışımlardan en önemli farkı, su oranının düşük, ince malzeme oranının yüksek olmasıdır. SSB titreşimli silindir altında stabil kalacak kadar katı kıvamda, ayrışma olmadan homojen bir karışım elde edebilecek ve finişerle serilebilecek kadar su içeriğine sahip olmalıdır.

Harrington ve diğerlerine (2010) göre, ilk SSB uygulamaları 1930'larda İsveç'te başlamış, 1940'ların başında Kuzey Amerika, Washington eyaletinde havaalanı yapımında ve 1970'lerde Kanada'da tomruk stok alanlarında uygulanmıştır. 1980'lerin başında, US Army Corps of Engineers tarafından SSB yol uygulama ve araştırmaları yapılmıştır. Sonrasında Amerika Birleşik Devletleri'nde (ABD) karayolları, limanlar, depolama alanlarında yaygın olarak kullanılmış, 2000'li yıllarda düşük ve orta yoğunlukta taşıt trafiğine maruz yolların inşaatında tercih edilmeye başlanmıştır.

Zollinger (2019) tarafından yapılan araştırma kapsamında, 2011-2016 yılları arasında SSB'nin kullanım yerleri incelenmiş olup, 2012-2013 yıllarına kadar İntermodal taşımacılık ve endüstriyel alanlarda yaygın olarak tercih edilen SSB uygulamalarının sonrasında, yol kaplaması olarak kullanımının daha yaygın hale geldiği görülmektedir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. ABD'de SSB proje büyüklüğü-kullanım alanı ilişkisi (Zollinger, 2019)

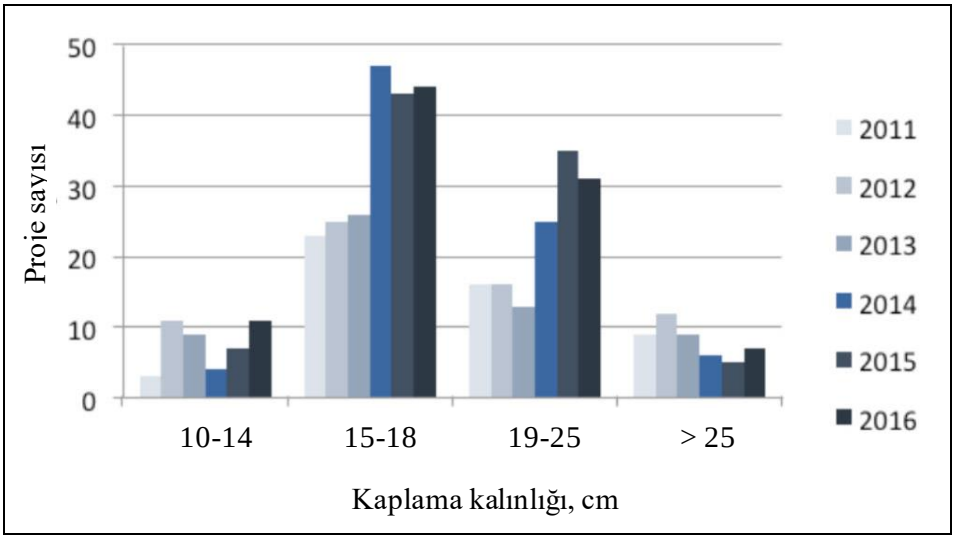
SSB yol uygulamalarının yaygınlaşmasıyla birlikte, kalınlık tasarım metotları, malzeme ve karışım özellikleri, uygulama, bakım ve onarım yöntemleri üzerinde araştırmalar yoğunlaşmıştır. SSB yollara ait regülasyonların yapılması ve teknik altyapının oluşturulması ile uygulamanın yaygınlaşması zamanla yeni gereksinimler ortaya çıkmıştır. Bunlardan biri SSB yolların geleneksel asfalt finişerleri ile 15-16 cm den fazla yapılması durumunda sıkışma ve konfor problemleri oluşmasıdır. Bu nedenle SSB yolların iki tabaka halinde yapılması durumunda kaplamanın performansı konusunda araştırmalar yapılmaya başlanılmıştır. Bununla birlikte iki tabaka beton kaplama uygulamaları eski bir tekniktir. Örneğin; Rao, Darter, Tompkins, Vancura, Khazanovich, Signore, Coleri, Wu, Harvey ve Vandenbossche (2013) tarafından yapılan araştırmalara göre, iki tabaka beton kaplamalar ilk olarak 1891 yılında Bellefontaine, Ohio Amerika'da yapılmıştır. 1915 yılında Wisconsin'de iki cadde inşaat edilmiş olup, alt tabaka dolamitik kireçtaşından oluşan beton plak, üstte ise caddelerden birinde kuvars, diğerinde granit agrega kullanılarak tasarlanan beton plak kullanılmıştır (Cable ve Frentress, 2004). Tompkins, Khazanovich, Darter ve Fleischer' e (2009) göre; 1950'den 1970'lerin ortalarına kadar, ABD'de iki tabakalı beton yol uygulaması, tabakalar arasına hasır çelik kullanılarak yaygınlaşmıştır. 1990'larda yüksek performanslı beton üstyapılar (HPCP) projesiyle, iki tabaka beton yolların performansı Michigan ve Kansas'ta uygulanarak araştırılmış ve iki tabaka beton üstyapılar performans, maliyet, yapım koşulları, yenilikçi malzeme ve tasarım metotları açısından değerlendirilmiştir.

Avrupa'da ise 1930'lardan itibaren iki tabaka beton yol üstyapıları kullanılmaya başlanmıştır. Sonrasında iki tabaka beton yol inşaatı yüksek taşıma gücü, ekonomikliği, çevre ve güvenlik ile ilgili avantajları nedeniyle Amerika'ya kıyasla çok daha yaygınlaşmıştır (Tompkins ve diğerleri, 2009). Örneğin, Münih havalimanı iki tabaka beton plak kullanılarak inşaat edilmiş, alt tabaka yaklaşık 24 cm kalınlığında olup, karışımda agrega olarak doğal kum çakıl kullanılmıştır. Üst tabaka beton plak 14 cm kalınlıkta ve kırılmış granit agrega kullanılarak inşa edilmiştir (Cable ve Frentress, 2004).

Harrington ve Fick (2014), iki tabaka üstyapı tabakaları arasında bağın sağlandığı ve sağlanmadığı durumları asfalt kaplama üzeri beton plak, kompozit üstyapılar üzeri beton ve beton kaplama üzerine beton takviye tabakası olarak altı farklı kesitte incelemiştir.

Şekil 1.2'de görüleceği üzere ABD de 2011-2016 yılları arasında yapılan SSB uygulamalarının %80'ninde plak kalınlığı 15-25 cm arasındadır. 35-45 cm kalınlıklarda SSB plak genellikle ağır sabit ve/veya hareketli yüklere maruz liman ve intermodal taşımacılık alanlarında uygulanmaktadır. Diğer yandan 25 cm den daha kalın SSB plak imalatlarında iki tabakalı SSB yapılması ve arasında gerekli bağın sağlanması önerilmektedir (Zollinger, 2019). ABD uygulamalarında SSB serimi için kullanılan finişerlerin yüksek yoğunluklu sıkıştırma yapan tablalara sahiptir. Ülkemizde yaygın olarak kullanılan geleneksel asfalt finişerleri 15-16 cm den daha kalın SSB kaplama yapılmasını güçleştirmekte olup, tabakalar arası bağın sağlanarak birden fazla tabaka halinde yapılması gerekmektedir.

Çoklu tabakalı SSB kaplamalardan alınan karotlar incelendiğinde; tabakalar arası yeterli bağ sağlanarak inşa edilen çoklu tabakalı SSB kaplamaların, yanal desteği olmayan kenar kısımlar hariç, bir bütün olarak çalıştığı kabul edilmiş ve kalınlık tasarımı bu anlayışa göre yapılmıştır (ACI-325.10R, 2001).



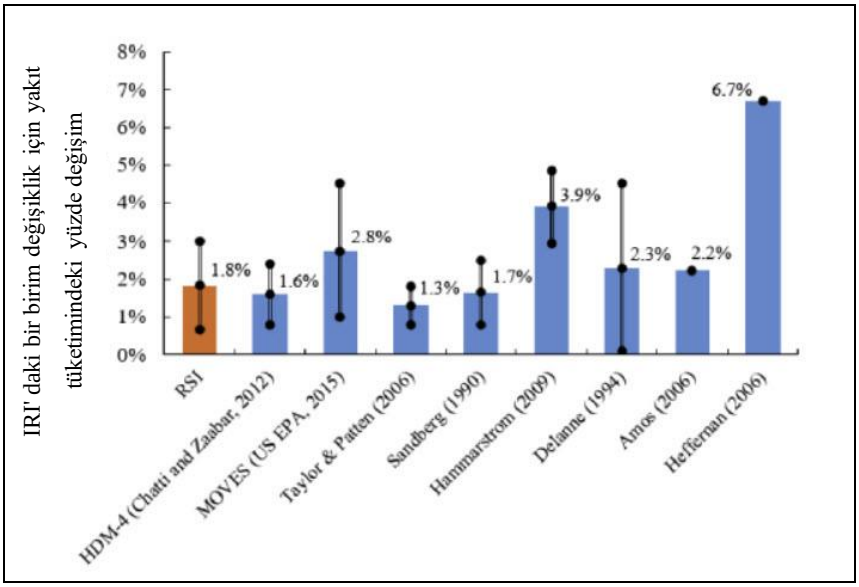
Şekil 1.2. ABD'de SSB kaplama proje sayısı - plak kalınlığı ilişkisi (Zollinger, 2019)

Bununla birlikte, tabakalar arasında yeterli bağın sağlanması için uygun yapım prosedürlerinin izlenmesi gerektiği vurgulanmıştır. İlk tabaka yapıldıktan en geç 1 saat içerisinde, rutubet ve tozdan arındırılmış yüzey üzerine ikinci tabaka yapılması halinde tabakalar arası bağın sağlanacağı düşünülmektedir. Alttaki tabakanın yeterince sıkışmadan üst tabakanın yapılması halinde ise üst tabakada istenmeyen çatlaklar oluşabilmektedir (ACI-325.10R, 2001).

SSB su/çimento (s/ç) oranı geleneksel betona göre düşük, sıfır çökme değeri veren karışımlar olup, geleneksel asfalt finişerleriyle serimlerinde 15 cm den fazla kalınlıklarda silindir altında istenmeyen ondülasyonlar ve konfor problemleri oluştuğu bilinmektedir. Yeterli sıkışmanın elde edilemediği SSB plaklarda, boşluklu yapısı nedeniyle trafik yükleri ve atmosferik şartlar nedeniyle bünyesine su nüfusu kaçınılmaz olacaktır. Bu durumda, donma çözülme döngüsü sonrası beton yolun ömrü azalacak, proje süresi boyunca bakım ve onarım masrafları artacaktır.

Diğer yandan yol yüzeyinde oluşan profil düzgünsüzlüklerinin taşıt işletme giderlerini artırdığı bilinmektedir. Ziyadi, Ozer, Kang ve Al-Qadi (2017) tarafından hazırlanan modele göre, uluslararası düzgünsüzlük indeksinin (IRI) bir birim değişimi (63,36 inç/mil); binek otomobiller için yüksek hızlarda (65 mil/sa) ve düşük hızlarda (35 mil/sa), sırasıyla ortalama %3 ve %2 yakıt tüketiminde artışa neden olur. Daha ağır kamyonlar IRI değişikliğine karşı daha az hassastır ve IRI'daki bir birim değişim, ağır kamyonun yüksek ve düşük hızlardaki

yakıt tüketiminde sırasıyla %2 ve %1 artışa neden olur. Bununla birlikte, IRI'daki bir birim (63,36 inç/mil) değişimin yakıt tüketimine olan etkisi Şekil 1.3'de verilmiştir.



Şekil 1.3. IRI değişiminin yakıt tüketimine etkisi (Ziyadi ve diğerleri, 2017)

Ko, Jeong, Yoo, Lee, Kim, ve Tsunokawa' ya (2019) göre; yakıt tüketimi (litre/100km) doğrusal olarak IRI (m/km) ile orantılıdır, çünkü araç işletme maliyeti VOC (maliyet/km) IRI ile doğrusal olarak orantılıdır ve yakıt tüketimi taşıt işletme giderlerinin önemli bir bölümünü oluşturmaktadır. IRI değeri 3,56 m/km olan yol kesiminde 100 km'deki yakıt tüketimi 6,19 l/100km iken, IRI değeri 3,59 m/km olan kesimde yakıt tüketimi 6,40 l/100km olarak belirlenmiştir.

Mohammed, Thom, ve Dawson'a (2019) göre; SSB kaplamaların en büyük dezavantajı yüzey özellikleri ve konforudur. Bu nedenle uzun yıllar SSB kaplamalar düşük hızlarda ve düşük trafik hacimli yollarda tercih edilmiştir. Bu sorunları gidermek amacıyla, SSB kaplamaların yüzeyine asfalt tabakası uygulanmış, ancak derzlerin yansıması ve dayanıklılık açısından sorunlar yaşanmıştır.

Yol üstyapılarından beklenen en önemli özellikler; yüksek kayma direnci ile güvenli, düşük gürültü seviyesiyle sessiz, konforlu, uzun ömürlü ve aynı zamanda ekonomik olmasıdır. Bu beklentilerden yüksek kayma direnci, düşük gürültü seviyesi ve konfor özellikleri, taşıt tekerinin temas ettiği en üst tabakanın yüzey özellikleriyle ilgilidir. Dolayısıyla yol üstyapılarının en üst tabakası en özellikli malzemeler ve yapım teknikleri kullanılarak

yapılmakta olduğundan en pahalı tabaka olmaktadır. Dolayısıyla, alt tabaka SSB ile dayanım sağlanması, nispeten daha ince tasarlanan üst tabaka SSB yüzey özellikleriyle; gürültüyü azaltmak, tekerlekle temas eden yol yüzeyinde kayma direncini artırarak fren mesafelerini kısaltmak, daha iyi konfor elde etmek ve bu şekilde daha ekonomik SSB yol üstyapıları yapmak mümkün olmaktadır.

Birden çok tabaka halinde yapılması gereken SSB yol kaplamalarının uzun ömürlü, konforlu ve güvenli olarak trafik, çevre ve iklim koşulları altında hizmet verebilmeleri için tabakalar arası bağın sağlanması gerekmektedir. Bununla birlikte tabakalar arası bağ dayanımını sağlamak için kullanılan ürünler ve teknikler üzerine yapılan araştırmalar henüz yeterli düzeyde değildir.

Bu tez çalışması kapsamında, iki tabaka SSB yol kaplamaları arasındaki bağ dayanımının değerlendirilmesi amacıyla, laboratuvarda eğimli basınç dayanımı ve kiriş eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Laboratuvar deneylerinden elde edilen sonuçlar doğrultusunda farklı ara yüzey eleman/işlemleri değerlendirilmiştir. En iyi performansı gösteren ara yüzey elemanı iki tabakalı SSB yol kaplaması yapılarak denenmiş ve uygulama performansı gözlenmiştir. Ayrıca uygulama aşamasında dikkat edilmesi gereken konular belirlenerek çalışma kapsamında sunulmuştur. Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) yol ağında bulunan il yollarında, aynı şartlarda SSB ve BSK üstyapılar projelendirilerek, maliyetleri belirlenmiş, SSB yolların Türkiye için önemi ortaya konulmuştur.

2. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

2.1. Giriş

Literatür çalışması ilk bölümünde SSB bileşenleri, karışımın işlenebilirliği, karışım tasarım metotları, SSB çekme dayanımını artırmak için lif kullanımı, SSB karışımların sıkıştırılmasında kullanılan laboratuvar teknikleri ile SSB karışımlarda ikame edici malzeme olarak çimento ve agrega kullanımıyla ilgili yapılan bazı çalışmaların bulgularına yer verilmektedir.

İkinci bölümde genel olarak iki tabakalı beton kaplamaların performansı, farklı ara yüzey malzemeleri, tasarım ve uygulama prosedürleri tartışılmıştır. Son bölümde ise, iki tabaka SSB kaplamalarla ilgili yapılan bazı çalışmalar verilmektedir.

2.2. Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yollar

Kaliteli bir SSB üretilmesi için her şeyden önce, beton bileşenlerinin kalite ve miktar olarak belirlendiği karışım tasarımının yapılması gerekmektedir. Literatür çalışmasının bu aşamasında; SSB karışım tasarım metotları, SSB karışımında donatı olarak lif kullanımı, çeşitli laboratuvar teknikleri, SSB karışımında çimento ve agrega ikame edici malzeme kullanımı hakkında gelişmeler aktarılmaktadır.

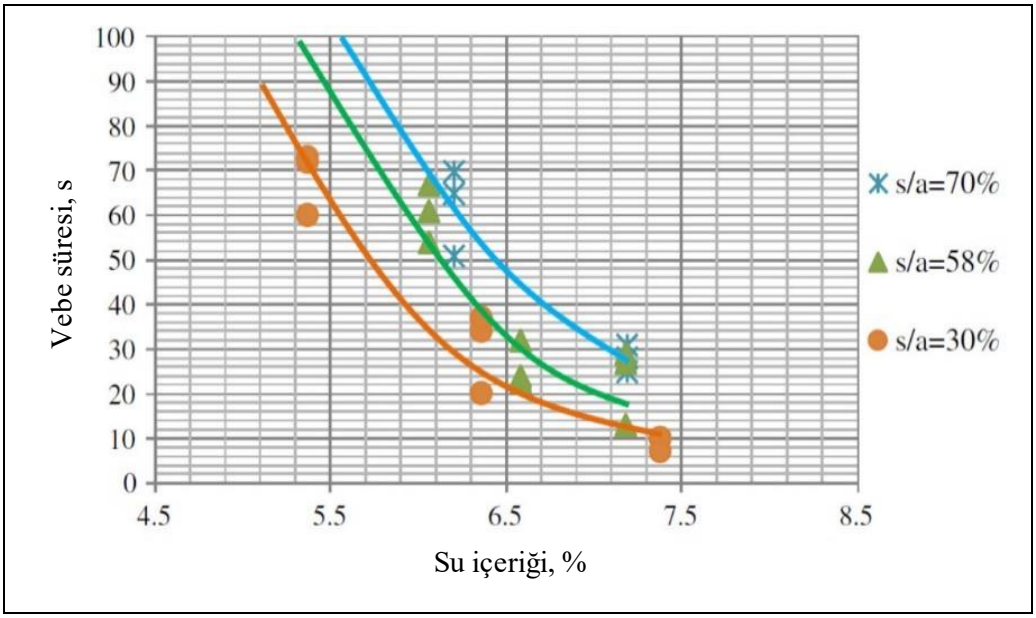
2.2.1. Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) karışım tasarımı

Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB), karışım özellikleri açısından geleneksel betondan bazı farklılıklar gösteren özel bir beton tipidir. SSB karışımları geleneksel beton karışımlarına göre daha fazla ince agrega içeren, daha düşük s/ç oranlarına ve buna bağlı olarak daha kuru kıvama sahip olan bir betondur. SSB uygulama tekniklerinin geleneksel beton kaplamalardan farklı olması nedeniyle tasarım parametreleri uygulama öncesinde gerekli çalışmalar yapılarak titizlikle belirlenmelidir (Yaman ve Ceylan, 2013).

SSB karışım tasarımı özelinde literatür tarandığında çalışmaların özellikle optimum su içeriği, çimento dozajı, s/ç oranı ve iri/ince agrega oranı gibi parametrelerin belirlenmesi üzerinde yoğunlaştığı görülmektedir. Özellikle tasarım parametrelerinin (su içeriği, çimento

dozajı vb.), Vebe süresi esas alınarak belirlenmiş olan işlenebilirlik ve dayanım özelliklerine etkisi detaylı olarak incelenmiştir.

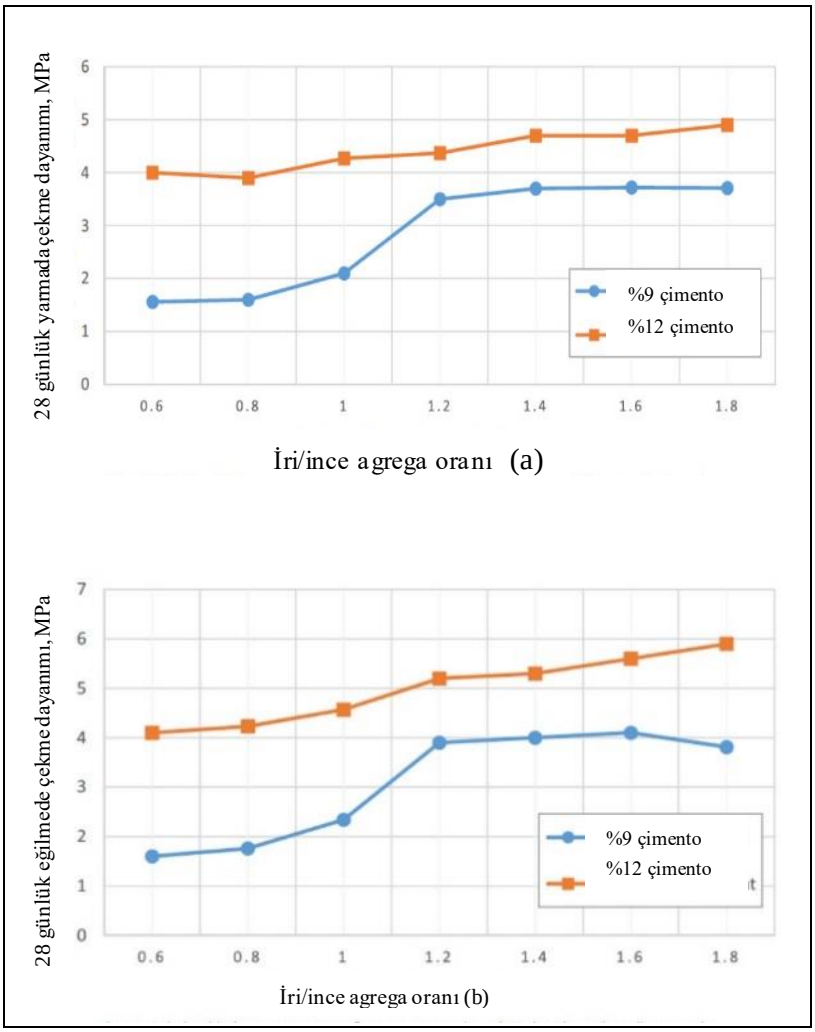
Chhorn, Kim, Hong, ve Lee'nin (2017) yaptıkları çalışmada farklı su içeriklerinde ve farklı agrega gradasyonlarında hazırlanan SSB karışımlarının sıkıştırılabilirlik ve işlenebilirlik özellikleri incelenmiştir. Çalışma kapsamında sabit çimento dozajında (280 kg/m^3) ve farklı su içeriklerinde (%3,97 ila %7,38 arasında değişen) ve farklı agrega gradasyonlarında 21 farklı karışım kullanılmıştır. Belirlenen karışım tasarımlarından hazırlanan SSB numunelerinin işlenebilirliğini tayin etmek amacıyla Vebe süreleri ölçülmüştür. SSB karışımlarının su içeriklerin artmasıyla beklendiği üzere Vebe sürelerinin azaldığı tespit edilmiştir (Şekil 2.1). Buna ek olarak, SSB numunelerinin kuru birim hacim ağırlığının karışımdaki değişikliklerden daha az etkilendiği ancak kısıtlı limitler nedeniyle optimum su içeriğinin karışımdaki değişikliklere karşı daha hassas olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 2.1. Vebe süresi – su içeriği ve kum/agrega (s/a=%30,58 ve 70) ilişkisi (Chhorn ve diğerleri, 2017)

Hashemi, Shafigh, Karim ve Atis (2018) tarafından yapılan çalışmada, iri ve ince agrega miktarlarının birbirine oranının (C/F), farklı çimento dozajlarındaki SSB numunelerinin taze ve sertleşmiş beton özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında iki farklı çimento dozajında (204 kg/m^3 ve 268 kg/m^3) ve değişen iri agrega/ince agrega oranında (0,6 ila 1,8 arasında) SSB numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin Vebe süreleri ölçülmüş,

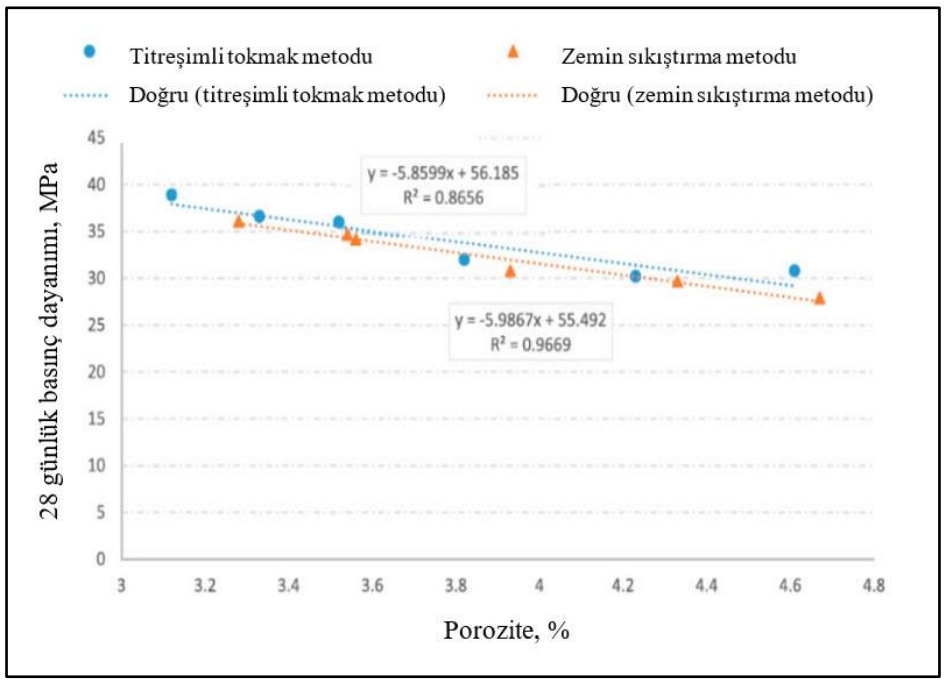
basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ile porozite testleri yapılmıştır. Yapılan testler sonucunda, kütlece iri agrega/ince agrega oranının artırılmasının Vebe süresini artırdığı ve aynı zamanda belirli bir noktaya kadar (kütlece iri agrega/ince agrega=1,2'ye kadar) artışın SSB numunelerinin porozitesini önemli oranda düşürdüğü gözlemlenmiştir. Beklendiği üzere çimento dozajındaki artışın basınç, eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımlarını artırdığı ve bu artış oranının düşük iri agrega/ince agrega oranlarında daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, genel olarak kütlece iri agrega/ince agrega oranının 1,2 ila 1,4 arasında olduğu SSB karışımların ideal dayanım sonuçları verdiği belirtilmiştir (Şekil 2.2).



Şekil 2.2. İri/ince agrega oranı - 28 günlük (a) yarmada çekme dayanımı ve (b) eğilmede çekme dayanımı ilişkisi (Hashemi ve diğerleri, 2018)

Shafigh, Hashemi, Nam ve Koting (2019) tarafından yapılan çalışmada, farklı su içeriklerindeki SSB numunelerinin mühendislik özelliklerini incelemiştir. Çalışma

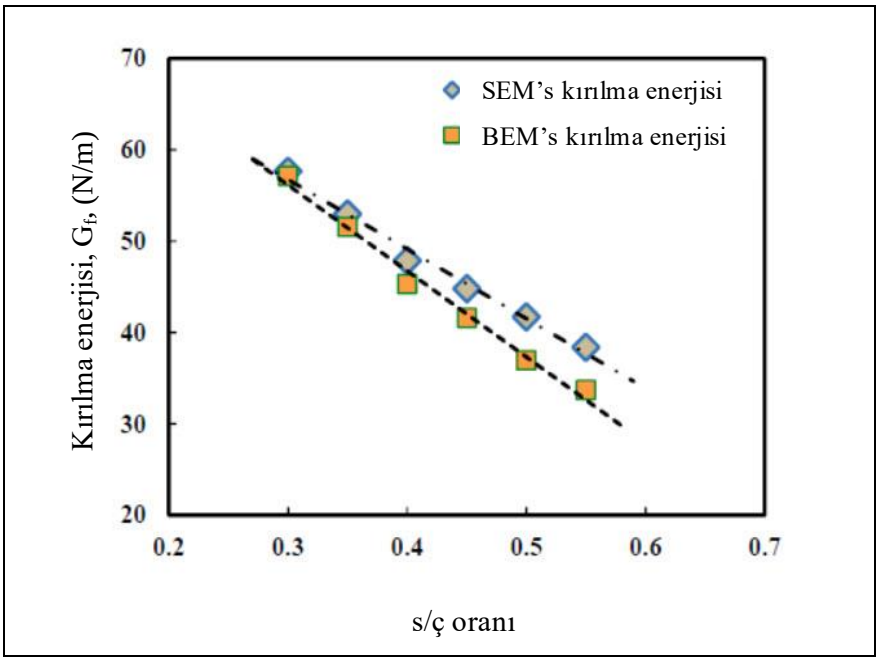
kapsamında sabit çimento dozajında (269 kg/m^3) farklı su içeriklerinde (%4,5 ila %7 arasında değişen) 6 farklı SSB tasarımı belirlenmiştir. Belirlenen tasarımlarda üretilen SSB numunelerinin Vebe süresi, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, su emme ve porozite özelliklerini belirlemek amacıyla ilgili standartlar uyarınca testler yapılmıştır. Çalışma sonucunda, su içeriğindeki artışın Vebe süresini önemli ölçüde düşürdüğü ve beton özellikleri açısında ideal Vebe süresinin 32-39 saniye arasında olduğu belirtilmiştir. En iyi mekanik özelliklere ve en düşük poroziteye optimum su içeriğinden daha düşük su içeriklerinde ulaşıldığı belirlenmiştir. Ayrıca, SSB numuneleri için optimum su içeriğinin maksimum kuru yoğunluktan ziyade en düşük poroziteye denk gelen su içeriği olarak kabul edilebileceği ifade edilmiştir. Son olarak, porozitedeki küçük artışların bile SSB numunelerinin basınç dayanımını önemli oranda düşürdüğü belirlenmiştir (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. 28 günlük basınç dayanımı ve porozite ilişkisi (Shafigh ve diğerleri, 2019)

Rahmani, Sharbatdar, ve Beygi (2020a) tarafından farklı s/ç oranlarının, SSB kaplamaların kırılma parametreleri üzerine etkileri araştırılmıştır. Çalışma kapsamında 0,3 ila 0,55 arasında değişen farklı s/ç oranlarında, altı farklı SSB karışım tasarımı belirlenmiştir. Karışımlarda maksimum tane boyutu 12,5 mm olarak seçilmiş ve çimento dozajı 280 kg/m^3 olarak sabit tutulmuştur. Ayrıca, düşük s/ç oranlarında yeterli performansı sağlayabilmek amacıyla karboksilat bazlı süper akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Belirlenen tasarımlarda üretilen numunelerin üç farklı yöntemde (WFM 'work-of-fracture', SEM 'size

effect method' ve BEM 'boundary effect method') kırılma enerjileri hesaplanmıştır. Üç farklı yöntem kullanılarak yapılan testlerin sonucunda, kırılma enerjisinin s/ç oranıyla ters orantılı olduğu tespit edilmiştir (Şekil 2.4). Buna ek olarak, s/ç oranındaki düşüşün süneklikte azalmaya neden olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, SSB numunelerinin, kırılma enerjisiyle basınç dayanımı arasında doğru orantılı bir ilişki olduğu tespit edilmiştir.



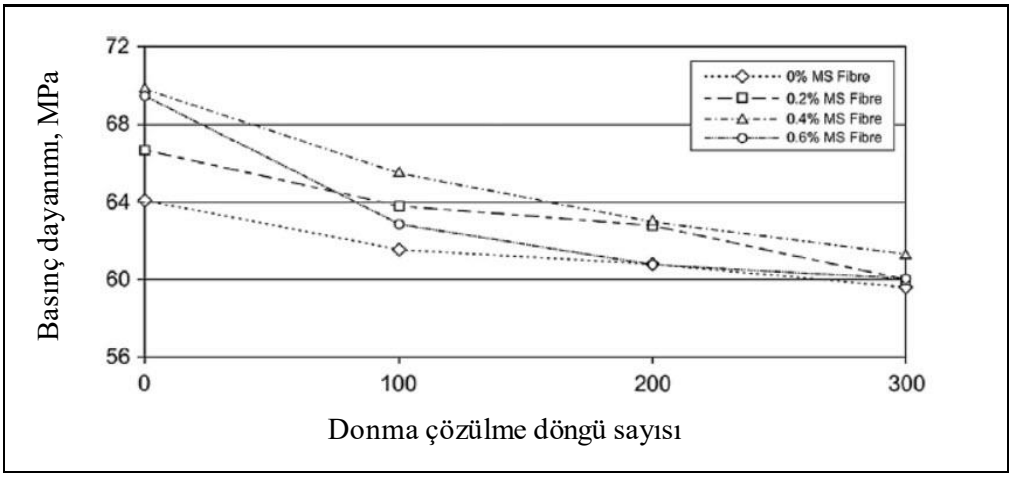
Şekil 2.4. SEM ve BEM başlangıç kırılma enerjisi s/ç oranı ilişkisi (Rahmani ve diğerleri, 2020a)

Aynı yazarlar tarafından yapılan bir başka çalışmada (Rahmani ve diğerleri, 2020b) farklı s/ç oranları ve çimento dozajlarının SSB numunelerinin fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında farklı çimento dozajlarında (240-340 kg/ m^3) ve farklı s/ç oranlarında (0,3 ila 0,55 arasında değişen) 12 farklı karışım tasarımı belirlenmiştir. Belirlenen karışım tasarımlarında hazırlanan SSB numunelerine basınç dayanımı, statik ve dinamik elastisite modülü, kopma modülü, yarmada çekme dayanımı, eğilmede çekme dayanımı ve ultrasonik ses dalgası yayılması hızı testleri yapılmıştır. Test sonuçları SSB numunelerinde s/ç oranındaki azalma ve çimento dozajındaki artışın, numunelerin Vebe süresini, basınç dayanımını, kuru birim hacim ağırlığını, ultrasonik ses dalgası yayılma hızını ve dinamik elastisite modülünü önemli oranda artırdığı tespit edilmiştir. Öte yandan, s/ç oranındaki artışın SSB numunelerin çekme dayanımını ve kopma modülünü azalttığı gözlemlenmiştir.

2.2.2. Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) karışımlarda lif kullanımı

SSB'nin dünyada en yaygın kullanıldığı iki alan yol üstyapıları ve barajlardır (ACI-325.10R, 2001). Yol üstyapılarında kullanılan SSB kaplamalar, servis ömrü boyunca eğilme ve çekme gerilmelerine maruz kalmakta ve özellikle çatlama tipinde bozulmalar yaşanabilmektedir. Bu bağlamda literatürde SSB karışımların çekme gerilmeleri artırmak amacıyla, lif kullanımı üzerine çalışmalar yapıldığı görülmektedir.

Algin ve Gerginci (2020) yaptıkları çalışmada makro sentetik lif kullanımının SSB numunelerinin su geçirimliliğine ve donma-çözülme direncine etkisini araştırmıştır. Çalışma kapsamında farklı çimento dozajlarında (291 kg/m^3 ila 295 kg/m^3 arasında değişen) ve farklı makro sentetik polipropilen lif kullanım oranlarında (hacimce %0 ila %0,6 arasında değişen) dört farklı SSB karışımı tasarlanmıştır. SSB numunelerinin Vebe sürelerinin 20 ila 44 saniye arasında değiştiği belirlenmiştir. Hazırlanan numunelere belirli aralıklarda basınç dayanımı, eğilme dayanımı, pandül, kütle kaybı, ultrasonik ses dalgası hızı ve dinamik elastisite modülü testleri yapılmıştır. Yapılan testlerin neticesinde makro sentetik lif kullanımının SSB numunelerinde kütle kaybını ve dinamik elastisite modülü değerlerini düşürdüğü ve yüzey bozulmalarını azalttığı belirlenmiştir. Ayrıca, makro sentetik lif kullanımının donma-çözülme döngüleri boyunca yaşanan eğilme dayanımı ve basınç dayanımı kayıplarını da düşürdüğü gözlemlenmiştir (Şekil 2.5). Ayrıca, makro sentetik lif kullanımı arttıkça su işleme derinliği ve su emme değerlerini artırdığı gözlemlenmiştir.



Şekil 2.5. Donma çözülme döngüsü sonrası, MS lif katkılı SSB numunelerinin basınç dayanım değerleri (Algin ve Gerginci, 2020)

LaHucik, Dahal, Roesler ve Amirkhanian (2017) yaptıkları çalışmada, makro lif (sentetik ve çelik) kullanımının silindirle sıkıştırılmış betonun mekanik özelliklerine etkisini incelemiştir. Çalışma kapsamında değişen oranlarda (hacmin %0,2'si ila %0,4'ü arasında) makro lifin (4 farklı sentetik lif ve 2 farklı çelik lif olmak üzere) kullanıldığı, sabit çimento dozajında (281,8 kg/m^3) 11 farklı SSB karışımı tasarlanmıştır. Belirlenen karışım tasarımlarında hazırlanan SSB numunelerine basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı ve elastisite modülü testleri yapılmıştır. Yapılan testler neticesinde sentetik lif kullanımının SSB numunelerinin basınç dayanımını ve maksimum kuru birim hacim ağırlığını artırdığı belirlenmiştir. Öte yandan, çelik lif kullanılan SSB numunelerinin en yüksek yarmada çekme dayanımı değerlerine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, lif kullanımının SSB numunelerinin eğilme dayanımlarına önemli bir etkisinin olmadığı gözlemlenmiştir. Son olarak, SSB karışımlarında lif kullanımının çatlama enerjisini artırmasından dolayı çatlama özelliklerinde (kritik çatlak genişliği, kritik çatlak gerilmesi yoğunluk katsayısı vb.) iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir.

Literatürde SSB karışımlarında lif kullanımıyla ilgili yapılan çalışmalarda genellikle lif kullanımının SSB'nin iklim ve çevresel (su vb.) etkiler altında çatlamaya karşı direnci ve dayanım özelliklerine odaklanıldığı görülmektedir.

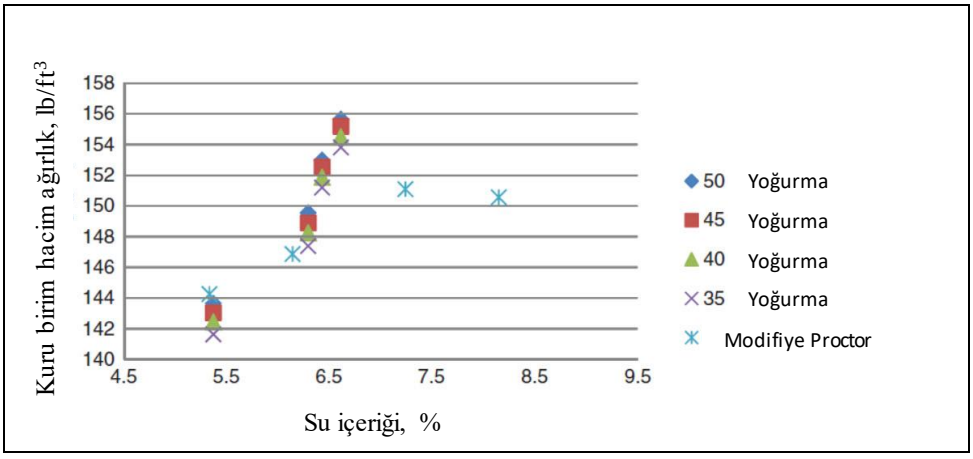
2.2.3. SSB sıkıştırılmasında kullanılan laboratuvar teknikleri

Silindirle sıkıştırılmış betonun (SSB) gerekli dayanım değerlerine ulaşması ve istenen performansı gösterebilmesi açısından sıkıştırma özel bir öneme sahiptir. Bu kapsamda, literatürde SSB'nin sıkıştırılmasında kullanılan laboratuvar teknikleriyle ilgili olarak çalışmalar yapıldığı görülmektedir.

Chhorn, Hong ve Lee (2018) yaptıkları çalışmada, silindirle sıkıştırılmış beton ve geleneksel betonun indirekt çekme dayanımları arasındaki ilişkiyi ve SSB'nin basınç dayanımı ile çekme dayanımı arasındaki ilişkiyi irdelemiştir. Çalışma kapsamında farklı çimento (224 kg/m^3 – 280 kg/m^3) ve uçucu kül dozajında (0 kg/m^3 – 56 kg/m^3) 28 farklı SSB karışımı belirlenmiştir. Belirlenen tasarımlarda hazırlanan numunelere farklı yaşlarda (3-56 gün arasında değişen yaşlarda) basınç dayanımı, eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımı testleri yapılmıştır. Yapılan testlerin neticesinde SSB numunelerinde hem basınç dayanımı hem de eğilme dayanımı kazanımı açısından sıkışma düzeyinin çok ciddi bir öneme sahip

olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, SSB numunelerinin eğilme dayanımlarının geleneksel betonun eğilme dayanımıyla benzer olduğu ancak SSB numunelerinin yarmada çekme dayanımlarının geleneksel betonun yarmada çekme dayanımından daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Buna ek olarak, SSB numunelerinin basınç dayanımlarından yola çıkarak eğilmede çekme ve yarmada çekme dayanımlarını tahmin etmeye yönelik bazı ampirik eşitlikler elde edilmiştir.

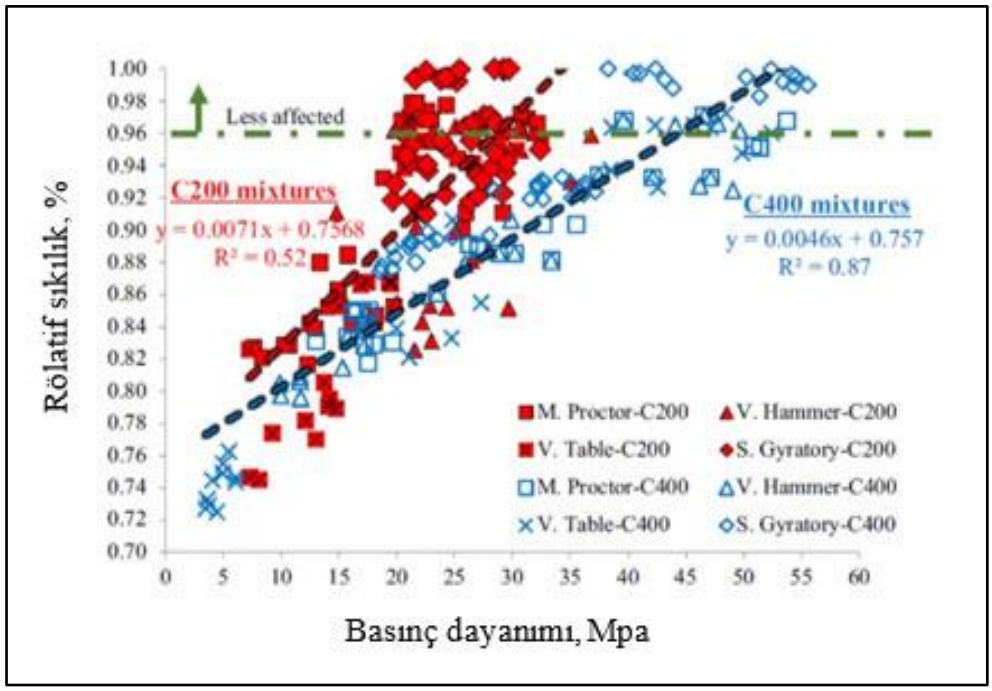
Williams (2013) yaptığı çalışmada SSB karışım parametrelerinin belirlenmesinde (optimum su içeriği, maksimum kuru birim hacim ağırlık) sıkıştırma yöntemi olarak yoğurmalı sıkıştırma (Superpave) yöntemi ve modifiye Proctor yönteminin farkları incelenmiştir. Çalışma kapsamında farklı agrega gradasyonlarında ve farklı su içeriklerinde (%5 ila %9 arasında değişen) 17 farklı SSB karışımı belirlenmiştir. Belirlenen karışım tasarımlarında üretilen SSB iki farklı sıkıştırma yöntemiyle sıkıştırılmış ve maksimum kuru birim hacim ağırlık-su içeriği grafikleri elde edilmiştir. Yapılan çalışmalar neticesinde modifiye Proctor yöntemi parabolik bir eğri verirken yoğurmalı sıkıştırma yönteminde su içeriği arttıkça kuru birim hacim ağırlığın arttığı gözlenmiştir. Ayrıca, düşük su içeriğinde her iki yöntemden elde edilen değerler benzerken yüksek su içeriklerinde ciddi farklar oluşmuştur. Ayrıca, yoğurmalı sıkıştırma yönteminde, modifiye Proctor yöntemine göre daha yüksek kuru birim hacim ağırlık daha düşük su içeriği değerlerinde elde edildiği belirlenmiştir (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Proctor ve yoğurmalı sıkıştırma (çeşitli yoğurma sayıları için) metotları, su içeriği – yoğunluk ilişkisi (Williams, 2013)

Şengün, Alam, Shabani ve Yaman'ın (2019) yaptıkları çalışmada laboratuvar koşullarında farklı sıkıştırma tekniklerinin SSB özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında

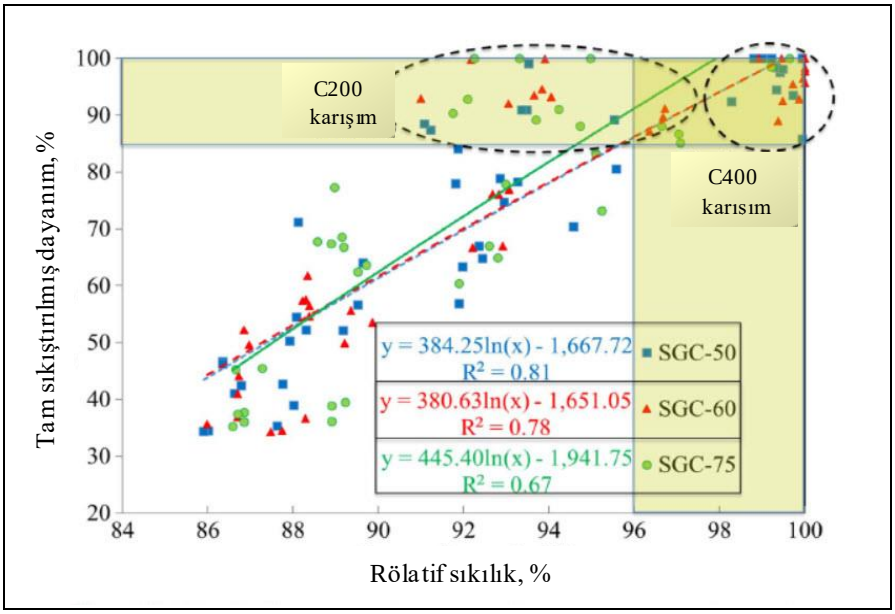
iki farklı çimento dozajında (200 kg/m^3 ve 400 kg/m^3), iki farklı maksimum tane boyutunda (12 mm ve 19 mm) ve 5 farklı su içeriğinde (%3 ila %7 arasında değişen) toplam 20 farklı SSB karışım tasarımı belirlenmiştir. Belirlenen tasarımlarda hazırlanan SSB karışımları 4 farklı sıkıştırma yöntemi (modifiye Proctor, yoğurmalı sıkıştırma 'Superpave', titreşimli tokmak ve titreşimli tabla) kullanılarak hazırlanmıştır. Hazırlanan SSB numunelerinin Vebe süreleri, yoğunlukları ve boşluk oranları belirlenmiştir. Ayrıca, SSB numunelerine basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı testleri yapılmıştır. Yapılan testler neticesinde en yüksek sıkışmayı yoğurmalı sıkıştırma yönteminin, en düşük sıkışmayı ise titreşimli tabla yönteminin verdiği tespit edilmiştir. Bunun yanı sıra yüksek çimento dozajındaki (400 kg/m^3) SSB numunelerinde sıkışma oranının basınç dayanımı üzerinde etkisinin daha fazla olduğu belirlenmiştir (Şekil 2.7). Öte yandan, düşük Vebe sürelerinde sıkıştırma oranı farklılıklarının daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, genel olarak SSB numunelerinin mekanik özelliklerinin öncelikli olarak sıkışma oranından ve sonrasında çimento dozajından etkilendiği belirlenmiştir.



Şekil 2.7. Basınç dayanımı – rölatif sıkılık ilişkisi (kırmızı 200 kg/m³ ve mavi 400 kg/m³ çimento dozajları için) (Şengün ve diğerleri, 2019)

Shabani, Sengun, Ozturk, Alam ve Yaman'ın (2021) yaptıkları çalışmada, bitümlü sıcak karışım tasarımlarında yaygın olarak kullanılan yoğurmalı sıkıştırma (Superpave) yöntemini kullanarak SSB tasarımı üzerine çalışmıştır. Çalışma kapsamında iki farklı çimento dozajı

(200-400 kg/m^3), iki farklı agrega gradasyonu (maksimum tane boyutu 12 ve 19 mm olacak şekilde) ve 4 farklı su içeriğinde (%3 ila %6 arasında değişen) toplam 16 farklı karışım tasarımı belirlenmiştir. Belirlenen karışım tasarımlarında üretilen SSB karışımları üç farklı yoğurma seviyesinde (50, 60, 75) sıkıştırılmış, hazırlanan karışımların kıvamları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Aynı karışımda fakat farklı yoğurma seviyelerinde, sıkıştırmanın mekanik özelliklere etkisinin çok kısıtlı olduğu gözlemlenmiştir. SSB karışımlarının optimum su içeriğini belirlerken yoğurmalı sıkıştırma yönteminde %96 sıkışma oranının hedeflenebileceği tespit edilmiştir. Öte yandan, beklendiği üzere çimento dozajı ve maksimum tane boyutundaki artışın basınç dayanımını doğrudan artırdığı belirlenmiştir. Tam sıkıştırılmış basınç dayanımı yüzdesi; aynı çimento ve maksimum agrega boyutunda elde edilen SSB karışımların ortalama basınç dayanımının, maksimum basınç dayanımına bölümüyle elde edilmiştir. (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Nominal basınç dayanımı – rölatif sıkılık ilişkisi (Shabani ve diğerleri, 2021)

2.2.4. SSB karışımlarda çimento ikame edici malzeme kullanımı

Genel olarak beton karışımlarında olduğu gibi, silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) karışımlarında da çimento ikame edici malzeme kullanımı, hem ekonomik açıdan hem de betonun çevresel etkileri açısından önemli avantajlar sağlamaktadır.

Pourkhorshidi ve Ramezanianpour (2020) yaptıkları çalışmada, iki farklı doğal puzolanın kullanıldığı SSB karışımlarının buz çözücü tuz etkisi altında mekanik, fiziksel ve durabilite özelliklerini incelemişlerdir. Çalışma kapsamında farklı çimento dozajları (243,75 kg/m^3 ila 375 kg/m^3) ve değişen oranlarda (çimento miktarının %15-25-30'u kadar) çimento ikame edici malzemelerin (Pars ponzası ve Khash) kullanıldığı toplam 36 farklı karışım tasarımı hazırlanmıştır. Hazırlanan SSB numunelerine basınç dayanımı, su emme, su işleme derinliği ve buz çözücü tuz etkisi testleri yapılmıştır. Yapılan testler neticesinde çimento ikame edici malzeme olarak puzolan kullanımının SSB numunelerinin basınç dayanımlarını düşürdüğü ve su geçirimliliğini artırdığı tespit edilmiştir. SSB numunelerinin su emme değerlerindeyse kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir. Belirli bir orana kadar (Çimento miktarının %15'ine kadar) puzolan kullanımının SSB numunelerinin buz çözücü tuz etkisi dirençlerini iyileştirdiği ancak kullanım oranı arttıkça tuz direncinin önemli oranda düştüğü belirlenmiştir.

Ramezanianpour, Mohammadi, Dehkordi ve Chenar (2017) yaptıkları çalışmada, SSB yol kaplamalarında tuzlamanın yarattığı bozulmaya karşın, karışımda hava sürükleyici katkı ve çimento ikamesi olarak tras kullanımının etkilerini araştırmışlardır. Çalışma kapsamında sabit çimento dozajı (330 kg/m^3) ve su içeriğindeki (0,28 s/ç oranı) karışıma hava sürükleyici katkı (bağlayıcı miktarının %0,6'sı kadar) ve çimento ikame edici malzeme olarak tras (çimento miktarının %20'si kadar) kullanılma/kullanılmama durumuna göre dört farklı karışım tasarımı oluşturulmuştur. Hazırlanan SSB numunelerine basınç dayanımı, çekme dayanımı, su geçirimliliği, kılcal su emme ve buz çözücü tuz direnci testleri yapılmıştır. Yapılan testler neticesinde hava sürükleyici katkı ve tras kullanımının SSB numunelerinin basınç ve çekme dayanımlarını düşürdüğü tespit edilmiştir. Diğer yandan, hava sürükleyici katkı kullanımının SSB numunelerinin su emme ve su geçirimliliklerini artırdığı belirlenmiştir. Ayrıca, traslı SSB numunelerinin özellikle hava sürükleyici kullanılmadığında buz çözücü tuz direnci açısından iyi performans gösteremediği belirlenmiştir.

Omran, Harbec, Tagnit-Hamou ve Gagne (2017) yaptıkları çalışmada, alternatif çimento ikame edici malzeme olarak geri dönüştürülmüş cam tozu kullanmanın SSB özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında sabit bağlayıcı dozajında (285 kg/m^3), iki farklı cam tozu dozajında (0 kg/m^3 ve 65 kg/m^3) ve sabit su/bağlayıcı oranında (0,43) karışım tasarımları oluşturulmuştur. Belirlenen karışım tasarımlarında üretilen SSB numunelerine

basınç dayanımı, eğilme dayanımı, donma-çözülme direnci testleri yapılmıştır. Ayrıca uygulama alanından SSB karotlar alınmış ve basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, elastisite modülü, su emme ve geçirimli boşluk hacmi testleri yapılmıştır. Alınan karotlara SEM analizleri yapılarak SSB'nin mikro yapısı incelenmiştir. Yapılan testler neticesinde SSB karışımlarında cam tozu kullanımının daha yoğun C-S-H matrisi oluşturduğu ve özellikle ileri yaşlarda (bu çalışma kapsamında 91 gün) basınç ve eğilme dayanımında iyileşme sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, cam tozu kullanımının SSB numunelerinin geçirimli boşluk hacmini azalttığı ve donma-çözülme direncini yükselttiği belirlenmiştir.

Mardani-Aghabaglou, Andiç-Çakir ve Ramyar (2013) yaptıkları çalışmada, SSB karışımlarında uçucu kül kullanımının durabilite özelliklerine etkisini araştırmıştır. Çalışma kapsamında 3 farklı grupta karışım tasarımları hazırlanmıştır. İlk grupta bağlayıcı olarak sadece çimentonun kullanıldığı (250 kg/m^3), ikinci grupta bağlayıcı olarak çimento ile C sınıfı uçucu külün (çimento miktarının %20-40-60'ı kadar) kullanıldığı ve son grupta agreganın bir kısmının uçucu kül ile ikame edildiği karışımlar tasarlanmıştır. Hazırlanan SSB numunelerine su emme, boşluk tayini, kılcal geçirimlilik, ultrasonik ses dalgası yayılma hızı, dinamik elastisite modülü ve donma-çözülme direnci testleri yapılmıştır. Yapılan testler neticesinde donma-çözülme kaynaklı kütle kaybının uçucu külün çimento ikamesi olarak kullanıldığı numunelerde arttığı, agrega ikamesi olarak kullanıldığı numunelerdeyse azaldığı belirtilmiştir. Dinamik elastisite modülü değerlerinde kayda değer bir değişim gözlemlenmemiştir. Ayrıca, su işleme derinliğinin; sıkıştırma tabakalarına paralel olduğunda, dik olduğu duruma göre her zaman daha fazla olduğu gözlemlenmiştir. Son olarak, SSB numunelerinin geçirimli boşluk içeriği ile kılcal su emmesi ve su işleme derinliği arasında güçlü ilişkiler tespit edilmiştir.

Aghaeipour ve Madhkhan (2017) yaptıkları çalışmada, çimento ikame edici malzeme olarak farklı oranlarda öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC) kullanımının silindirle sıkıştırılmış betonun (SSB) durabilite özelliklerine etkisini araştırmıştır. Çalışma kapsamında iki farklı bağlayıcı dozajında (toplam agrega miktarının %12'si ve %15'i kadar) ve beş farklı su içeriğinde (%4 ila %7 arasında değişen oranlarda) 8 farklı karışım tasarımı belirlenmiştir. Karışım tasarımlarında bağlayıcı olarak çimento ve değişen oranlarda (toplam bağlayıcı miktarının kütlece %0, 20, 40 ve 60'ı kadar) ÖGYFC kullanılmıştır. Hazırlanan numunelere su emme ve geçirimlilik testleri yapılmış, sonrasında donma-çözülme etkisine maruz bırakılan numunelere basınç dayanımı ve kopma modülü deneyleri yapılmıştır. Test

sonuçlarına göre ÖGYFC kullanımının SSB karışımlarında optimum su içeriğini artırdığı ve su emme değerlerini azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, yüksek oranlarda ÖGYFC kullanımının SSB numunelerinin donma-çözülme etkisi altındaki yüzey bozulmalarını artırdığı belirlenmiştir.

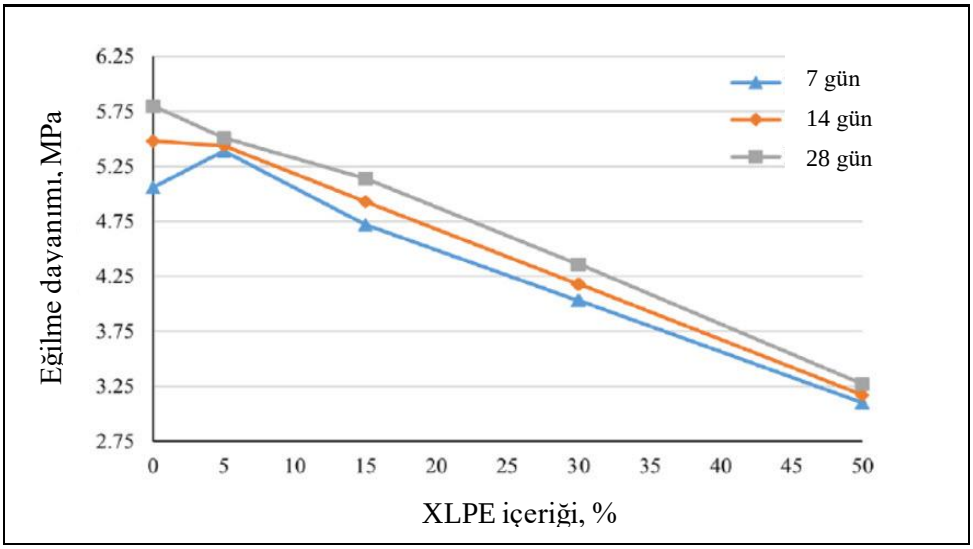
Lam, Le ve Jaritngam (2018) yaptıkları çalışmada, elektrik ark cürufu ve uçucu kül kullanımının silindirle sıkıştırılmış betonun basınç dayanımı ve durabilite özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Çalışma kapsamında bağlayıcı olarak çimento ve değişen oranlarda uçucu külün (F sınıfı, bağlayıcı dozajının %0, %20 ve %40'ı kadar) kullanıldığı ve iri agreganın farklı oranlarda (%0, %50 ve %100 oranlarında) elektrik ark cürufu ile ikame edildiği 9 farklı karışım tasarımı belirlenmiştir. Hazırlanan farklı yaşlardaki (3, 7, 28 ve 91 gün) SSB numunelerine basınç dayanımı, su emme, yüzey aşınması ve sülfat direnci testleri yapılmıştır. Yapılan testler elektrik ark cürufu kullanımının SSB numunelerinin basınç dayanımlarını düşürdüğünü, su emme ve yüzey aşınması değerlerini ise artırdığını göstermiştir. Ancak belirli oranlarda (bağlayıcı dozajının %20'sine kadar) uçucu kül kullanımıyla SSB numunelerinin bu özelliklerinde uzun dönemde iyileşme sağlandığı belirlenmiştir.

S. K. Rao, Srava ve T. C. Rao (2016) yaptıkları çalışmada, çimento ikame edici malzeme olarak öğütülmüş granüle yüksek fırın cürufu (ÖGYFC) kullanılan SSB karışımlarının mekanik özelliklerini ve aşınma direncini incelemiştir. Çalışma kapsamında bağlayıcı olarak çimentonun kullanıldığı ve çimento ikame edici malzeme olarak farklı oranlarda (çimentonun kütlece %10 ila %60'ı arasında değişen oranlarda) ÖGYFC kullanılan 7 farklı karışım tasarımı belirlenmiştir. Belirlenen karışım tasarımlarında hazırlanan farklı yaşlardaki (3, 7, 28 ve 90 günlük) SSB numunelerine basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, yüzey aşınması direnci ve aşınma kaybı testleri yapılmıştır. Yapılan testler neticesinde ÖGYFC kullanımının SSB numunelerinin erken dönem basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve yarmada çekme dayanımı değerlerini düşürdüğü ve aşınma kaybı ile kütle kaybı değerlerini artırdığı tespit edilmiştir. Ancak uzun dönemde bütün bu özelliklerde iyileşmeler görülmüş ve kontrol grubuna kıyasla daha iyi performans gözlemlenmiştir.

2.2.5. SSB karışımlarda agrega ikame edici malzeme kullanımı

Çimento ikame edici malzeme kullanımına benzer şekilde, literatürde agrega ikame edici malzeme kullanımıyla ilgili çalışmalar bulunmaktadır. SSB karışımlarının diğer beton tiplerinde olduğu gibi önemli bir kısmının agregalardan oluştuğu düşünüldüğünde, agrega ikame edici malzeme kullanımının önemi ortaya çıkmaktadır.

Shamsaei, Aghayan ve Kazemi (2017) yaptıkları çalışmada; elektrik kablolarının üretiminde izolasyon malzemesi olarak kullanılan çapraz bağlı polietilen (XLPE) malzemesinin geri dönüştürülüp SSB karışımında iri agreganın bir kısmını (hacimce %5, %15, %30 ve %50 oranında) ikame edecek şekilde kullanımını araştırmıştır. Çalışma kapsamında sabit çimento dozajı (298 kg/m^3) ve su içeriğinde (163 kg/m^3) ve farklı XLPE kullanım miktarlarında 5 farklı karışım tasarımı belirlenmiştir. Hazırlanan SSB numunelerinin Vebe süreleri ölçülmüş ve basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ile dört nokta eğilme dayanımı testleri yapılmıştır. Yapılan testlerin neticesinde SSB karışımlarında XLPE kullanımının Vebe sürelerini ve birim hacim ağırlığı düşürdüğü gözlemlenmiştir. İri agreganın hacimce %5'inin XLPE ile ikame edilmesi basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve eğilme dayanımlarının bir miktar yükseldiği ancak XLPE kullanım oranı arttıkça önemli düzeyde düşüşler yaşandığı gözlemlenmiştir (Şekil 2.9). Öte yandan, yüksek oranlarda XLPE ikamesinin SSB numunelerinin sünekliğini ve enerji emme kapasitelerini artırdığı belirlenmiştir.



Şekil 2.9. Çapraz bağlı polietilen (XLPE) içeriği - eğilme dayanımı ilişkisi (Shamsaei ve diğerleri, 2017)

Lopez-Uceda, Agrela, Cabrera, Ayuso ve Lopez (2016) yaptıkları çalışmada, iri agrega olarak servis ömrünü tamamlamış beton yapılardan elde edilen geri dönüştürülmüş agrega (GDA) kullanımının, SSB özelliklerine etkisini araştırmıştır. Çalışma kapsamında dört farklı çimento dozajında (110 kg/m^3 ila 350 kg/m^3 arasında değişen) ve üç farklı GDA kullanım oranında (%0, %50 ve %100) SSB karışım tasarımları hazırlanmıştır. GDA, boyutları 4-20 mm arasında değişen, karışımda kullanılan doğal agregaya göre nispeten biraz daha iri ve daha yüksek su emme değerine sahip bir agrega grubudur. Hazırlanan SSB numunelerine basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, eğilme dayanımı, porozite ve kuruma rötresi testleri yapılmıştır. Yapılan testler neticesinde GDA kullanımının (özellikle %100 oranında) SSB numunelerinin dayanımlarını ve kuru birim hacim ağırlıklarını kayda değer ölçüde düşürdüğü tespit edilmiştir. Buna ek olarak, GDA kullanımın SSB numunelerinin kuruma rötresi değerlerini artırdığı ve bu nedenle GDA kullanılan SSB kaplamalarda derz aralıklarının, GDA kullanılmayan SSB kaplamalara göre daha az olması gerektiği belirtilmiştir.

2.3. İki Tabakalı Beton Kaplamalar

Beton kaplamalar malzeme özellikleri, yapım teknikleri ve temel mühendislik özellikleri bakımından kendi içlerinde bazı farklılıklar göstermektedir. Özellikle silindirle sıkıştırılmış betonun (SSB) yapım teknikleri ve avantajları incelendiğinde, diğer beton kaplamalardan ayrıştığı görülmektedir.

Konunun bütünlüğü açısından ilk olarak iki tabakalı geleneksel beton kaplama yollar ile ilgili literatüre değinilecektir. Sonrasında iki tabakalı SSB kaplama yollar üzerine olan literatür sunulacaktır.

2.3.1. İki tabakalı geleneksel beton kaplamalar

Yucel, Jashami, Sahmaran, Guler ve Yaman (2013) yaptıkları çalışmada, mevcut bir beton kaplama üzerine takviye tabakası olarak, farklı tabaka kalınlıklarındaki Tasarlanmış Çimentolu Kompozit (ECC) kaplamaların kullanımının uygunluğunu araştırmıştır. Mevcut beton kaplamayı temsil etmek üzere belirli bir çimento dozajı (400 kg/m^3) ve su içeriğinde (180 kg/m^3) üretilen beton karışımı ile hazırlanan numuneler belirli bir süre (5 ay) boyunca kür odasında bırakılmıştır. Takviye tabakasında kullanılmak üzere 2 farklı ECC kaplama

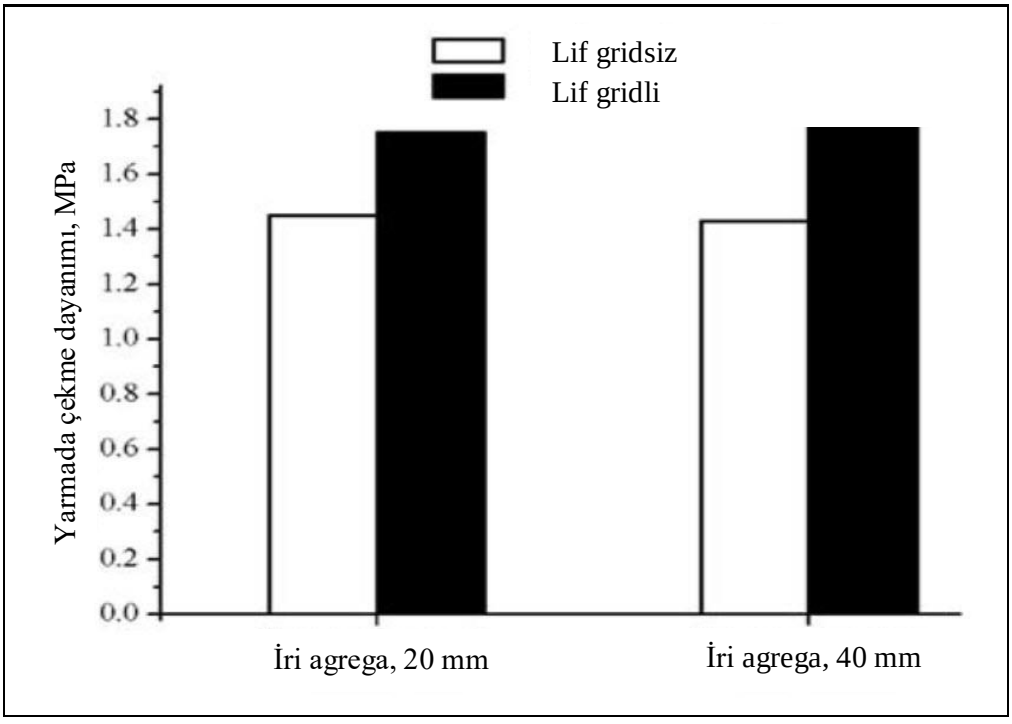
tasarımı (F sınıfı uçucu kül katılmış ECC ve granüle yüksek fırın cürufu katılmış ECC) ve kontrol grubu olarak mikro-silis beton (MSC) tasarımı belirlenmiştir. Belirlenen tasarımlarda hazırlanan iki tabakalı beton numunelere basınç dayanımı ve 4 nokta eğilme dayanımı testleri yapılmıştır. Test sonuçları mevcut beton kaplama üzerine ECC tabakalarıyla inşa edilen numunelerin eğilme dayanımında, kontrol grubuna kıyasla kayda değer bir artış gözlenmiştir. Buna ek olarak, eğilme dayanımındaki artışın üst tabaka kalınlığıyla doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir. Son olarak, üst tabakada ECC kullanılan numunelerin kontrol grubuna kıyasla daha yüksek deformasyon kapasitesine sahip olduğu belirlenmiştir.

Kim ve Lee (2013) yaptıkları çalışmada, mevcut iki tabakalı bağlı beton kaplamaların servis ömürlerini araştırmıştır. Çalışma kapsamında ABD'de 4 farklı eyalette (Iowa, Louisiana, Minnesota ve Missouri) 24 farklı iki tabakalı bağlı beton kaplama yol kesitine ilişkin Uzun Dönem Üstyapı Peformansı (LTTP) verileri kullanılmıştır. Çalışma kapsamında, her bir yol kesitlerine ilişkin Üstyapı Durum İndeksi (PCI) değerleri, LTPP veri tabanında yer alan bozulma verileri (çatlama, köşe kırılmaları vb.) MicroPaver programı kullanılarak hesaplanmıştır. Yıllık PCI kaybı hızı lineer regresyon yöntemiyle belirlenmiştir. Benzer şekilde belirlenen yıllık PCI kaybı hızı kullanılarak lineer regresyon yöntemiyle yol kesitlerinin servis ömürleri tahmin edilmiştir. Yapılan hesaplama sonuçlarına göre yol kesitlerinin tahmin edilen servis ömürlerinin 5 ila 50 yıl arasında değiştiği ve ortalama servis ömrünün 31 yıl olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, 9 yol kesitinde erken dönem bozulmaların ciddi seviyede olduğu ve bu bozulmaların genel olarak hatalı yapım/hatalı bağ uygulaması gibi sebeplerden kaynaklandığı gözlemlenmiştir.

Ahmadi, Shafabakhsh ve Hassani (2021) yaptıkları çalışmada, farklı tiplerdeki çift tabakalı beton kaplamaların mekanik özelliklerini incelemiştir. Çalışma kapsamında, 3 farklı beton tipi (geleneksel beton, silindirle sıkıştırılmış beton ve lif donatılı beton) kullanılmıştır. Toplam tabaka kalınlığının sabit tutulduğu iki tabakalı beton kaplamalar (farklı kalınlıklarda alt tabakada SSB ve üst tabakada lif donatılı veya donatısız geleneksel beton kullanılan) ile 3 farklı beton tipinden oluşan tek tabakalı beton kaplama numuneleri hazırlanmıştır. İki tabakalı beton kaplama numuneleri hazırlanırken tabakaların dökümü arasında en fazla bir saatlik süreye izin verilerek soğuk derz oluşumu engellenmiştir. Hazırlanan numunelere 3 noktalı kiriş eğilme testi yapılmıştır. Test sonuçlarına göre tek tabakalı beton kaplamalar ile iki tabakalı beton kaplamaların (alt tabaka SSB, üst tabaka lif donatılı veya donatısız

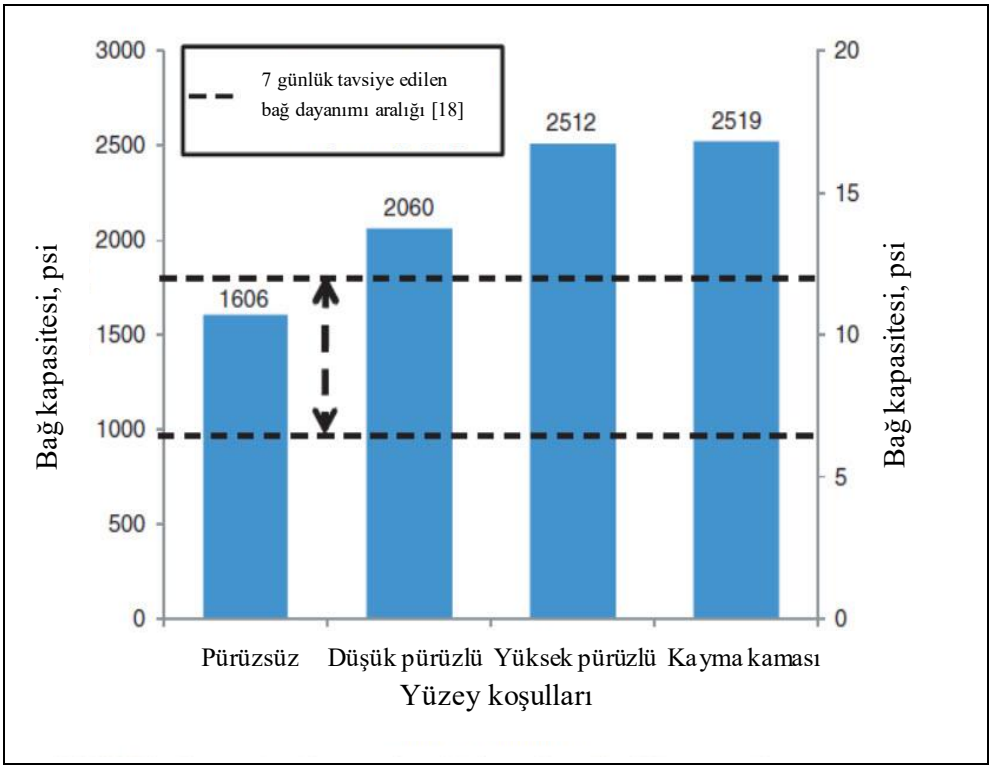
geleneksel beton olan) eğilme dayanımları arasında kayda değer bir fark gözlemlenmemiştir. Ayrıca, beton karışımlarında lif donatı kullanımının çatlama enerjisini artırarak çatlak davranışını değiştirdiği tespit edilmiş.

Yan, Weng ve Kou (2014) yaptıkları çalışmada, mevcut beton kaplama ile üzerine inşa edilen takviye beton tabakasında oluşan iki tabakalı beton kaplamanın dayanım özelliklerini incelemiştir. Çalışma kapsamında mevcut beton tabakasına yapılan iki farklı yüzey işleminde (yapay pürüzlendirme ve doğal halinde bırakma), üst tabaka beton karışımda iki farklı maksimum tane boyutunda (20 mm ve 40 mm) ve iki farklı grid kullanımında (cam ve bazalt lifli grid) numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere yarmada çekme dayanımı testi yapılmış, şekil değiştirme dağılımları incelenmiş ve kenetlenme katsayıları hesaplanmıştır. Test sonuçlarına göre takviye beton tabakası karışımlarında lif kullanımının ve mevcut beton kaplamanın üst yüzeyine uygulanan yapay pürüzlendirme işleminin yarmada çekme dayanımını artırdığı belirlenmiştir. Öte yandan maksimum tane boyutunun yarmada çekme dayanımına ciddi bir etkisi gözlemlenmemiştir (Şekil 2.10). Son olarak, iki tabakalı beton numunelerinde lif grid kullanımının tabakalar arası kenetlenme katsayısını artırarak mekanik özelliklerde iyileşme sağladığı belirlenmiştir.



Şekil 2.10. İri agrega boyutunun yarmada çekme dayanımına etkisi (Yan ve diğerleri, 2014)

Harris, Sarkar ve Ahlborn (2011) yaptıkları çalışmada, köprü tabliyelerinde yer alan farklı yüzey koşullarındaki beton kaplama ile üzerine inşa edilen ultra yüksek performanslı beton (UHPC) kaplama tabakası arasındaki bağ özelliklerini incelemiştir. Çalışma kapsamında farklı yüzey koşullarında (pürüzsüz, düşük pürüzlülükte ve yüksek pürüzlülükte) geleneksel beton veya çimento harcından hazırlanan alt tabaka ile UHPC ile hazırlanan takviye tabakasından oluşturulan iki tabakalı beton kaplama numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere eğimli kesme ve yarmada çekme dayanımı testleri yapılmıştır. Test sonuçları alt tabakanın yüzey dokusunun, tabakalar arası bağ dayanımını alt tabaka beton tipinden daha çok etkilediği tespit edilmiştir. Öte yandan, yarmada çekme dayanımı test sonuçlarına göre bağ kapasitesi ile yüzey pürüzlülüğü arasında doğrudan bir ilişki tespit edilememiştir (Şekil 2.11). Sonuç olarak UHPC tabakanın bağ dayanımı açısından farklı yüzey koşullarındaki mevcut beton kaplamaların üzerine takviye tabakası olarak kullanımının uygun olduğu gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Farklı yüzey dokularında 10 günlük ortalama bağ dayanımı (Harris ve diğerleri, 2011)

Greene, Nazef ve Choubane (2011) yaptıkları çalışmada, 1978 yılında ABD'de Florida eyaletinde iki tabakalı beton kaplama tekniğiyle inşa edilen bir yolun, 30 yıllık servis süresi sonunda yapılan performans değerlendirmesini sunmaktadır. İlgili yol kesimi farklı karışım

tasarımlarında, farklı alttemel ve temel (grobeton plak, granüler temel ve çimento stabilizasyonlu temel) üzerine inşa edilen iki tabakalı ve tek tabakalı beton kaplamadan oluşmaktadır. İlgili yol kesiminin 30 yıllık servis süresi sonunda yüzey düzgünsüzlüğü, derz faylanması ve yük transferi gibi bazı özelliklerine ilişkin testler yapılarak performansı değerlendirilmiştir. Performans değerlendirmesi, tek tabakalı beton kaplama tekniğiyle inşa edilen kesimde enine çatlak oluşumunun ve çatlak şiddetinin daha fazla olduğunu göstermiştir. Granüler temel üzerine inşa edilen çift tabakalı beton kaplamaların çok az bakım-onarım faaliyetiyle servis kabiliyetini uzun yıllar boyunca koruduğu ancak çimento stabilizasyonlu temel üzerine inşa edilen beton kaplamalarda boyuna çatlak ve faylanma oluşumunun arttığı belirlenmiştir.

2.3.2. İki tabakalı silindirle sıkıştırılmış beton kaplamalar

Silindirle sıkıştırılmış beton yolların genellikle geleneksel (asfalt yollarda kullanılan) serme ve sıkıştırma ekipmanları kullanılarak inşa edilmesi ve bu ekipmanların ancak belirli tabaka kalınlıklarının tek seferde serilip sıkıştırılmasına olanak tanıması, uygulamalarda dikkat çeken bir husustur. Özellikle ağır sanayi alanları, liman ve depolar, yükleme alanları ile ağır trafik koşulları altındaki yollarda kullanılacak SSB kaplamaların kalınlıkları, yaygın olarak kullanılan mevcut ekipmanların tek seferde serip sıkıştırabildiği kalınlıklardan daha fazla olmaktadır. Ayrıca, SSB karışımlarının kuru kıvamda olması ideal işlenebilirlik sürelerinin kısa olmasına sebep olmaktadır. Kısa işlenebilirlik süresiyse soğuk derz oluşumuna neden olmadan tabakalar arasında geçebilecek sürenin de kısa olması anlamına gelmektedir. Bu bağlamda, çift tabakalı SSB kaplamalar üzerinde çalışılması gereken önemli bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Zhu, Guo, Yang ve Cheng (2020) yılında yaptıkları çalışmada, iki tabakalı SSB numunelerinde, tabakalar arasında kullanılan farklı özelliklerdeki çimento harçlarının etkinliğini incelemiştir. Çalışma kapsamında bağlayıcı olarak sabit dozajda çimento (99 kg/m^3) ve uçucu külün (121 kg/m^3) kullanıldığı bir SSB karışımı tasarlanmıştır. Bunun yanı sıra iki SSB tabakası arasında kullanılmak üzere 6 farklı (çimento dozajı 227,8 kg/m^3 ila 280 kg/m^3 arasında değişen) çimento harcı tasarlanmıştır. Çimento harcı tasarımlarında çimento ikame edici malzeme olarak, değişen oranlarda uçucu kül, silis dumanı ve çift genleşmeli ajan (HME) kullanılmıştır.

İki tabakalı SSB numuneleri, 75 mm kalınlığında iki SSB tabakası ve arasında 15 mm farklı çimento harçlarından oluşturulmuştur. Tabakalar arasında geçen süre 48 saat olarak sabit tutulmuştur. Çalışma kapsamında hazırlanan SSB numuneleri priz alma süresi, basınç dayanımı, eğilme dayanımı ve ara yüzey geçirimliliği değerlerini ölçmek üzere ilgili testlere tabii tutulmuştur. Yapılan testler neticesinde iki tabakalı SSB numunelerinde ara yüzeyde çimento harcı kullanımının numunelerin mekanik özelliklerinde iyileşme sağladığı tespit edilmiştir.

Buna ek olarak, ara tabakada çimento harcında HME kullanılan (kütlece %6 ila %8 arasında değişen miktarlarda) SSB numunelerinin çimento harcında uçucu kül ve silis dumanı kullanılan SSB numunelerine göre göreceli geçirimlilik katsayısı, kayma (kesme) dayanımı, tabakalar arası bağ dayanımı gibi özelliklerinin daha iyi olduğu belirlenmiştir. Ancak, çimento harcında kullanılacak HME miktarının artmasıyla (kütlece %10 oranında) performans iyileşmelerinde kayıplar oluştuğu gözlemlenmiştir.

Liu, Lu, Lou, Pan ve Wang (2018) yaptıkları çalışmada, farklı ara yüzey uygulamalarına sahip iki tabakalı SSB numunelerinin tabakalar arası kesme dayanımı özelliklerini incelemiştir. Çalışma kapsamında, bağlayıcı olarak çimento (87 kg/m^3) ve uçucu külün (87 kg/m^3) kullanıldığı bir SSB karışım tasarımı belirlenmiştir. Belirlenen tasarımlarda üretilen SSB karışımından iki tabakalı SSB numuneleri (SSB tabakaları 75 mm, ara yüzey uygulaması 10 mm kalınlığında olacak şekilde) hazırlanmıştır. İki tabakalı SSB numuneleri hazırlanırken, farklı tabakalar arası süre (0, 4, 20 ve 48 saat) ve farklı ara yüzey uygulamaları (katkılı ve katkısız çimento harçları) dikkate alınmıştır. Hazırlanan numunelere direkt (doğrudan) kesme testi ve SEM analizi yapılmıştır.

Yapılan testler neticesinde tabakaların dökümü arasında geçen sürenin priz başlama süresinden daha az olması durumunda, herhangi bir ara yüzey malzemesine ihtiyaç duyulmayacağı, ancak priz başlama süresinden itibaren geçen her zaman aralığının kesme dayanımını belirgin şekilde azalttığı belirlenmiştir. Buna ek olarak, ara yüzeyde kullanılan katkısız çimento harcının kesme dayanımına kayda değer bir katkısı olmadığı ancak katkılı çimento harçlarının önemli iyileşmeler sağladığı gözlemlenmiştir. Son olarak, SEM analizi sonuçları tabakalar arasında geçen zaman aralığı arttıkça, SSB numunelerinin mikro yapısında daha fazla küçük boşlukların oluştuğunu ve hidratasyon ürünlerinin azaldığını göstermiştir.

Mohammed ve diğerleri (2019) yaptıkları çalışmada, iki tabakalı SSB kaplamalarda derz bölgeleri boyunca yük transfer rijitliğini incelemiştir. Çalışma kapsamında alt tabakada maksimum tane boyutu 20 mm olan kireçtaşı agrega ile üst tabakada maksimum tane boyutu 10 mm olan granit agrega kullanılan 2 farklı SSB karışımı tasarlamıştır. Belirlenen tasarımlarda 3 farklı senaryo (tabakaların dökümü arasında 1, 3 ve 24 saat geçtiğinde) dahilinde SSB numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelere döngüsel kesme testi yapılmıştır.

Test sonuçlarına göre iki tabakalı SSB kaplamalarda derz rijitliğinin temel olarak çatlak genişliğine, uygulanan kesme kuvvetine ve tabakalar arası bağ kalitesine bağlı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, çatlak genişliğinin artması ve uygulama esnasında tabakalar arası bağ kalitesini azaltacak koşullarla karşılaşıldığında bozulmaların (çatlak oluşumu ve şiddeti) önemli oranda arttığı gözlemlenmiştir.

3. SSB YOLLARIN TÜRKİYE İÇİN ÖNEMİ

3.1. Türkiye'de Beton Yollar

Beton yollar rafinerizasyon işlemlerinin gelişmediği ve doğal asfaltın zor temin edilebildiği 20.yüzyılın ilk yarısında yaygın olarak kullanılmışken, özellikle 1960'lı yıllardan itibaren araç kullanımına paralel olarak hızla gelişen petrol teknolojisi ve rafinerizasyon nedeniyle asfalt kaplamalı yolların kullanımı daha ağırlık kazanmıştır.

Türkiye'de ise Cumhuriyetin, sonrasında Karayolları Genel Müdürlüğünün (KGM) kurulmasıyla birlikte ilk yıllarda hedef, devletin sosyal hizmetleri yaygınlaştırma politikaları doğrultusunda yaz-kış geçit verebilen yollar yapmak iken, asfalt betonu kaplamalı yolların yapımı 1970'li yıllardan sonra mümkün olabilmiştir. Daha sonraki yıllarda sathi kaplama ağırlıklı olmak üzere asfalt kaplamalı yolların yapımı tercih edilmiştir (Güngör, Sağlık ve Ünal, 2013).

Günümüzde, KGM sorumluluğundaki toplam 68.654 km yol ağının %55,5'i sathi kaplamalı, %40,6'si bitümlü sıcak karışım (BSK) kaplamalı, %3,9'u ise, parke, stabilize, toprak vd. durumdadır (KGM, 2020).

KGM, kuruluşundan günümüze kadar üstyapı tasarım ve yapımlarında esnek üstyapılara ağırlık verildiğinden, Türkiye'de beton yollarla ilgili bilgi ve tecrübe birikimi deneme yolları ve araştırma çalışmaları ile sınırlı kalmıştır. 2004 yılında KGM ile Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) ile yapılan protokol ile Afyon-Emirdağ Ayrım yolunda deneme amaçlı 2000 m uzunluğunda, derzli donatısız beton kaplama (JPCP) yol yapılmıştır. Bu KGM'nin yaptığı ilk beton yol olarak kayıtlara geçmiştir. Sonrasında İstanbul'da Hasdal Kavşağı - Kemerburgaz devlet yolu, Ordu'da Ulubey devlet yolu ve İzmit'te Karamürsel şehir geçişinde deneme yolları yapılmış ve halen KGM tarafından performansları gözlenmektedir (Çizelge 3.1).

Bununla birlikte yakın bir tarihte, 22 km uzunluğundaki Refahiye-Kuruçay-İliç-Kemaliye-Dutluca yolu beton yol olarak ihale edilmiş, yapım çalışmaları devam etmektedir (UAB, 2021).

Çizelge 3.1. KGM beton yol uygulamaları (Güngör ve diğerleri, 2013)

Yol adı / veriler	Afyon-Emirdağ Ayrımı	Hasdal Kavşağı-Kemerburgaz	Ordu-Ulubey Devlet Yolu	Karamürsel Şehir Geçişi
Kaplama tipi	JPCP	JPCP	JPCP	JPCP
Uzunluğu, m	2000	3500	1000	1600
Yapıldığı tarih	Haziran 2004	Ağustos 2006	Ekim 2007	Ocak 2010
Proje süresi, yıl	30	30	30	30
Platform genişliği, m	12,0	10,5	2 x 10,5	2 x 8,5
Derz aralığı, m	5,0	5,0	4,5	4,5
Plak kalınlığı, cm	27	27 ve 32	28	30
Beton plağın altı	Sathi kaplama	PMT (20,0 cm), Binder (5,0 cm)	Sathi kaplama	Binder (6,0 cm)
Çimento Tipi	CEM I 42,5R	CEM I 42,5R	CEM I 42,5R (Bor Katkılı)	CEM I 42,5R
Çimento dozajı, kg/m³	375	375	350	378
s/ç	0,41-0,45	≤ 0,45	~ 0,30	~ 0,43

KGM mevzuat çalışmaları kapsamında ise, beton yol üstyapıları ile ilgili iki önemli kaynak (Beton yol kaplamaları teknik şartnamesi, 2016, Karayolları beton yol üstyapılar projelendirme rehberi, 2019) yayımlanmıştır. KGM sorumluluğundaki yol ağında uzun tulde farklı tiplerde beton yol uygulaması yapılamamış ve Türkiye beton yollar tecrübesi, deneme yolları, mevzuat altyapısı ve araştırma çalışmaları ile sınırlı kalmıştır.

Diğer yandan, KGM dışında yol yapımından sorumlu olan Belediyelerin ve İl Özel İdarelerinin yol ağlarında beton yol uygulamaları son yıllarda büyük bir ivme kazanmıştır. Bu doğrultuda beton yol tipi olarak silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) yollar öne çıkmaktadır (Akbelen ve Yaman, 2019).

Belediyeler ve İl Çzel İdareleri kapsamında, Türkiye'deki ilk uygulamanın 2007 yılında Antalya Belediyesi tarafından yapıldığı, sonrasında 2009 yılında Denizli Belediyesi uygulamalarıyla yaygınlaşmaya başladığı bilinmektedir (Yaman ve Ceylan, 2013). Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği tarafından hazırlanan SSB Yollar Tasarım Rehberi (TÇMB, 2018) ve sonrasında 2020 yılında resmi gazetede yayınlanan Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yol Genel Teknik Şartnamesi (ÇŞB, 2020a) ile SSB Yollara ait birim fiyatların yayınlanması uygulamaların yaygınlaşmasını sağlamıştır (ÇŞB, 2021).

2020 yılı sonu itibarıyla Yerel Yönetimler Genel Müdürlüğünce hazırlanan köy yolu envanterine göre; il özel idarelerinin sorumluluk alanındaki toplam yol ağı 187.694 km'dir.

Bunun %47,3'ü asfalt, parke taşı ve beton yol, %41,4'ü stabilize, %8,8'i de ham ve tesviye yoldur. Köylerin il, ilçe ve belde merkezleri ile devlet ve il yollarına en uygun güzergahla ulaşımını sağlayan birinci derece yollar asfalt, stabilize ve beton yol standardındadır (ÇŞB, 2020b).

Bununla birlikte Köylerin Altyapısını Destekleme Projesi (KÖYDES) kapsamında, 2015-2020 yılları arasında klasik ve SSB olmak üzere toplam 4.823 km beton yapıldığı, bu yıllar arasında yapılan BSK yol uzunluğunun 3.738 km olduğu belirtilmektedir (ÇŞB, 2020b).

Türkiye'de çimento sektörü oldukça gelişmiş olması ve uluslararası önemli bir ihracatçı konumunda bulunması, çimento üretim tesisleri ve beton santrallerinin tüm bölgelere hızlı ulaşım sağlayacak konumlarda bulunması, SSB kaplama yapımı için gerekli ekip ve ekipmanlarının yaygınlığı ve diğer avantajlarıyla birlikte, SSB yol kaplamalarının BSK yol kaplamalarına alternatif olarak değerlendirilmesini gerektirmektedir.

12. Ulaştırma Şurası karayolu sektör raporunda, özellikle il yollarında gerek kendi başına gerekse kompozit kaplama olarak kullanılabilecek SSB yollar gibi ekonomik alternatiflerin değerlendirilmesinin, KGM yol bakım-onarım maliyetlerini düşürebileceği belirtilmiştir. Özellikle il yollarında gerek kendi başında gerek kompozit kaplama olarak SSB yol üstyapı tipine entegrasyonun sağlanması önerilmektedir (UAB, 2021).

KGM yol ağının %49,7 sini, 34.127 km ile il yolları oluşturmakta ve bu yolların sadece %16,4'ü BSK kaplamalı olarak hizmet vermektedir. Bu oran devlet yollarında %60, otoyollarda ise %100 dür (KGM, 2020). KGM sınırlı bütçe imkânlarını daha çok, trafik hacmi yüksek otoyol ve devlet yollarının standardını yükseltmek için kullandığı görülmektedir. Bu durumda, SSB kaplamalı yollar, KGM yol ağındaki düşük trafik yoğunluğuna sahip il yolları için iyi bir alternatif olarak ön plana çıkmaktadır. Bu aşamada ilk değerlendirilmesi gereken konu SSB yol üstyapıları ile BSK yol üstyapılarının maliyetleridir.

Bu amaçla, çalışma kapsamında; aynı yol sınıfı, proje süresi, trafik, çevre ve iklim koşulları ile taban zemini durumunda BSK ve SSB yolların geçerli tasarım metotlarına göre projelendirilerek, Türkiye şartlarında ilk yapım maliyet analizleri yapılmıştır. Çalışma detayları aşağıda verilecektir. Bu çalışma, KGM il yolları için, BSK ve SSB yol

üstyapılarının projelendirilerek karşılaştırmalı maliyetlerinin belirlendiği lisansüstü düzeyde ilk çalışmadır.

3.2. KGM Pratiğinde BSK ve SSB Üstyapıların Kalınlık Tasarımı

KGM yol ağındaki il yolları için BSK ve SSB kaplamalı yol üstyapılarının aynı şartlarda projelendirilerek karşılaştırılmaları için öncelik olarak tasarım metotlarının belirlenmesi gerekmektedir.

BSK üstyapı tasarımı için Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi (Güngör ve Sağlık, 2008), SSB üstyapıların kalınlık tasarımı içinse Amerikan Beton Üstyapılar Birliği tarafından onaylanarak uluslararası düzeyde kabul görmüş "StreetPave" yazılımı (ACPA, 2014) kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan yol üstyapıları kalınlık tasarımı parametleri aşağıda sunulmaktadır.

3.2.1. Yol sınıfı, güvenilirlik, SSB plak bozulma oranı ve proje ömrü

Yol sınıfı, KGM yol ağında bulunan il yoludur. İl yolları düşük trafik hacmine sahip olup, genel olarak gidiş dönüş tek yol olarak hizmet vermektedir (KGM, 2005).

Güvenilirlik Seviyesi; projelendirmesi yapılan üstyapıya ait kabul edilen tasarım kriterlerinin, hâkim trafik ve çevre koşulları altında, proje süresi boyunca geçerliliğini korumasının bir ölçütü olan güvenlik katsayısıdır. Güvenilirlik seviyeleri; SSB üstyapılar için Karayolları Beton Yol Üstyapılar Projelendirme Rehberi (Komut ve Kaşak, 2019) ve BSK üstyapılar için Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi (Güngör ve Sağlık, 2008) ile uyumlu şekilde seçilmiştir. SSB üstyapılar için güvenilirlik seviyesi %85, BSK üstyapılar için %70 alınmıştır.

SSB plak bozulma oranı (DR); SSB kaplamanın servis ömrü sonunda öngörülen bozulma derecesini göstermektedir. SSB tasarımında güvenilirlik ile SSB plak bozulma oranı birbiriyle ilişkili kavramlardır. Güvenilirlik %100 olduğunda, bozulma oranı %0 olmakla birlikte, güvenilirlik azaldıkça bozulma oranı artmaktadır. StreetPave yazılımı kullanılarak yapılan SSB üstyapı tasarımda güvenilirlik seviyesi için DR, %15 olarak belirlenmiştir (ACPA, 2014).

Proje süresi; yolun trafiğe açılmasından, son servis kabiliyeti değerine ulaşasıya kadar geçen zaman (yıl) dır. Teknik ve ekonomik analizlerde kullanılacak trafik hacimleri, her iki üstyapı tipi için proje süresi 20 ve 30 yıl olarak alınarak iki kez hesaplanmıştır. Bu kapsamda, proje süresi ile artan trafik hacmi altında, rijit ve esnek üst yapıların karşılaştırılması hedeflenmiştir.

3.2.2. Trafik hesapları için parametreler

Trafik artış katsayısı (r); ilk yıl trafik hacminin kullanılarak, proje süresi boyunca yolun maruz kalacağı standart dingil yükü tekerrür sayısının belirlenmesinde kullanılan, her taşıt grubu için farklı bir katsayıdır.

Taşıt grupları için hesaplarda kullanılan trafik artış katsayıları (r), KGM tarafından genel kabul görmüş değerlerle uyumlu olarak seçilmiş olup, değerler Çizelge 3.2'de verilmektedir.

Çizelge 3.2. Trafik artış katsayıları

Araç tipi	Trafik artış katsayıları (r)
Treyler	%4
Kamyon	%4
Otobüs	%5
Orta Yüklü Ticari Taşı	%5
Otomobil	%5

Taşıt Eşdeğerlik Faktörleri (TEF); projesi yapılacak yolu karakterize eden lodometre çalışması, dingil yükü etütleri sonucunda çıkacak dingil yükü dağılımı ve dingil yükü eşdeğerlik faktörleri kullanılarak bulunur. Her iki üstyapı tasarımı için TEF değerleri Çizelge 3.3'de verildiği şekilde alınmıştır (Güngör ve Sağlık, 2008).

Çizelge 3.3. Taşıt eşdeğerlik faktörleri

Taşıt grubu	Taşıt eşdeğerlik faktörü (TEF)
Treyler	4,10
Kamyon	2,90
Otobüs	3,20
Orta Yüklü Ticari Taşıt	0,60
Otomobil	0,0006

Yön dağıtma faktörü; her iki yönden geçen trafiğin, şerit bazında dağılımının bir göstergesidir. Hesaplamalarda, her bir trafik yönü için trafik değerinin eşit olduğu kabul edilmiş, SSB ve BSK üstyapı kaplamaları için yön dağıtma faktörü %50 olarak alınmıştır.

Şerit dağıtma faktörü (η); tek yöndeki şerit sayısına bağlı olarak belirlenmektedir. İl yolları geometrik özellikleri göz önünde bulundurulduğunda, tek yöndeki şerit sayısı 1 olarak kabul edilerek, şerit dağıtma faktörü 1 alınmıştır (Güngör ve Sağlık, 2008).

3.2.3. Tasarım trafiği

Bölüm 3.3.1 ve 3.3.2'de verilen parametreler kullanılarak ilgili tasarım rehberlerinde (Güngör ve Sağlık, 2008; Komut ve Kaşak, 2019) verilen yöntemlere göre, 20 ve 30 yıl proje süresi için tasarım trafikleri belirlenmiştir (Çizelge 3.4).

Toplam standart dingil yükü tekerrür sayısı ($T_{8.2}$); proje ömrü boyunca hesap şeridinden geçen çeşitli dingil yüklerinin 8,2 ton eşdeğer standart dingil tekerrür sayısına çevrilerek toplanmasıyla elde edilen sayıdır. Toplam standart dingil yükü tekerrür sayıları ($T_{8.2}$) hesap detayları 20 yıl ve 30 yıl proje süresi için, Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6'da verilmektedir.

Çizelge 3.4. Trafik hacimlerine ilişkin toplam standart dingil yükü tekerrür sayıları

Projelendirme süresi	Trafik hacmi	Toplam standart dingil yükü tekerrür sayısı ($T_{8.2}$)
20 Yıl	Düşük Yoğunluk	6.000.616
	Orta Yoğunluk	67.500.000
	Yüksek Yoğunluk	245.013.820
30 Yıl	Düşük Yoğunluk	11.655.197
	Orta Yoğunluk	130.034.838
	Yüksek Yoğunluk	469.450.073

Çizelge 3.5. 20 yıl proje süresi için toplam standart dingil yükü tekerrür sayıları ($T_{8.2}$) hesap detayları

Yüksek yoğunlukta trafik hacmi - 20 yıl proje süresi							
Araç grupları	YOGT sayımları (2021)	Trafik artış katsayısı (r)	İlk trafik (T_i) (2024)	Son trafik (T_s) (2044)	Proje taşıt trafiği (t_p)	Taşıt eşdeğerlik faktörü (TEF)	Günlük standart dingil yükü tekerrür sayısı (W_g)
Treyler	3001	4	3376	7397	5126	4,1	10508
Kamyon	5800	4	6524	14295	9907	2,9	14365
Otobüs	2020	5	2338	6204	3962	3,2	6339
OYTT	3985	5	4613	12240	7816	0,6	2345
Otomobil	10000	5	11576	30715	19614	0,0006	6
Toplam standart dingil yükü tekerrür sayısı ($T_{8.2}=W_g$x365x20)						245.013.820	
Orta yoğunlukta trafik hacmi - 20 yıl proje süresi							
Araç grupları	YOGT sayımları (2021)	Trafik artış katsayısı (r)	İlk trafik (T_i) (2024)	Son trafik (T_s) (2044)	Proje taşıt trafiği (t_p)	Taşıt eşdeğerlik faktörü (TEF)	Günlük standart dingil yükü tekerrür sayısı (W_g)
Treyler	320	4	360	789	547	4,1	1121
Kamyon	2005	4	2255	4942	3425	2,9	4966
Otobüs	650	5	752	1996	1275	3,2	2040
OYTT	1901	5	2201	5839	3729	0,6	1119
Otomobil	2934	5	3396	9012	5755	0,0006	2
Toplam standart dingil yükü tekerrür sayısı ($T_{8.2}=W_g$x365x20)						67.500.000	
Düşük yoğunlukta trafik hacmi - 20 yıl proje süresi							
Araç grupları	YOGT sayımları (2021)	Trafik artış katsayısı (r)	İlk trafik (T_i) (2024)	Son trafik (T_s) (2044)	Proje taşıt trafiği (t_p)	Taşıt eşdeğerlik faktörü (TEF)	Günlük standart dingil yükü tekerrür sayısı (W_g)
Treyler	40	4	45	99	68	4,1	140
Kamyon	120	4	135	296	205	2,9	297
Otobüs	100	5	116	307	196	3,2	314
OYTT	120	5	139	369	235	0,6	71
Otomobil	500	5	579	1536	981	0,0006	0
Toplam standart dingil yükü tekerrür sayısı ($T_{8.2}=W_g$x365x20)						6.000.616	

Çizelge 3.6. 30 yıl proje süresi için toplam standart dingil yükü tekerrür sayıları ($T_{8.2}$) hesap detayları

Yüksek yoğunlukta trafik hacmi - 30 yıl proje süresi							
Araç grupları	YOGT (2021)	Trafik artış katsayısı (r)	İlk trafik (T_i) (2024)	Son trafik (T_s) (2054)	Proje taşıt trafiği (t_p)	Taşıt eşdeğerlik faktörü (TEF)	Günlük standart dingil yükü tekerrür sayısı (W_g)
Treyler	3001	4	3376	10949	6436	4,1	13195
Kamyon	5800	4	6524	21161	12440	2,9	18037
Otobüs	2020	5	2338	10106	5307	3,2	8491
OYTT	3985	5	4613	19938	10470	0,6	3141
Otomobil	10000	5	11576	50032	26273	0,0006	8
Toplam standart dingil yükü tekerrür sayısı ($T_{8.2}=W_g$x365x30)						469.450.073	
Orta yoğunlukta trafik hacmi - 30 yıl proje süresi							
Araç grupları	YOGT sayımları (2021)	Trafik artış katsayısı (r)	İlk trafik (T_i) (2024)	Son trafik (T_s) (2054)	Proje taşıt trafiği (t_p)	Taşıt eşdeğerlik faktörü (TEF)	Günlük standart dingil yükü tekerrür sayısı (W_g)
Treyler	320	4	360	1167	686	4,1	1407
Kamyon	2005	4	2255	7315	4300	2,9	6235
Otobüs	650	5	752	3252	1708	3,2	2732
OYTT	1901	5	2201	9511	4995	0,6	1498
Otomobil	2934	5	3396	14679	7709	0,0006	2
Toplam standart dingil yükü tekerrür sayısı ($T_{8.2}=W_g$x365x30)						130.034.838	
Düşük yoğunlukta trafik hacmi - 30 yıl proje süresi							
Araç grupları	YOGT sayımları (2021)	Trafik artış katsayısı (r)	İlk trafik (T_i) (2024)	Son trafik (T_s) (2054)	Proje taşıt trafiği (t_p)	Taşıt eşdeğerlik faktörü (TEF)	Günlük standart dingil yükü tekerrür sayısı (W_g)
Treyler	40	4	45	146	86	4,1	176
Kamyon	120	4	135	438	257	2,9	373
Otobüs	100	5	116	500	263	3,2	420
OYTT	120	5	139	600	315	0,6	95
Otomobil	500	5	579	2502	1314	0,0006	0
Toplam standart dingil yükü tekerrür sayısı ($T_{8.2}=W_g$x365x30)						11.655.197	

3.2.4. Zemin sınıflarına ilişkin parametreler

Zemin sınıfları taşıma gücü açısından yüksek, orta ve zayıf dayanımlı olmak üzere üç gruba ayrılmıştır. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) değeri (ASTM D1883-21, 2021) ve esneklik modülü (M_R) değeri (AASHTO T 307, 2003) zemin taşıma gücünü karakterize etmek için kullanılan değerlerdir.

Dayanım değerleri yaş CBR ile temsil edilmekte olup, çalışma kapsamında öngörülen zemin sınıfları Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Zemin sınıfları

Zemin sınıfı	Yaş CBR değeri
Yüksek dayanımlı zeminler	CBR% >50
Orta dayanımlı zeminler	8 ≤ CBR% ≤ 50
Zayıf dayanımlı zeminler	CBR% <8

Zayıf dayanımlı zeminler ise, kendi içinde ayrıca değerlendirilmiş ve yaş CBR değerlerine göre beş grupta incelenmesi öngörülmüştür. Zemin sınıflarına ilişkin üstyapı tasarım hesaplarında kullanılacak olan temsili yaş CBR ve Esneklik Modülü (M_R) değerleri Çizelge 3.8'de verilmektedir.

Çizelge 3.8. Zemin yaş CBR % değerleri

Zemin Sınıfı	CBR değerleri, %	Temsili CBR değerleri, %	Temsili MR değerleri, psi
Zayıf dayanımlı zemin 1	1	1	1.800
Zayıf dayanımlı zemin 2	2	2	3.100
Zayıf dayanımlı zemin 3	4	4	4.750
Zayıf dayanımlı zemin 4	6	6	6.750
Zayıf dayanımlı zemin 5	7-8	8	8.300
Orta dayanımlı zemin	8-50	15	12.600
Yüksek dayanımlı zemin	≥ 50	50	28.000

3.2.5. SSB ve BSK üstyapı tabakaları malzeme özellikleri

SSB üstyapı kalınlık tasarımlarında; beton dayanım sınıfı C30/37 olarak alınmış ve beton dayanım sınıfıyla uyumlu olarak öngörülen SSB karışım özellikleri Çizelge 3.9'da verilmektedir.

Çizelge 3.9. Kullanılan SSB karışım özellikleri

Özellikler	Değer
Beton sınıfı	C 30/37
Karakteristik silindir basınç dayanımı (f_{ck}) (MPa)	30
Karakteristik küp basınç dayanımı (f_{ck}) (MPa)	37
Elastisite modülü (E_c) (MPa)	27.500
Eğilmede çekme dayanımı (MPa)	5

BSK üstyapı kalınlık tasarımlarında kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 3.10'da verilmektedir.

Burada;

Üstyapı sayısı (SN); trafik, taban zemini koşulları, drenaj özellikleri ve son servis kabiliyetinin analizinden elde edilen ve üstyapının her bir tabakasında kullanılmakta olan malzeme tiplerine uygun tabaka katsayılarının (a katsayısı) kullanılmasıyla, esnek üstyapı tabakalarının kalınlığına dönüştürülen sayısıdır (Güngör ve Sağlık, 2008).

İzafi mukavemet katsayısı (a katsayısı); üstyapı sayısını (SN) gerçek kalınlığa dönüştürmek için, üstyapıda kullanılan herbir tabakaya ait taşıma gücünün bir ölçüsüdür (Güngör ve Sağlık, 2008).

Marshall stabilitesi (M.S.); Bitümlü karışımlara uygulanan Marshall deneyi sonucu elde edilen briketlerin kırılmasını sağlayan kg cinsinden toplam yük miktarıdır (ASTM D6927-15, 2016).

Çizelge 3.10. Esnek üstyapı tabaka katsayıları (Güngör ve Sağlık, 2008)

Tabaka tipi	M.S. (kg)	CBR %	a katsayısı
Taş mastik asfalt (TMA)	-	-	0,44
Asfalt betonu aşınma	≥ 900	-	0,42
Asfalt betonu binder	≥ 750	-	0,40
Bitümlü temel	≥ 600	-	0,36
Plentmiks temel	-	≥ 120	0,15
Kırmataş alttemel	-	≥ 50	0,13

3.2.6. Zayıf taban zeminlerinde koruyucu tabaka kalınlıkları

Karayolları Beton Yol Üstyapılar Projelendirme Rehberi (Komut ve Kaşak, 2019) ve Karayolları Esnek Üstyapılar Projelendirme Rehberi'nde (Güngör ve Sağlık, 2008) yaş CBR değeri < %8 olan zeminler, zayıf zeminler olarak nitelendirilmiş ve üstyapı tabanında kullanılması uygun bulunmamıştır. Bu durumda zayıf zeminin kazılarak, üstyapı tabanında Çizelge 3.11'de belirtilen özelliklerde seçme malzeme ile koruyucu tabaka yapılması gerektiği belirtilmiştir.

Çizelge 3.11. Koruyucu tabaka özellikleri (Güngör ve Sağlık, 2008; Komut ve Kaşak, 2019)

Deney adı	Limit değer	İlgili standart
0.075mm.(No:200) elekten geçen malzeme	<%50	TS 1900 AASHTO T-11
Likit limit (LL)	< 40	TS 1900 AASHTO T-89
Plastisite indeksi (PI)	< 15	TS 1900 AASHTO T-90
Yaş CBR	≥ %10	TS 1900 AASHTO T-193

Koruyucu tabaka kalınlıkları zemin yaş CBR değeri ve tasarımı yapılan yoldan geçmesi planlanan toplam standart dingil yükü tekerrür sayısına bağlı olarak belirlenmektedir. Çalışmada, CBR değerleri ve trafik hacimleri göre kullanılan koruyucu tabaka kalınlıkları

Çizelge 3.12'de verilmektedir. Koruyucu tabakanın yaş CBR değeri %10 olacak şekilde, belirlenen kalınlıklarıyla birlikte, üstyapı taşıma gücüne katkıları hesaplara dâhil edilmiştir.

Çizelge 3.12. Koruyucu tabaka kalınlıkları (Güngör ve Sağlık, 2008; Komut ve Kaşak, 2019)

Toplam standart dingil yükü tekerrür sayısı ($T_{8,2}$)	KGM esnek üstyapılar projelendirme rehberi zayıf zeminler için koruyucu tabaka kalınlıkları (cm)						
Yaş CBR %	1	2	3	4	5	6	7-8
< 40 milyon	75	50	40	35	25	20	20
40-80 milyon	80	55	40	35	25	20	20
> 80 milyon	85	60	45	40	30	25	20

Toplam standart dingil yükü tekerrür sayısı ($T_{8,2}$)	KGM beton yol üstyapılar projelendirme rehberi zayıf zeminler için koruyucu tabaka kalınlıkları (cm)			
Yaş CBR %	<2	2 ≤ CBR% < 4	4 ≤ CBR% < 6	6 ≤ CBR% < 8
< 80 milyon	55	35	25	20
> 80 milyon	60	40	30	20

3.3. Bitümlü Sıcak Karışım (BSK) Üstyapı Kalınlık Tasarımı

Esnek üstyapı tabaka kalınlıkları, servis kabiliyeti-üstyapı davranışı ilişkisine dayanan AASHTO yol testleri sonucunda geliştirilen eşitlik kullanılarak üstyapı sayısı (SN) belirlenmesi (Güngör ve Sağlık, 2008) ile hesaplanmaktadır (Eşitlik 3.1).

$$log_{10}(T_{8.2}) = Z_R \times S_0 + 9{,}36 \times log_{10}(SN + 1) - 0{,}20 + \frac{log_{10}\left(\frac{\Delta PSI}{4{,}2-1{,}5}\right)}{0{,}40 + \frac{1094}{(SN+1)^{5{,}19}}} + 2{,}32 \times log_{10} M_R - 8{,}07 \qquad (3.1)$$

Burada;

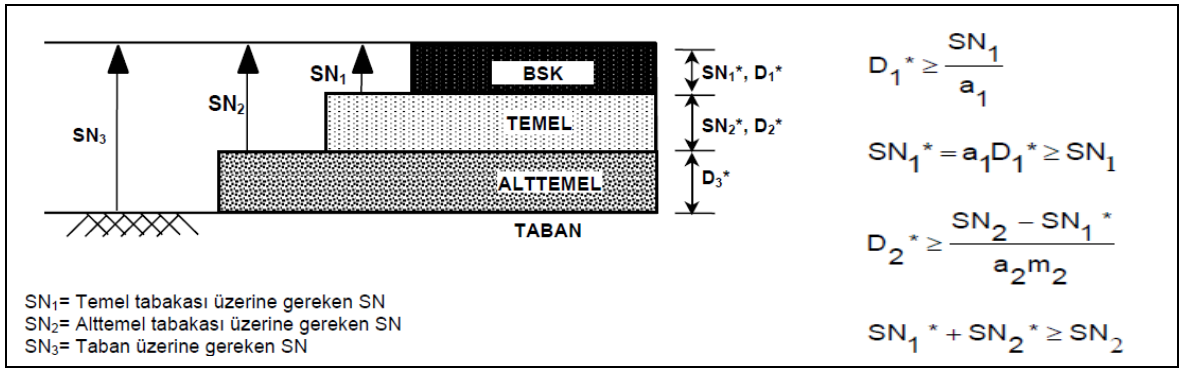
Güvenilirliğin standart normal sapması (Z_R); projelendirilmesi yapılan üstyapıya ait proje kriterlerinin, belirlenen proje süresi boyunca, hâkim trafik ve çevre koşulları altında yoldan beklenen projelendirme şartlarını karşılama olasılığı olan güvenilirliğin standart sapması olup, il yolu için -0,524 olarak alınmıştır (Güngör ve Sağlık, 2008).

Toplam standart sapma (S_o); trafik ve performans tahmininin bileşik toplam standart sapması değeri olup, öngörülen trafik projeksiyonunun güvenilirliğine bağlı olarak esnek üstyapılar için 0,45 alınmıştır (Güngör ve Sağlık, 2008).

Servis kabiliyetindeki azalma miktarı (ΔPSI); üstyapı kalınlık tasarımı yapılan yolun başlangıç servis kabiliyetinden son servis kabiliyetinin çıkartılmasıyla elde edilmekte olup, ilgili rehberde (Güngör ve Sağlık, 2008) belirtildiği şekliyle 2,2 olarak alınmıştır.

Esneklik modülü (M_R); üstyapı malzemelerinin tekrar eden yükler altındaki elastiklik modülüdür.

Belirlenen tabaka kalınlıklarının temel ve alttemel üzerinde gerekli SN değerini sağlaması gerekmektedir. Tabaka kalınlıklarının kontrolü için kullanılan eşitlikler Şekil 3.1 üzerinde verilmiştir.



Şekil 3.1. SN ile tabaka kalınlık kontrolü (Güngör ve Sağlık, 2008)

BSK üstyapı tabaka kalınlıkları, 20 ve 30 yıl proje süresi için, aşınma tabakasında taş mastik asfalt kullanılması durumuna göre, üç farklı trafik hacmi ve yedi farklı zemin sınıfı için tabaka kalınlıkları ayrı ayrı hesaplanmıştır. BSK üstyapı için hesaplanan tabaka kalınlıkları Çizelge 3.13 ve Çizelge 3.14'de verilmektedir.

Burada;

Taş mastik asfalt (TMA); iri agregaların birbirleriyle temasının sağlandığı yapısı ile boşlukları dolduran ince agrega, filler, elyaf ve bitümlü bağlayıcıdan oluşan, aşınma tabakası olarak kullanılan bir sıcak karışım tabakasıdır.

Binder; temel tabakası üzerine gelen bitümlü sıcak karışım kaplama tabakasıdır.

Bitümlü temel; bağlayıcı veya bağlayıcısız bir temel tabakası üzerine inşaa edilen bitümlü sıcak karışım tabakasıdır.

Plentmiks temel (PMT); sürekli gradasyon veren iri ve ince agrega karışımının uygun oranda su ile karıştırılmasıyla hazırlanan yol üstyapı tabakasıdır.

Alttemel; üstyapı taban zemini üzerine yerleştirilen belirli fiziksel özelliklere sahip agrega karışımından oluşan yol üstyapı tabakasıdır.

Çizelge 3.13. 20 yıl proje süresi için BSK üstyapı tabaka kalınlıkları

Yol Sınıfı Güvenilirlik	$T_{8.2}$	CBR %	TMA cm	Binder cm	Bitümlü temel cm	PMT cm	Alttemel cm	Koruyucu Tabaka cm
İl Yolu Güvenilirlik %70	245.013.820	1	4,0	11,0	14,0	20,0	15,0	85,0
		2	4,0	11,0	13,0	20,0	15,0	60,0
		4	4,0	11,0	13,0	20,0	15,0	40,0
		6	4,0	10,0	12,0	20,0	15,0	25,0
		8	4,0	10,0	12,0	20,0	20,0	-
		15	4,0	10,0	10,0	20,0	15,0	-
		50	4,0	10,0	10,0	20,0	15,0	-
	67.500.000	1	4,0	7,0	10,0	20,0	15,0	80,0
		2	4,0	7,0	10,0	20,0	15,0	55,0
		4	4,0	7,0	10,0	20,0	15,0	35,0
		6	4,0	7,0	10,0	20,0	15,0	20,0
		8	4,0	7,0	10,0	20,0	20,0	-
		15	4,0	7,0	9,0	20,0	15,0	-
		50	4,0	7,0	9,0	20,0	15,0	-
	6.000.616	1	4,0	10,0	0,0	15,0	15,0	75,0
		2	4,0	10,0	0,0	15,0	15,0	50,0
		4	4,0	10,0	0,0	15,0	15,0	35,0
		6	4,0	10,0	0,0	15,0	15,0	20,0
		8	4,0	10,0	0,0	15,0	15,0	-
		15	4,0	10,0	0,0	15,0	15,0	-
		50	4,0	10,0	0,0	15,0	15,0	-

Çizelge 3.14. 30 yıl proje süresi için BSK üstyapı tabaka kalınlıkları

Yol Sınıfı Güvenilirlik	$T_{8.2}$	CBR %	TMA cm	Binder cm	Bitümlü temel cm	PMT cm	Alttemel cm	Koruyucu Tabaka cm
İl Yolu Güvenilirlik %70	469.450.073	1	4,0	16,0	23,0	20,0	20,0	85,0
		2	4,0	16,0	20,0	20,0	20,0	60,0
		4	4,0	16,0	17,0	20,0	15,0	40,0
		6	4,0	14,0	17,0	20,0	15,0	25,0
		8	4,0	13,0	16,0	20,0	15,0	25,0
		15	4,0	13,0	16,0	20,0	15,0	-
		50	4,0	12,0	14,0	20,0	15,0	-
	130.034.838	1	4,0	15,0	18,0	20,0	15,0	85,0
		2	4,0	13,0	14,0	20,0	15,0	60,0
		4	4,0	12,0	14,0	20,0	15,0	40,0
		6	4,0	11,0	14,0	20,0	15,0	25,0
		8	4,0	10,0	12,0	20,0	15,0	25,0
		15	4,0	10,0	12,0	20,0	15,0	-
		50	4,0	10,0	11,0	20,0	15,0	-
	11.655.197	1	4,0	6,0	9,0	20,0	15,0	75,0
		2	4,0	5,0	9,0	20,0	15,0	50,0
		4	4,0	5,0	8,0	20,0	15,0	35,0
		6	4,0	5,0	8,0	20,0	15,0	20,0
		8	4,0	5,0	8,0	20,0	20,0	-
		15	4,0	5,0	8,0	20,0	15,0	-
		50	4,0	5,0	8,0	20,0	15,0	-

Kalınlık hesapları yapılırken gerekli SN ve mevcut SN değerleri ile, Şekil 3.1'de belirtilen SN tabaka kontrol sonuçları EK-1'de verilmektedir. BSK kalınlık tasarımlarında özellikle zayıf dayanımlı zeminlerin bulunduğu kesimlerde seçme malzeme kullanılarak alttemel ve temel tabaka kalınlıkları 15-20 cm arasında belirlenmiş, daha ekonomik tasarımlar yapılmıştır.

3.4. Silindirle Sıkıştırılmış Beton (SSB) Yol Kalınlık Tasarımı

SSB üstyapıların tabaka kalınlık hesaplamaları, Amerikan Beton Üstyapılar Birliği tarafından hazırlanan ve uluslararası düzeyde kabul görmüş "StreetPave" yazılımı (ACPA, 2004) kullanılarak yapılmıştır. Hesaplanan SSB üstyapı tabaka kalınlıkları Çizelge 3.15, Çizelge 3.16 ve EK-1'de verilmektedir.

Çizelge 3.15. 20 yıl proje süresi için SSB üstyapı tabaka kalınlıkları

Yol Sınıfı Güvenilirlik	$T_{8.2}$	CBR %	SSB cm	PMT cm	Alttemel cm	Koruyucu Tabaka cm
İl Yolu Güvenilirlik %85	245.013.820	1	23,14	15,0	15,0	60,0
		2	23,14	15,0	15,0	40,0
		4	23,14	15,0	15,0	30,0
		6	23,14	15,0	15,0	20,0
		8	23,39	15,0	15,0	-
		15	22,73	15,0	15,0	-
		50	21,36	15,0	15,0	-
	67.500.000	1	20,78	15,0	15,0	55,0
		2	20,78	15,0	15,0	35,0
		4	20,78	15,0	15,0	25,0
		6	20,78	15,0	15,0	20,0
		8	20,96	15,0	15,0	-
		15	20,47	15,0	15,0	-
		50	19,28	15,0	15,0	-
	6.000.616	1	16,87	15,0	15,0	55,0
		2	16,87	15,0	15,0	35,0
		4	16,87	15,0	15,0	25,0
		6	16,87	15,0	15,0	20,0
		8	16,99	15,0	15,0	-
		15	16,64	15,0	15,0	-
		50	15,62	15,0	15,0	-

Çizelge 3.16. 30 yıl proje süresi için SSB üstyapı tabaka kalınlıkları

Yol Sınıfı Güvenilirlik	$T_{8.2}$	CBR%	SSB cm	PMT cm	Alttemel cm	Koruyucu Tabaka cm
İl Yolu Güvenilirlik %85	469.450.073	1	24,3	15,0	15,0	60,0
		2	24,3	15,0	15,0	40,0
		4	24,3	15,0	15,0	30,0
		6	24,3	15,0	15,0	20,0
		8	24,6	15,0	15,0	-
		15	23,9	15,0	15,0	-
		50	22,4	15,0	15,0	-
	130.034.838	1	21,9	15,0	15,0	60,0
		2	21,9	15,0	15,0	40,0
		4	21,9	15,0	15,0	30,0
		6	21,9	15,0	15,0	20,0
		8	22,2	15,0	15,0	-
		15	21,6	15,0	15,0	-
		50	20,3	15,0	15,0	-
	11.655.197	1	17,9	15,0	15,0	55,0
		2	17,9	15,0	15,0	35,0
		4	17,9	15,0	15,0	25,0
		6	17,9	15,0	15,0	20,0
		8	18,1	15,0	15,0	-
		15	17,7	15,0	15,0	-
		50	16,6	15,0	15,0	-

3.5. BSK Yol Birim Fiyatları

3.5.1. Birim fiyata dâhil olan masraflar

Yapılan kalınlık tasarımlarına ilişkin kullanılacak olan birim fiyatlar, üstyapı tabaka tip ve kalınlıklarına göre ayrı ayrı belirlenmiş olup (KGM, 2021), Çizelge 3.17, Çizelge 3.18 ve Çizelge 3.19'da verilmektedir.

Çizelge 3.17. Değişen kalınlıklarda bitümlü temel tabakası yapılmasına ilişkin birim fiyatlar (KGM, 2021)

Bitümlü sıcak temel tabakası yapılması				
Sıra No.	Poz No.	İşin Adı	Ölçü Birimi	Birim Fiyatı (TL)
1	KGM/6214	14 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile) (TİP-A)	m^2	34,29
2	KGM/6213	13 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile) (TİP-A)	m^2	31,89
3	KGM/6212	12 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile) (TİP-A)	m^2	29,49
4	KGM/6211	11 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile) (TİP-A)	m^2	27,09
5	KGM/6210	10 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile) (TİP-A)	m^2	24,69
6	KGM/6209	9 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m2 asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile) (TİP-A)	m^2	22,29
7	KGM/6208	8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile) (TİP-A)	m^2	19,89

Çizelge 3.18. Değişen kalınlıklarda binder tabakası yapılmasına ilişkin birim fiyatlar (KGM, 2021)

Binder tabakası yapılması				
Sıra No.	Poz No.	İşin Adı	Ölçü Birimi	Birim Fiyatı (TL)
1	KGM/6308	8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m^2	20,86
2	KGM/6308/S	8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş sert taşı ile)	m^2	22,79
3	KGM/6307	7 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m^2	18,34
4	KGM/6307/S	7 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş sert taşı ile)	m^2	20,03
5	KGM/6306	6 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m^2	15,82
6	KGM/6306/S	6 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş sert taşı ile)	m^2	17,27
7	KGM/6305	5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m^2 asfalt betonu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m^2	13,29
8	KGM/6305/S	5 cm sıkışmış kalınlıkta m^2 asfalt betonu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş sert taşı ile)	m^2	14,50

Çizelge 3.19. Taş mastik asfalt aşınma tabakası yapılmasına ilişkin birim fiyat (KGM, 2021)

Aşınma Tabakası Yapılması				
Sıra No.	Poz No.	İşin Adı	Ölçü Birimi	Birim Fiyatı (TL)
1	KGM/6454/S-M	4 cm sıkışmış kalınlıkta m^2 TMA aşınma tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş sert taş ve modifiye bitüm ile) (TİP-1)	m^2	14,99

3.5.2. Birim fiyata dâhil olmayan masraflar

BSK üstyapı tabaka birim fiyatları hesaplanırken, Bölüm 3.7.1'deki fiyatlara ilave olarak birim fiyata dâhil olmayan masrafların da belirlenerek, gerçek maliyetlerin ortaya konulması gerekir. Aşağıda maliyet hesaplarına esas parametreler ile birim fiyat bazında dâhil olmayan masraflar verilmektedir.

Bitümlü bağlayıcı maliyetinin hesaplanmasında "10.330.5422, Asfalt çimentosu (Penetrasyon asfalt) (Kırıkkale)" pozu esas alınmıştır (ÇŞB, 2021).

Karışımlarda kullanılacak bitüm oranları ve karışım yoğunlukları KGM mevzuatıyla uyumlu olarak belirlenmiştir (KGM, 2016). Birim fiyatlara dâhil olmayan masrafların belirlenmesinde kullanılan parametreler Çizelge 3.20 ve Çizelge 3.21'de verilmektedir.

Çizelge 3.20. BSK maliyet hesaplamalarında kullanılan karışım yoğunlukları ve bitümlü bağlayıcı oranları (KGM, 2016)

BSK tabaka tipi	Karışım yoğunlukları t/m^3	Bitümlü bağlayıcı oranları %
TMA için bitüm oranı (sert taş)	2,45	6,1
Binder için bitüm oranı (sert taş)	2,45	4,8
Binder için bitüm oranı (ocak taşı)	2,40	4,3
Bitümlü temel için bitüm oranı (ocak taşı)	2,30	3,8

Çizelge 3.21. BSK maliyet hesaplamalarında kullanılan taşıma parametreleri (KGM, 2021)

Taşıma parametreleri	
Taşıma katsayısı	427
Güçlük katsayısı	1
BSK agregası konkasörden plent sahasına taşıma mesafesi (sert taş)	50 km
BSK agregası konkasörden plent sahasına taşıma mesafesi (ocak taşı)	10 km
Ocak konkasör arası ortalama taşıma mesafesi (sert taş)	10 km
Ocak konkasör arası ortalama taşıma mesafesi (ocak taşı)	0,2 km
Bitüm taşıma mesafesi	300 km
BSK'nın işbaşına taşıma mesafesi	10 km
Bitümlü yapıştırıcının iş başına taşıma mesafesi	10 km

Karayolu teknik şartnamesinde; bitümlü yapıştırıcının kullanım miktarı 0,15-0,50 l/m² önerilmektedir (KGM, 2013). Çalışma kapsamında bitümlü yapıştırıcının kullanım miktarı genel uygulamayla uyumlu şekilde, 0,20 l/m² alınmıştır.

Modifiye edici katkı malzemesi bitüm miktarının %4,5'i oranında kullanıldığı kabul edilmiş olup, 1 ton modifiye edici katkı malzemesinin maliyeti 24.000 TL olarak alınmıştır.

Elyaf katkı malzemesi karışım miktarının %0,35'i oranında kullanıldığı kabul edilmiş olup, 1 ton elyaf katkı malzemesinin maliyeti 7.125 TL olarak alınmıştır.

Soğuyan bitümün ısıtılmasında KGM/4358 "Katı bitümlü malzemenin sarnıç veya tanklarda emiş derecesine kadar ısıtılması (Makine ile)" pozu kullanılmıştır (KGM,2021). BSK yollarda birim fiyata dâhil olmayan masraflar üstyapıyı oluşturan tabakalar bazında aşağıda açıklanmış, Çizelge 3.22'de ise pozları fiyatlarıyla birlikte verilmiştir.

Bitümlü temel, binder tabakası için birim fiyata dâhil olmayan masraflar

Ocak-konkasör arası ortalama 150 m'den fazla mesafeye taşıma, agreganın plent sahasına taşınması, bitümlü malzemenin; bedeli, temin yerinden depo tankına kadar taşınması, taşıma dolayısıyla soğuyan bitümlü malzemenin emiş derecesine kadar ısıtılması, bitümlü yapıştırıcının; temin yerinden plent sahasına ve yol boyunca taşınması, bitümlü sıcak karışımın iş başına taşınması, şehir içinde yapılan süpürme işlerinde tretuvar üzerine konulan süprüntü malzemesinin vasıtalara yüklenmesi, taşınması ve boşaltılması.

TMA aşınma tabakası için birim fiyata dâhil olmayan masraflar

Ocak-konkasör arası ortalama 150 m'den fazla mesafeye taşıma, agreganın plent sahasına taşınması, elyaf ve modifiye edici katkı maddelerinin iş başında temini, bitümlü malzemenin; bedeli, temin yerinden depo tankına kadar taşınması, taşıma dolayısıyla soğuyan bitümlü malzemenin emiş derecesine kadar ısıtılması, bitümlü yapıştırıcının; temin yerinden plent sahasına ve yol boyunca taşınması, bitümlü sıcak karışımın iş başına taşınması, şehir içinde yapılan süpürme işlerinde tretuvar üzerine konulan süprüntü malzemesinin vasıtalara yüklenmesi, taşınması ve boşaltılması.

Çizelge 3.22. BSK yol birim fiyata dâhil olmayan masraflar

Sıra No.	Poz No.	İşin Adı	Ölçü Birimi	Birim Fiyatı (TL)
1	07.005/K	Ocak konkasör arası ortalama 150 m den fazla mesafeye agregaların taşınması (M=0.2 km Ocak Taşı)	ton	1,28
2	07.005/K	Ocak konkasör arası ortalama 150 m den fazla mesafeye agregaların taşınması (M=50 km Sert Taş)	ton	24,02
3	07.005/K	Aşınma için gerekli agreganın plent sahasına taşınması (M=10 km ye kadar)	ton	9,07
4	10.330.5422	Asfalt Çimentosu (Penetrasyon Asfalt) (Kırıkkale)	kg	3,64
5	Piyasa araştırması	Modifiye edici katkı malzemesinin iş başına temini	ton	24.000
6	Piyasa araştırması	Katkı malzemesi olan elyaf bedeli	ton	7.125
7	07.005/K	Bitümlü yapıştırıcının temin yerinden iş başına kadar taşınması (M=10 km ye kadar)	ton	9,07
8	07.005/K	Bitümlü malzemenin temin yerinden depo tankına kadar taşınması (M=300 km)	ton	117,43
9	KGM/4358	Katı bitümlü malzemenin sarnıç veya tanklarda emiş derecesine kadar ısıtılması (Makine ile)	ton	65,75
10	07.005/K	Bitümlü Sıcak Karışımın (Aşınma) işbaşına taşınması (M=10 km ye kadar)	ton	9,07

3.6. SSB Yol Birim Fiyatları

SSB kaplamaya ait birim fiyatlar "T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, İnşaat Birim Fiyat Tarifleri Eki Fiyat Listesi, 2021'e göre belirlenmiştir (ÇŞB, 2021). Birim Fiyatlar, özetle SSB'nin üretilmesi, taşınması, serme ve sıkıştırmasının yapılması, sonrasında kür uygulanması, derz kesilmesi ve doldurulması işlemlerine aittir. Aşağıda özellik arz eden işlemlere ait birim fiyat hesaplama yöntemleri açıklanmıştır.

3.6.1. SSB yollarda kür uygulaması ve derz yapılması birim fiyatları

SSB karışımlarda s/ç oranı yaş beton karışımlara göre oldukça düşük olduğundan, arazi şartlarında SSB içerisindeki suyun buharlaşmadan dayanıma katkı sağlaması son derece önemlidir. Bu nedenle özellikle yüksek hava sıcaklıklarında kür uygulanması gerekli görülmektedir.

Kür yapılmasına ait maliyetler hesaplanırken ilgili teknik şartnamede belirtildiği şekilde, hesaplamalarda 0,35 kg/m^2 sarfiyat ile parafinik esaslı kür malzemesi kullanılması durumu esas alınmıştır (ÇŞB, 2020a).

SSB kaplamalarda enine ve boyuna derz açıklığı oranının 2 den fazla olmaması önerilmektedir. İl yolu platform genişliği 11 m olarak alınmıştır (KGM, 2005). Platform genişliğinin ortasından yol boyunca boyuna derz ve 6 m aralıklarla kontrollü enine derz oluşması durumuna göre maliyet hesaplamaları yapılmıştır.

Düşük trafikli köy yollarında derz kesilmekle birlikte herhangi bir derz dolgu işlemi yapılmamaktadır. Bu çalışmada, KGM yol ağında bulunan il yollarında SSB yapılması söz konusu olduğunda derzlerin dolgu malzemesiyle doldurulması hesaplamalara dâhil edilmiştir.

Bununla birlikte; Sıcak Uygulamalı Derz Sızdırmazlık Malzemeleri (TS EN 14188-1, 2006) rayiç pozu, KGM ve ÇŞB Birim Fiyat Listesinde henüz bulunmamaktadır. Bu malzemenin fiyatı piyasa fiyat araştırmaları sonucunda belirlenmiş olup, Çizelge 3.23'de verilmektedir. Santralde üretilen SSB'nin 15 km mesafeye taşınması maliyeti de hesaplamalara dâhil edilmiştir.

SSB yol yapımına ilişkin kullanılan birim fiyatlar yukarıdaki açıklamalar doğrultusunda Çizelge 3.23'de verilmektedir.

Çizelge 3.23. SSB yol birim fiyatları

Sıra No.	Poz No.	İşin adı	Ölçü Birimi	Birim Fiyatı (TL)
1	15.150.5001	Silindir ile sıkıştırılmış beton yollar için hazırlanan beton harcının temini, finişer ile serilmesi, silindirler ile sıkıştırılması	m^3	379,98
2	15.190.1008	Silindir ile sıkıştırılmış beton yollarda parafinik esaslı kür malzemesi ile kür yapılması	m^2	4,79
4	Piyasa araştırması	Sıcak uygulamalı derz sızdırmazlık malzemesi (TS EN 14188-1,2006)	kg	13,94
5	15.190.1011	Silindir ile sıkıştırılmış beton yollarda beton kalınlığının 1/3 - 1/4 ü oranında derz kesilmesi	m	2,75
6	KGM/07.005K	SSB taşıma maliyeti	m^3	26,81

3.6.2. SSB donatı miktarı ve maliyetleri

Çalışma kapsamında; 11 m genişliğindeki platformun iki şerit halinde serilmesi durumu göz önünde bulundurulduğundan, boyuna yöndeki şerit birleşimlerinde bağ demiri kullanılmıştır. 500 m de bir yapım derzlerinin yapılması durumuna göre de kayma demirleri kullanılmıştır. Bu durumda; bağ ve kayma demirlerinin zati bedeli, iş yerine taşınması, taşıma sonrası demirlerin projelerine göre kesilmesi, bükülmesi ve yerine yerleştirilmesi, demir zayiatı ve bağlantı telleri maliyetleri hesaplamalara ayrıca dâhil edilmiştir.

Donatı sıklıkları ve boyutları, KGM'nin ilgili yayınlarıyla uyumlu olarak belirlenmiş olup, değişen SSB plak kalınlıkları için miktarları ayrı ayrı hesaplanmıştır (Komut ve Kaşak, 2019).

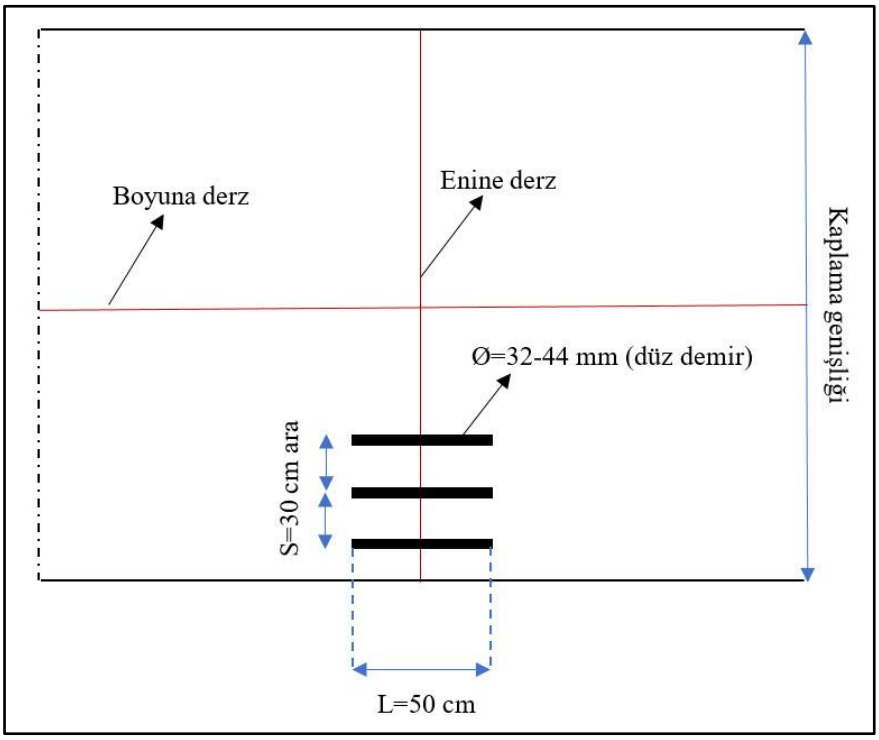
Enine inşaat derzlerine, değişen SSB plak kalınlığına göre belirlenen çaplarda, 50 cm uzunluğunda ve 30 cm aralıklarla kayma demirleri yerleştirilmesi durumuna göre donatı miktarı hesaplanmıştır (Şekil 3.2).

Komut ve Kaşak'a (2019) göre, kaplama kalınlığına bağlı olarak önerilen kayma demiri çapları aşağıda verilmektedir.

Kaplama kalınlığı $\leq$ 28 cm Önerilen donatı çapı: Ø 32 mm

28 cm < Kaplama kalınlığı ≤ 34 cm Önerilen donatı çapı: Ø 38 mm

35 cm ≤ Kaplama kalınlığı ≤ 40 cm Önerilen donatı çapı: Ø 44 mm



Şekil 3.2. Kayma demiri yerleşimi (Komut ve Kaşak, 2019)

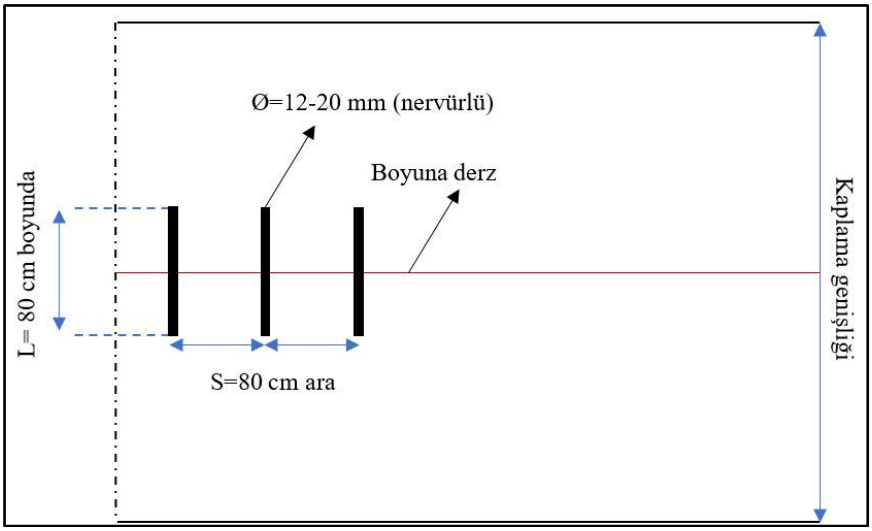
Boyuna inşaat derzlerine; değişen SSB plak kalınlığına göre belirlenen çaplarda, 80 cm uzunluğunda ve 80 cm aralıklarla bağ demirleri yerleştirilmesi durumuna göre hesaplar yapılmıştır (Şekil 3.3).

Bağ demirlerinin SSB plaklara sabitlenmesi işleminde epoksi esaslı yapıştırıcı kullanılmış ve ilgili birim fiyat listesindeki "Epoksi Esaslı (İki Bileşenli) Yapıştırıcı ve Tamir Harcı" pozu esas alınmıştır (ÇŞB, 2021).

Komut ve Kaşak'a (2019) göre, kaplama kalınlığına bağlı olarak önerilen bağ demiri çapları aşağıda verilmektedir.

Kaplama kalınlığı ≤ 30 cm Önerilen donatı çapı: Ø 12 – 14 mm

Kaplama kalınlığı > 30 cm Önerilen donatı çapı: Ø 16 – 20 mm



Şekil 3.3. Bağ demiri yerleşimi (Komut ve Kaşak, 2019)

Kayma ve bağ demirlerinin zati bedeli, iş yerine taşınması, taşıma sonrası donatıların projelerine göre kesilmesi bükülmesi ve yerine yerleştirilmesi, donatı zayiatı, bağlantı telleri maliyetleri hesaplanırken kullanılan birim fiyat analiz ve rayiç pozları Çizelge 3.24'de verilmektedir.

Çizelge 3.24. Donatı imalatına ilişkin birim fiyatlar

Donatıların taşınması				
Sıra No.	Poz No.	İşin adı	Ölçü birimi	Birim fiyatı (TL)
1	15.100.1004	1 ton her cins betonarme demiri, profil ve lama demiri ile sacların taşıtlara yükleme boşaltma ve istifi (Fabrikadan alınan malzemelerin yükleme bedeli düşülür.)	ton	16,73
Donatı kesilmesi bükülmesi ve yerine konulması				
Sıra No.	Poz No.	İşin adı	Ölçü birimi	Birim fiyatı (TL)
1	10.130.1704	Beton çelik çubuğu nervürlü φ8-12 mm zayiatı ve bağlantı teli dâhil	kg	4,79
2	10.130.1705	Beton çelik çubuğu nervürlü φ14-32 mm zayiatı ve bağlantı teli dâhil	kg	4,79
3	10.130.1703	Beton çelik çubuğu düz φ14-50 mm (S220) zayiatı dâhil	kg	4,50
4	19.100.1111	Demir kesme ve bükme makinası	saat	7,54
5	10.100.1019	Soğuk demirci ustası	saat	22,50
6	10.100.1047	Soğuk demirci usta yardımcısı	saat	16,75
7	10.100.1062	Düz işçi	saat	16,45
8	10.300.2155	Epoksi esaslı (iki bileşenli) yapıştırıcı ve tamir harcı	kg	29,00

3.7. Temel ve Alttemel Tabakaları Birim Fiyatları

BSK ve SSB yol üstyapı tasarımlarında kullanılan temel ve alttemel tabakaları birim fiyatları Çizelge 3.25'de verilmektedir.

Çizelge 3.25. Plentmiks temel ve alttemel tabakası birim fiyatları (KGM, 2021)

Sıra No.	Poz No.	İşin adı	Ölçü birimi	Birim fiyatı (TL)
1	6100/3	Plentmiks temel yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	ton	61,78
2	6100/3-1	Plentmiks alttemel yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	ton	54,31

3.7.1. Birim fiyata dâhil olmayan masraflar

Çizelge 3.25'de verilen pozların birim fiyat tarifleri incelendiğinde; birim fiyata dâhil olmayan masraflar adı altında, imalat için gerekli agrega ve suyun ocak-plent arası taşınması ile temel, alttemel malzemesinin serim yerine taşınması yer almaktadır (KGM, 2014). Bu maliyetlerin belirlenebilmesi için seçilen parametreler Çizelge 3.26'da detayları ile birlikte verilmiştir.

Çizelge 3.26. Temel ve altemel maliyet hesap parametreleri

Taşıma katsayısı	[2021]	427
Güçlük katsayısı	-	1
Temel, alttemel agregası ocak-plent arası taşıma mesafesi	km	10
Karışım suyunun plente taşıma mesafesi	km	1
Temel,alttemel malzemesi plent-serim yeri taşıma mesafesi	%	10
Sulama suyunun serim yeri taşıma mesafesi	t/m^3	10
Kuru agrega yüzdesi	%	0,957
Su yüzdesi	%	0,043

3.7.2. Temel ve alttemel birim fiyatları toplam maliyeti

Birim fiyata dâhil olmayan masraflarla birlikte plentmiks temel ve alttemel yapılması birim fiyatları Çizelge 3.27'de verilmiştir.

Çizelge 3.27. Plentmiks temel ve alttemel tabakası toplam birim fiyatları (KGM, 2021)

Sıra No.	Poz No.	İşin adı	Ölçü birimi	Birim fiyatı (TL)	Dâhil olmayan masraflar (TL)	Toplam birim fiyat (TL)
1	6100/3	Plentmiks temel yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	ton	61,78	17,98	79,76
2	6100/3-1	Plentmiks alttemel yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	ton	54,31	17,98	72,29

3.8. Koruyucu Tabaka Maliyetleri

Koruyucu tabakanın oluşturulması için; üstyapı tabanında zayıf zemin niteliğinde kullanılması uygun olamayan zeminin kazınması, taşınması, ariyet ocağından seçme malzemenin getirilmesi, serilmesi, sulanması ve sıkıştırılması gerekmektedir.

Ariyet ocağından getirilen malzemenin %50 si yumuşak kaya ve %50 si küskülük olması ve malzeme yoğunluğunun 1,90 t/m^3 olması durumuna göre maliyet hesaplamaları yapılmıştır. Çizelge 3.28'de 1 m^3 koruyucu tabaka yapılması birim fiyatları detaylarıyla birlikte verilmektedir.

Çizelge 3.28. Koruyucu tabaka yapılması birim fiyatı

Sıra No.	Poz No.	İşin adı	Ölçü birimi	Miktarı	Birim fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	15.005	Zayıf zeminin (bitkisel toprak vs.) kazılması ve kullanılması (100 m ye taşıma dâhil)	m^3	1,000	3,21	3,21
2	15.006/B	Ekskavatörle her cins küskülüğün kazılması ve kullanılması (Ariyet ocağından getirilecek veya depoya gidecek kazılarda) (100 m ye taşıma dâhil)	m^3	0,500	6,66	3,33
3	15.010/B	Ekskavatörle yumuşak kayanın kazılması ve kullanılması (Ariyet ocağından getirilecek veya depoya gidecek kazılarda)	m^3	0,500	14,61	7,31
4	15.047	Arazöz ile sulama	ton	0,100	15,25	1,53
5	15.052/4	Titreşimli silindirle sıkıştırma yapılması (9-11 ton -11 ton dâhil statik ağırlık ve 18-22 ton dinamik kuvvette titreşimli silindir + paletli traktör takriben 66-86 HP)	sa	0,010	305,53	3,06
6	07.005/K-1	Zayıf zemin malzemesinin taşınması (M=3,6 Km, A=1)	m^3	1,000	9,07	9,07
7	07.005/K-1	Koruyucu tabaka için gerekli seçme malzemenin serim yerine taşınması (M=7,6 Km, A=1)	m^3	1,000	13,99	13,99
8	07.005/K	Koruyucu tabaka için gerekli sulama suyunun serim yerine taşınması (M=10 Km, A=1)	ton	0,059	9,07	0,53
				Genel toplam [TL/m^3] :		42,02

3.9. Reglaj Yapılması Maliyeti

Yol üstyapısı teşkil edilmeden önce, üstyapı tabanının reglajının yapılarak düzenlenmesi gerekmektedir. Reglaj çalışmalarında kullanılan greyderin bıçak genişliği 3,70 m alınarak reglaj yapılması birim fiyatları belirlenmiş olup, Çizelge 3.29'da verilmiştir.

Çizelge 3.29. Reglaj Maliyetleri

Sıra No.	Poz No.	İşin adı	Ölçü birimi	Birim fiyatı (TL)
1	15.044	Makine ile her cins toprak zeminde reglaj	km	4.353,75
2	15.044_Özel	Makine ile her cins toprak zeminde 1 m^2 reglaj yapılması	m^2	1,18

3.10. Ekonomik Karşılaştırma ve Değerlendirmeler

SSB yol üstyapılarının Türkiye için önemini ortaya koymak amacıyla yapılan bu çalışmada, aynı proje süresi, trafik hacmi ve zemin koşullarında; BSK ve SSB yol üstyapılarının tasarımları yapılmış, üstyapıyı oluşturan her tabakanın malzeme ve yapım birim fiyatları detaylı olarak hesaplamıştır. Bu hesaplamaların tamamında ilgili kurumların güncel yayınları kullanılmıştır. Bu bölümde KGM'ye bağlı 1 km il yolu üstyapısının BSK ve SSB yapılması maliyetleri hesaplanarak birbiriyle kıyaslanmıştır.

3.10.3. İl yolu geometrik özellikleri

Maliyet hesaplarına esas il yolu geometrik özellikleri, Karayolu Tasarım El Kitabı'nda bulunan karayolları geometrik standartları dikkate alınarak belirlenmiş olup, Çizelge 3.30'da verilmiştir (KGM, 2005).

Çizelge 3.30. İl yolu geometri özellikleri

Özellik	Değer
Yön sayısı	2
Aynı yöndeki şerit sayısı	1
Şerit genişliği [m]	3,5
İç emniyet şeridi genişliği [m]	0
Dış emniyet şeridi genişliği [m]	2
Platform genişliği [m]	11
Yol uzunluğu [m]	1.000
Yol alanı [m^2]	11.000

3.10.4. BSK ve SSB maliyet kıyaslaması

BSK ve SSB yol üstyapıları için; iki proje süresi, üç trafik hacmi ve yedi zemin dayanım koşuluna bağlı olarak toplam 84 farklı üstyapı tasarımı yapılmış olup, her bir tasarım için maliyetler ayrı ayrı hesaplanmıştır. Aynı tasarım koşulları (yol sınıfı, zemin koşulları ve trafik yükü) altında yapılan tasarımlara esas, BSK ve SSB yol üstyapı maliyetleri kıyaslanırken, "ekonomiklik oranı" faktörü kullanılmıştır.

Ekonomiklik oranı, ilgili SSB üstyapının BSK üstyapıya kıyasla yüzdesel olarak ekonomik olma oranıdır ve Eşitlik 3.2 yardımı ile hesaplanmaktadır. Maliyetler 1 km uzunluğunda ve 11 m platform genişliğinde tek yol (bölünmüş olmayan) maliyetleridir.

$$Ekonomiklik\ Oranı\ (\%) = \frac{BSK\ Maliyeti(TL) - SSB\ Maliyeti\ (TL)}{BSK\ Maliyeti(TL)} \times 100 \qquad (3.2)$$

Çizelge 3.31'de 20 yıl proje süresi için BSK ve SSB maliyet karşılaştırılması verilmektedir.

Çizelge 3.31. 20 yıl proje süresi için maliyet karşılaştırması

Yol sınıfı	Tasarım parametreleri			SSB maliyet [TL]	BSK maliyet [TL]	Maliyet karşılaştırması	
	Güvenilirlik	$T_{8.2}$	CBR [%]			Ekonomiklik oranı [%]	Ortalama ekonomiklik oranı [%]
İL YOLU	R% = %85 - 70	245.013.820	1	2.053.746,20	3.601.972,35	43	41
			2	1.947.863,23	3.395.892,93	43	
			4	1.896.182,26	3.289.169,62	42	
			6	1.845.341,63	3.067.170,23	40	
			8	1.757.621,13	3.026.414,77	42	
			15	1.727.420,23	2.792.838,86	38	
			50	1.664.730,49	2.792.838,86	40	
	R% = %85 - 70	67.500.000	1	1.918.969,25	2.916.917,11	34	34
			2	1.813.926,62	2.779.836,49	35	
			4	1.762.665,82	2.673.953,52	34	
			6	1.737.350,55	2.596.747,19	33	
			8	1.646.426,92	2.581.517,09	36	
			15	1.624.005,04	2.415.889,55	33	
			50	1.569.551,91	2.415.889,55	35	
	R% = %85 - 70	6.000.616	1	1.740.051,83	2.328.051,08	25	25
			2	1.635.009,20	2.193.071,31	25	
			4	1.583.748,40	2.114.604,47	25	
			6	1.558.433,13	2.038.028,39	24	
			8	1.464.763,96	1.925.959,46	24	
			15	1.448.748,33	1.925.959,46	25	
			50	1.402.074,22	1.925.959,46	27	

20 yıl proje süresi boyunca yol üstyapısı üzerinden geçecek olan yüksek yoğunluklu standart dingil yükü tekerrür sayısı altında ve farklı taban zemini dayanımları dikkate alınarak yapılan maliyet hesaplarında, SSB yol üstyapıların, BSK yol üstyapılara göre %38-%43 arasında değişen oranlarda ve ortalama %41 oranında daha ekonomik inşa edilebildiği görülmektedir (Çizelge 3.31).

SSB üstyapılar kendi içerisinde değerlendirildiğinde, taban zemini dayanımı arttıkça maliyetleri azalma eğilimindedir. BSK üstyapılarda ise genel eğilim bu yönde olmakla beraber, CBR değeri %6 ve %8'de eğilim değişmektedir. Bu durum CBR %6 olan taban zemininin kazılarak, 25 cm kalınlığında koruyucu tabaka ve üzerine 15 cm alttemel kullanılırken, CBR %8 olan taban zemininde koruyucu tabaka kullanılmazken, alttemel kalınlığı 20 cm olmasından kaynaklanmaktadır.

20 yıl proje süresi ve orta yoğunlukta trafik hacmi altında, zayıf, orta ve yüksek dayanımlı taban zeminlerinde SSB yol üstyapıları, BSK yol üstyapılarına göre %33-%36 arasında değişen oranlarda ve ortalama %34 daha ekonomik görülmektedir (Çizelge 3.31).

20 yıl proje süresi ve düşük yoğunlukta trafik hacmi altında, zayıf, orta ve yüksek dayanımlı taban zeminlerinde SSB yol üstyapıları, BSK yol üstyapılarına göre %24-27 arasında değişen oranlarda ve ortalama %25 daha ekonomiktir (Çizelge 3.31).

Yüksek ve orta yoğunluktaki trafik hacimlerinde, taban zemini dayanım değeri arttıkça ekonomiklik oranı azalma eğiliminde iken, düşük yoğunluklu trafik altında bu durum değişmektedir. Düşük yoğunluklu trafik ve zayıf dayanımlı zeminlerde ortalama ekonomiklik oranı %24,7 iken, orta ve yüksek dayanımlı taban zeminleri için bu oran %25,3'e çıkmaktadır. Bu durum esnek üstyapıların davranışı ile ilgilidir. Esnek üstyapılarda BSK tabakaları (aşınma, binder ve bitümlü temel) çekme gerilmeleri aldıklarından, düşük trafik hacimleri altında belirli tabaka kalınlıkları altında tasarlanıp, yapılamamaktadır.

Proje süresinin 20 yıldan 30 yıla çıkartılması yol üstyapısı üzerinden daha fazla standart dingil yükünün geçmesi anlamına gelmektedir. Artan proje süresi, trafik yükü altında ekonomiklik oranları Çizelge 3.32'de verilmektedir.

Çizelge 3.32. 30 yıl proje süresi için maliyet karşılaştırması

Yol Sınıfı	Tasarım parametreleri			SSB maliyet [TL]	BSK maliyet [TL]	Maliyet karşılaştırması	
	Güvenilirlik	$T_{8.2}$	CBR [%]			Ekonomiklik oranı [%]	Ortalama ekonomiklik Oranı [%]
İL YOLU	R% = %85 - 70	469.450.073	1	2.108.199,33	4.003.133,44	47	46
			2	2.002.316,36	3.698.177,98	46	
			4	1.950.635,39	3.500.624,70	44	
			6	1.899.794,76	3.422.788,11	44	
			8	1.813.447,02	3.329.355,93	46	
			15	1.780.043,00	3.231.676,75	45	
			50	1.711.404,60	3.231.676,75	47	
	R% = %85 - 70	130.034.838	1	1.999.293,07	3.316.673,52	40	39
			2	1.893.410,10	3.086.781,99	39	
			4	1.841.729,13	2.980.058,69	38	
			6	1.790.888,50	2.902.222,10	38	
			8	1.701.795,23	2.763.787,47	38	
			15	1.675.255,05	2.763.787,47	39	
			50	1.617.141,20	2.763.787,47	41	
	R% = %85 - 70	11.655.197	1	1.787.641,11	2.600.865,20	31	29
			2	1.682.598,49	2.345.500,19	28	
			4	1.631.337,69	2.267.033,35	28	
			6	1.606.022,42	2.190.457,27	27	
			8	1.513.726,02	2.078.388,34	27	
			15	1.496.337,62	2.078.388,34	28	
			50	1.448.748,33	2.078.388,34	30	

Çizelge 3.32'de görüleceği üzere; 30 yıl proje süresi boyunca yol üstyapısı üzerinden geçecek olan yüksek yoğunluklu trafik yükü altında ve farklı taban zemini dayanımları dikkate alınarak yapılan maliyet hesaplarında, SSB yol üstyapıları ekonomiklik oranı %44-%47 arasında değişirken, ortalama %46'dır.

Orta yoğunlukta trafik yükü altında ve farklı taban zemini dayanımlarında SSB yol üstyapıları ekonomiklik oranı %38-%41 arasında değişmekte olup, ortalama %39'dur.

Düşük yoğunlukta trafik yükünde, zayıf, orta ve yüksek dayanımlı taban zeminleri üzerine yapılan SSB yol üstyapıları, BSK üstyapılara göre ortalama %29 daha ekonomik görülmektedir.

30 yıl proje süresi boyunca tüm trafik hacimleri ve zemin sınıfları altında ortalama ekonomiklik oranı %38'dir. Bu oran 20 yıl proje süresi için hesaplarda %33 olup, proje

süresi arttıkça SSB üstyapıların BSK üstyapılara göre genel olarak daha ekonomik olduğu görülmüştür.

KGM tarafından yayımlanan esnek ve rijit üstyapılar projelendirme rehberlerinde esnek üstyapılar için %70 olan güvenilirlik katsayısı, rijit üstyapılar için %85 kullanılarak yol sınıfı proje süresi ortalama ekonomiklik oranları il yolu için 20 ve 30 yıl proje süresine göre Çizelge 3.33'de özetlenmiştir. Her iki üstyapı türü içinde aynı güvenilirlik katsayısının alınması durumunda ekonomik oranı daha da artacaktır.

Çizelge 3.33. Proje süreleri ortalama ekonomiklik oranları

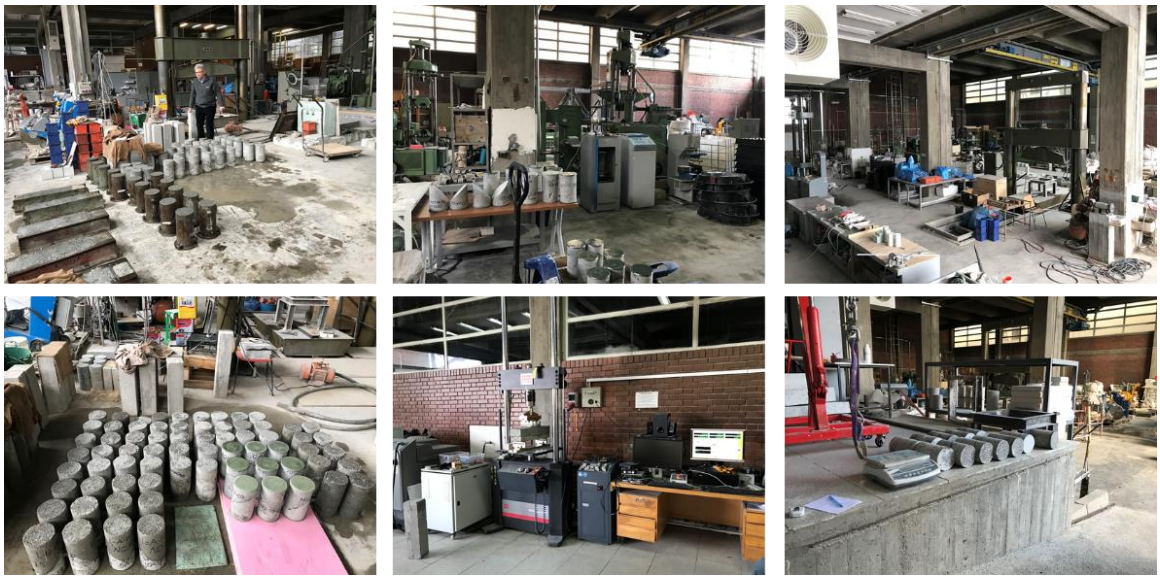
Yol sınıfı / Proje süresi	Esnek (BSK) üstyapı güvenilirlik değeri [%]	Rijit (SSB) üstyapı güvenilirlik değeri [%]	Ortalama ekonomiklik oranı [%]
İl Yolu / 20 Yıl	70	85	33,3
İl Yolu / 30 Yıl	70	85	38,0

4. LABORATUVAR ÇALIŞMALARI

Silindirle sıkıştırılmış iki tabakalı beton kaplamaların arasındaki bağ dayanımının incelenmesi amacıyla, ODTÜ Yapı Malzemesi Laboratuvarında bir dizi deneyler gerçekleştirilmiştir (Resim 4.1). İlk olarak, malzeme seçimi sonrasında karışım tasarımı yapılarak kullanılacak beton bileşen miktarları belirlenmiştir. Belirlenen beton tasarımı kullanılarak iki tabakalı ve altı farklı ara yüzey elemanlı silindir numuneler üzerinde serbest basınç deneyleri yürütülmüştür. En iyi performansı veren ara yüzey tasarımı kullanılarak hazırlanan kiriş numuneleri üzerinde kiriş eğilme deneyleri yürütülmüştür.

SSB karışımı oluşturan malzemeler belirlenirken, ülkemizde yaygın kullanılan agrega ve çimento türlerinin seçilmesine, karışım tasarımı yapılırken kabul görmüş tasarım metotları (Şengün ve diğerleri, 2019) yanında su içeriği basınç dayanımı ilişkisi de göz önünde bulundurulmuştur.

Ara yüzey elemanlarının türü, kullanım miktar ve uygulama şekli, iki tabaka SSB'nin performansını doğrudan etkilediğinden, ara yüzey elemanları kullanım miktar ve uygulama prosedürlerine titizlikle riayet edilmiştir.



Resim 4.1. Deneysel çalışmaların yapıldığı sırada, ODTÜ yapı malzemesi laboratuvarı genel görünümü

Bu bölüm kapsamında; laboratuvar deneylerinde kullanılan malzemeler, karışım tasarımları, deney numunelerinin hazırlama prosedürleri, eğimli kesme deneyleri, kiriş eğilme deneyleri ve basınçlı su işleme derinliği deneyleri anlatılacaktır.

4.1. Malzemeler

Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) karışımlar içerisinde, yaygın kullanılan yaş betonlara benzer şekilde, agrega, çimento, su ve gerekirse katkılar kullanılmakla birlikte, s/ç oranının düşük olması, daha ince gradasyonlu agrega, daha az çimento kullanımı ve sıfır çökme olması ile yaş beton karışımlardan farklılık göstermektedir.

4.1.1. Agrega

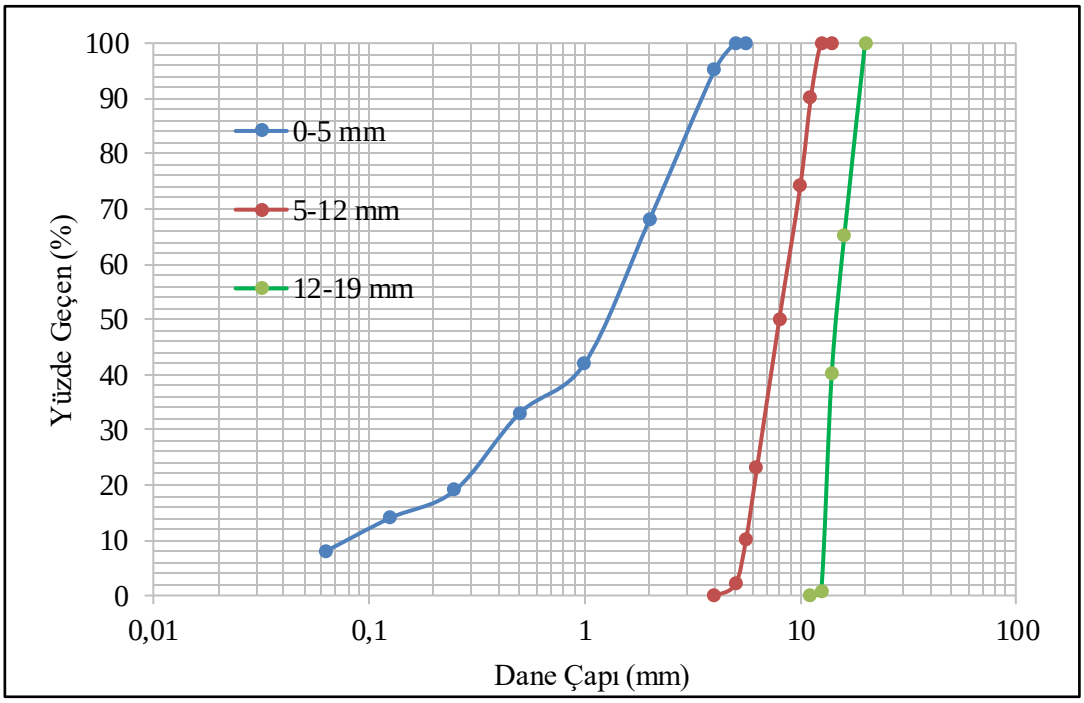
Deneysel çalışmalar kapsamında 0-5 mm, 5-12 mm ve 12-19 mm boyutlarında üç agrega grubu kullanılmış olup, Çizelge 4.1 ve Çizelge 4.2'de agregaların fiziksel özellikleri ve Şekil 4.1'de gradasyonları verilmiştir. Agrega menşei kireçtaşı olup, Ankara İli, Çankaya İlçesi Yakupabdal taş ocağından temin edilmiştir.

Çizelge 4.1. İri agrega fiziksel özellikleri

Özellik	Standart	Değer
Parçalanma direncinin tayini (Los Angeles Deneyi), %	TS EN 1097-2	29,8
Magnezyum sülfat kütlece kayıp değeri (don mukavemeti), %	TS EN 1367-2	0,24
Yassılık indeksi, %	TS 9582 EN 933-3	5
Su emme, iri agrega (5-12 mm), %	TS EN 1097-6	0,28
Su emme, iri agrega (12-19 mm), %	TS EN 1097-6	0,22
Doygun yüzey kuru birim hacim ağırlık, iri agrega (5-12 mm), g/cm³	TS EN 1097-6	2,678
Doygun yüzey kuru birim hacim ağırlık, iri agrega (12-19 mm), g/cm³	TS EN 1097-6	2,701

Çizelge 4.2. İnce agrega fiziksel özellikleri

Özellik	Standart	Değer
Metilen mavisi deneyi	TS EN 933-9	1,0
0,0063 mm elekten geçen çok ince malzeme muhtevası, %	TS EN 933-1	1,5
Organik madde (%3'lük NaOH ile)	TS EN 1744-1	yok
Su emme (0-5 mm), %	TS EN 1097-6	1,75
Doygun yüzey kuru birim hacim ağırlık (0-5 mm), g/cm³	TS EN 1097-6	2,64



Şekil 4.1. Agrega gruplarına ait dane dağılım eğrileri

4.1.2. Çimento

Tüm SSB karışımlarında, TS EN 197-1 standardına uygun üretilen, CEM I 42.5 R Portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentonun kimyasal özellikleri Çizelge 4.3'de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Çimento kimyasal ve fiziksel özellikleri

Özellik	Standart	Değer
MgO, %	TS EN 196-2	1,53
$SO_{3,}$ %	TS EN 196-2	3,06
Cl, %	TS EN 196-2	0,03
Na_2O, %	TS EN 196-2	0,30
K_2O, %	TS EN 196-2	0,89
Kızdırma kaybı, %	TS EN 196-2	4,81
Çözünmeyen kalıntı miktarı, %	TS EN 196-2	0,64
Özgül ağırlık, g/cm³	TS EN 197-1	3,12
İncelik (32 mikron), %	TS EN 196-6	12,4
Hacim genleşmesi, mm	TS EN 196-3	1
Priz başlangıcı, dakika	TS EN 196-3	173
Priz sonu, dakika	TS EN 196-3	225

Çimentonun 2, 7 ve 28 günlük dayanım değerleri Çizelge 4.4'de verilmiştir.

Çizelge 4.4. Çimento dayanım özellikleri

Özellik	Standart	Değer
Erken dayanım, 2 günlük, MPa	TS EN 197-1	28,8
Erken dayanım, 7 günlük, MPa	TS EN 197-1	41,4
Standart dayanım, 28 gün, MPa	TS EN 197-1	48,3

4.1.3. Su

SSB üretiminde kullanılan su TS EN 1008 standardına uygun içme suyu niteliğindedir.

4.2. Karışım Tasarımı

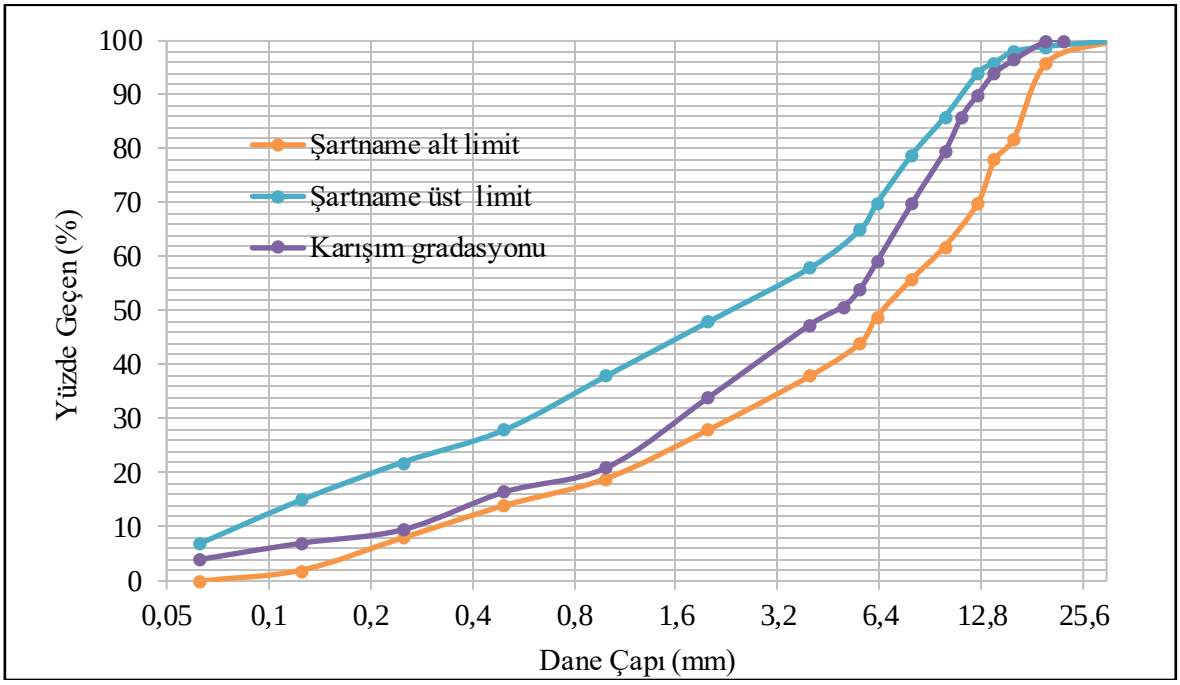
Doğru bir SSB karışım tasarımı, SSB'nin çevre ve ilkim koşulları ile trafik yükleri altında uzun ömürlü olması için en önemli kriterlerden biridir. Karışım tasarımının ilk aşaması SSB için uygun gradasyonda agreganın oluşturulmasıdır. Çalışma kapsamında, üç farklı agrega

grubu kullanılarak elde edilen ideal karışım gradasyonu, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından 2 Mart 2020 gün ve 31066 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan "Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yol Genel Teknik Şartnamesi" Kısım 20.03.01 kriterlerine (ÇŞB, 2020a) göre belirlenmiş olup, Çizelge 4.5'de verilmiştir.

Çizelge 4.5. SSB tabakası gradasyon limitleri (TS 706 EN 12620+A1 Elek serisi ile)

Dane çapı (mm)	Agrega			Yüzde geçen (%)		
	0-5 mm	5-12 mm	12-19 mm	Şartname		Karışım
	%50	%40	%10	Alt limit	Üst limit	
31.5	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	96	99	100
16	100	100	65	82	98	96,5
14	100	100	40	78	96	94
12.5	100	100	0,5	70	94	90
10	100	74	0	62	86	79,6
8	100	50	0	56	79	70
6.3	100	23	0	49	70	59,2
5.6	100	10	0	44	65	54
4	95	0	0	38	58	47,5
2	68	0	0	28	48	34
1	42	0	0	19	38	21
0.5	33	0	0	14	28	16,5
0.25	19	0	0	8	22	9,5
0.125	14	0	0	2	15	7
0.063	8	0	0	0	7	4

Deneysel çalışma için en uygun agrega gradasyonu; agrega grubundan (0-5 mm) %50, (5-12 mm) %40 ve (12-19 mm) %10 kullanılarak belirlenmiştir. Şekil 4.2'de karışım gradasyonu, şartname limitleriyle birlikte verilmektedir.



Şekil 4.2. SSB karışımı agrega gradasyonu

SSB tasarımında Şekil 4.2'de verilen agrega gradasyonu ile 300 kg/m³ çimento dozajı ve %4 %4,5, %5, %5,5 ve %6 su içeriklerinde beş farklı tasarım yapılmıştır. Çizelge 4.6'da 1 m³ SSB için farklı su içeriklerinde kullanılan malzeme miktarları verilmiştir.

Çizelge 4.6. 1 m³ SSB için bileşen miktarları

Beton bileşeni	Miktar (kg)				
	%4	%4,5	%5	%5,5	%6
Çimento	300	300	300	300	300
Su	98	109	120	130	140
İnce agrega (0-5 mm)	1061	1046	1032	1018	1005
İri agrega (5-12 mm)	873	862	850	839	828
İri agrega (12-19 mm)	219	216	213	210	207
Teorik taze yoğunluk, kg/m³	2551	2533	2515	2497	2480

Beton, 350 dm³ kapasiteli tamburlu bir karıştırıcı kullanılarak hazırlanmıştır. SSB üretiminde dikkat edilmesi gereken önemli konulardan biri, karışımın s/ç oranın düşük olması nedeniyle, geleneksel taze beton karışımlara göre daha fazla karıştırma süresi gerektirmesidir. Aksi halde homojen bir karışım elde etmek mümkün olmamaktadır.

Karıştırıcıda beton hazırlanırken; ilk olarak agregalar ilave edilmiş ve 1 dakika karıştırıldıktan sonra çimento ilave edilerek 2 dakika daha karıştırılmıştır. Daha sonra su ilave edilerek 5 dakika daha karıştırılarak beton karışımı hazırlanmıştır (Resim 4.2).



Resim 4.2. SSB karışımın tamburlu karıştırıcıda hazırlanması



Resim 4.3. SSB'nin döküm yerinde harmanlanarak homojen hale getirilmesi

SSB karışımların su içeriği oldukça hassas olduğundan karıştırıcının temiz ve hafif nemli olması ile SSB'nin döküleceği yüzeyin nemli olmasına dikkat edilmiştir. Dökülen SSB kürekle harmanlanarak homojen hale getirilmiştir (Resim 4.3).

4.2.1. Sıkıştırma yöntemi

Numunelerin sıkıştırması, (ASTM C1435M-20, 2020) standardına uygun şekilde 9,78 kg ağırlığında (sıkıştırma plakası ve şaft hariç) titreşimli tokmak kullanılmıştır. Bu yöntemle numune hazırlanırken, 15x30 cm silindir çelik kalıplar kullanılmış, numuneler dört tabakada sıkıştırılmıştır. Standart, titreşimli tokmak uygulamasının numunenin etrafında bir harç halkası göründüğünde sonlandırılması gerektiğini veya böyle bir harç halkası oluşmaması durumunda maksimum 20 saniye bekletilmesi gerektiğini belirtmektedir. SSB karışımları hazırlanırken, özellikle harç halkasının tam olarak gözlenemediği karışımlarda, titreşimli tokmak 20 saniye süre ile her tabakaya uygulanmıştır (Resim 4.4). Her su içeriğinde en az altı adet 15x30 cm silindirik numuneler hazırlanarak taze yaş yoğunlukları belirlenmiştir (Şekil 4.3).

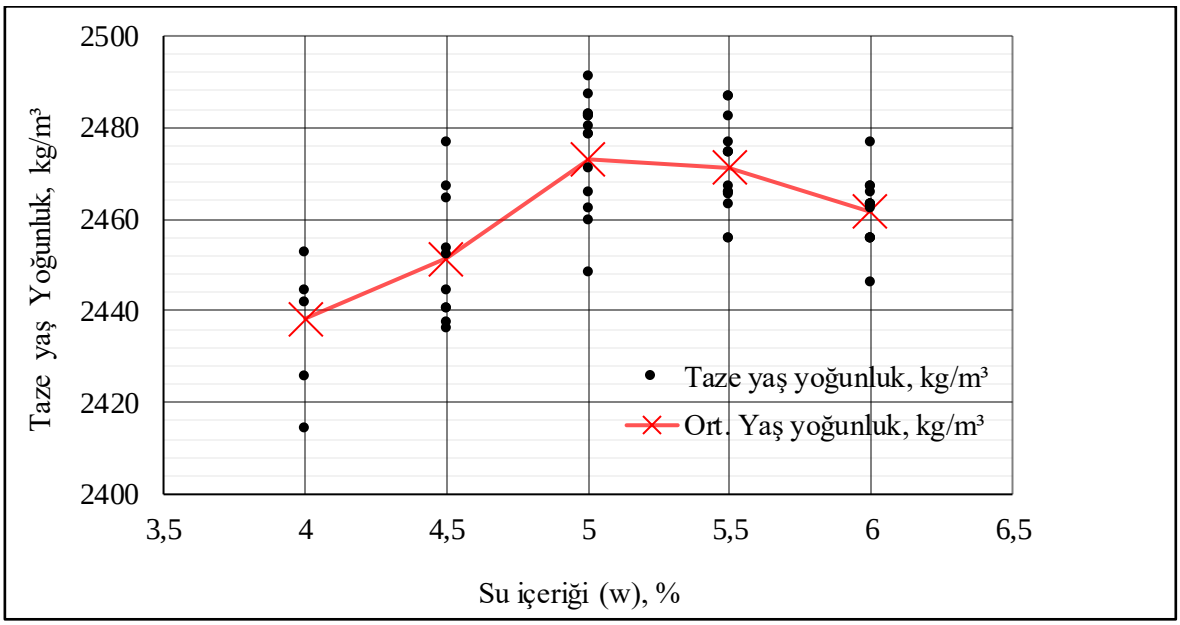


Resim 4.4. SSB numunelerinin titreşimli tokmak ile sıkıştırılması (ASTM C1435M-20, 2020)

Şekil 4.3'de %4, %4,5, %5, %5,5 ve %6 su içeriklerinde hazırlanan numunelerin tek tek ve ortalama taze yaş birim hacim ağırlıkları görülmektedir. SSB karışımlarda tasarım aşamasında taze yaş yoğunluk değerlerinin dikkate alınması, SSB'nin uygulama aşamasındaki sıkışma kontrol deneyleri için gerekli görülmektedir. Bununla birlikte SSB nin

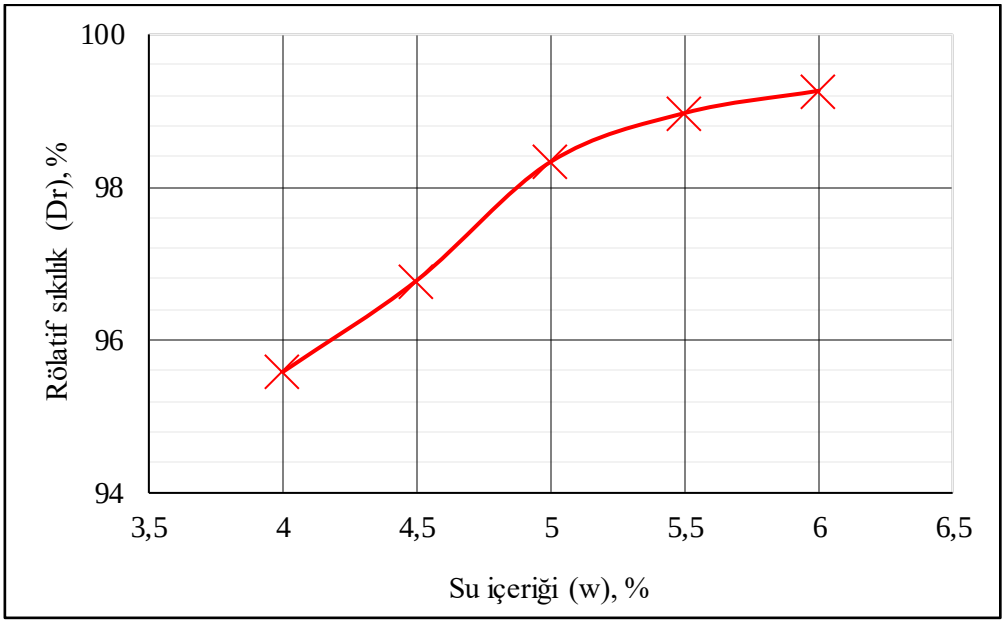
sertleşme aşamasında, çimentonun zaman içerisinde hidratasyonu nedeni ile karışım su içeriğinin değişkenlik göstereceği bilinmektedir.

Deneyler sonucunda maksimum ortalama taze yaş yoğunluk değeri 2.473,1 kg/m³ ve optimum su içeriği %5 olarak belirlenmiştir. Aynı su içeriğindeki teorik yaş yoğunluk değeri 2.515 kg/m³ değerinin tasarımda %98,3'üne ulaşılmıştır. Su içeriği arttıkça bu oranın yükseldiği gözlenmiştir.



Şekil 4.3. Taze yaş yoğunluk, su içeriği ilişkisi

Bu çalışmada, rölatif sıkılık, D_f, (%), SSB numuneleri taze yaş yoğunluğunun, teorik taze yoğunluğuna (havasız) oranı ile belirlenmiştir. Şekil 4.4'de farklı su içeriklerindeki karışımların ortalama rölatif sıkılığı değerlendirilmiş olup, aynı sıkıştırma enerjisi ile hazırlanan numunelerde, su içeriği arttıkça rölatif sıkılığın arttığı görülmektedir. Karışım içerisindeki boşluğun azalması dayanım değerlerini de arttırmaktadır. Bununla birlikte yüksek su içeriklerinde arazide silindir altında ötelenmeler, yığılmalar vb. yüzey kusurlarının oluştuğu bilinmektedir. Bu nedenle SSB karışımların optimum su içeriği arazi koşullarına göre de değerlendirilmelidir. Karışım işlenebilir ve aynı zamanda yük altında yüzey kusurları oluşturmayacak su içeriğine sahip olmalıdır.



Şekil 4.4. Rölatif sıkılık - su içeriği ilişkisi

SSB karışımların kıvamı arazi uygulaması aşamasında son derece önemlidir. SSB beton santralinde üretilmekte, kamyonlarla taşınmakta, asfalt finişerleriyle serilmekte ve silindirlerle sıkıştırılmaktadır. Karışım gereğinden düşük su içeriğine sahip olduğunda istenilen yoğunluk elde edilememekte, karışımda istenmeyen boşluklar oluşmaktadır. Bu durum atmosferik şartlara sürekli maruz kalan yol betonunda, özellikle donma ve çözülmenin etkili olduğu iklimlerde yapısal sorunlara neden olmaktadır. Yüksek su içeriklerinde ise silindir altında SSB yayılmakta, istenmeyen yüzey kusurları (ötelenme, ondülasyon vb.) oluşmaktadır. Bu nedenlerle karışımın optimum su içeriği, taze yaş yoğunluk ilişkisi yanında kıvamı da göz önünde bulundurulmalıdır. SSB karışımlarda kıvam tayini Vebe deneyi ile belirlenmektedir.

4.2.2. Vebe deneyi

Farklı su içeriklerinde (%4, %4,5, %5, %5,5, %6) hazırlanan SSB karışımların kıvamını belirlemek için ASTM C1170M-14, 2020 standardına uygun olarak Vebe deneyi gerçekleştirildi. Standard, SSB kıvam deneyi için, iki yöntem (Yöntem A ve Yöntem B) tanımlamaktadır. Yöntem A'da 22,7 kg kütlesinde ön yükleme plağı kullanılmakta olup, katı ve çok kuru betonlar için önerilmektedir. Yöntem B'de ise, 12,5 kg kütlesinde ön yükleme plağı kullanılır ve katı-çok katı ancak çok kuru olmayan betonlar için uygulanmalıdır. Tüm karışımların Vebe süresi tayini için, literatürde de çoğunlukla tercih edilmesi (Şengün ve

diğerleri, 2019) ve hazırlanan karışımlara uygun olması nedeniyle Yöntem A kullanılmıştır (Resim 4.5).



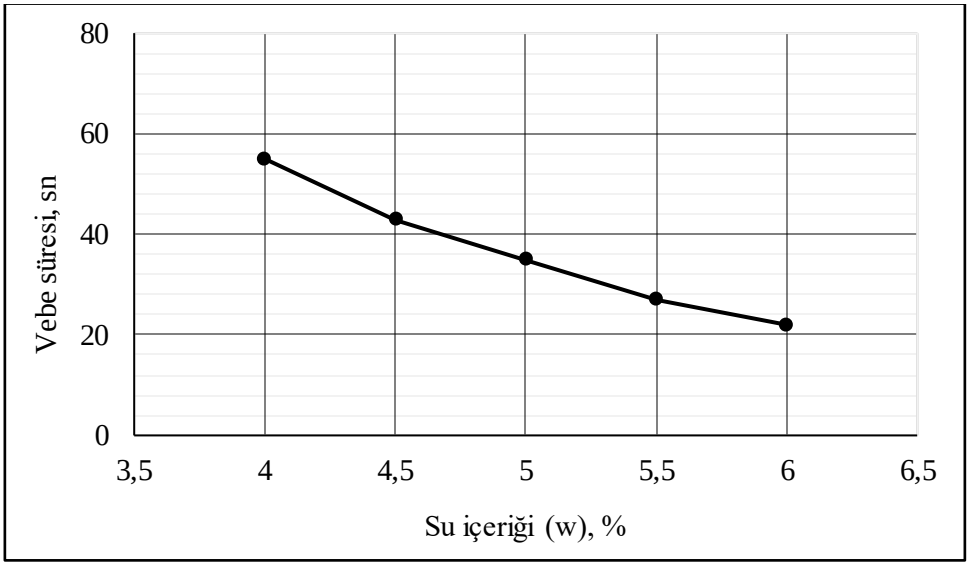
Resim 4.5. Vebe deney düzeneği

Vebe süresi tayini için 22,7 kg ağırlık ve titreşim altında numunenin etrafında bir harç halkası gözlendiği süre kayıt altına alınmıştır. %4 su içeriğindeki karışımlarda tam bir harç tabakası gözlemlemekte zorluk yaşanmıştır. Bu tip durumlarda kısmi halka oluşumu görünmesiyle Vebe süresi belirlenmiştir (Resim 4.6).



Resim 4.6. Vebe deneyi kısmi harç halkası oluşumu

Farklı su içeriklerinde hazırlanan karışımların Vebe süreleri Şekil 4.5'de verilmiştir. Su içeriği arttıkça Vebe süreleri azalmış olup, karışımların kıvamı ve işlenebilirliği artmıştır. %4 su içeriğinde Vebe süresi 55 s iken %6 su içeriğinde 22 s olarak kaydedilmiştir.



Şekil 4.5. Farklı su içeriğinde hazırlanan karışımların Vebe süreleri

Şengün ve diğerleri (2019), ideal SSB karışımlarının %5-6 su oranları, 30±10 saniye Vebe süreleri ile %96'dan daha yüksek sıkışma oranlarında elde edildiğini belirtmektedir. Benzer şekilde, bu çalışmada %4,5-%5,5 su içeriklerinde, SSB yapım şartlarına uygun kıvamın elde edildiğini göstermiştir.

4.2.3. Su içeriği basınç dayanımı ilişkisi

Tasarım aşamasında, SSB karışımların dayanım özellikleri de incelenmiştir. Bu amaçla; tüm su içeriklerinde 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım testleri, (ASTM C39M-18, 2020) standardına uygun olarak yapılmıştır.

Sıkıştırma işlemi tamamlanan deney numuneleri kalıptan 24 saat sonra çıkartılmış ve laboratuvar ortamında telis bezi ile sarılarak sürekli ıslak tutulmuştur. Deney öncesi, taş kesme makinası ile numunelerin alt ve üst kısımlarından yaklaşık 1 cm kesilmiş ve sonrasında kükürt başlık yapılmıştır (Resim 4.7).

Kükürt başlıklama öncesinde, başlıklama yapılacak yüzeylerinin kuru ve temiz olmasına dikkat edilmiş, mümkün olduğunca ince, 5 mm'yi geçmeyecek şekilde başlık oluşturulmuştur. Başlık yapıldıktan en az 30 dakika beklendikten sonra numuneler basınç dayanımı deneyine tabi tutulmuştur.



Resim 4.7. Bazı numunelerin kür, kesim ve kükürt başlık aşamaları

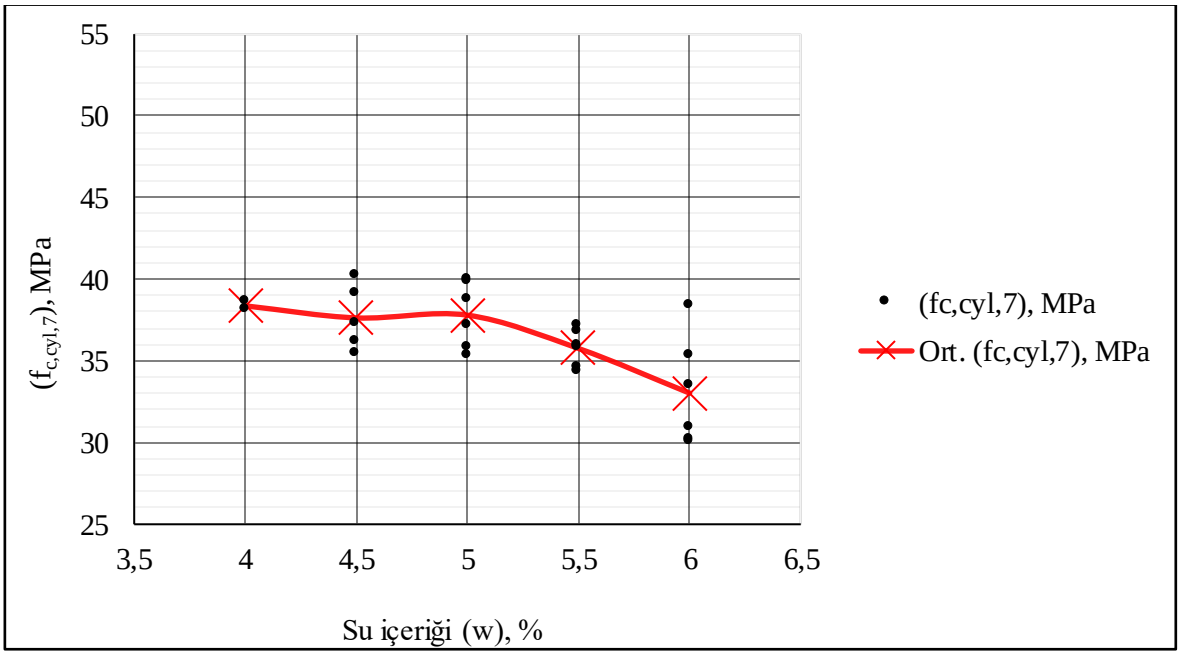
Basınç dayanımı deney cihazı yükleme başlıklarının yüzeyleri temizlenerek, numunenin başlıklarla temas edecek yüzeylerinde herhangi bir gevşek çıkıntı ve/veya tane olmamasına dikkat edilmiştir. Numuneler deney cihazının alt başlığına merkezlenerek yerleştirilmiştir.

Yükleme gerilme kontrollü olarak 0,25±0,05 MPa/s düzeyinde uygulanmıştır (Resim 4.8). Yükleme darbe etkisi oluşturmadan numune kırılıncaya kadar sürdürülmüştür. Deney sonunda, kırılma yükleriyle birlikte kırılma tipi de kaydedilmiştir.

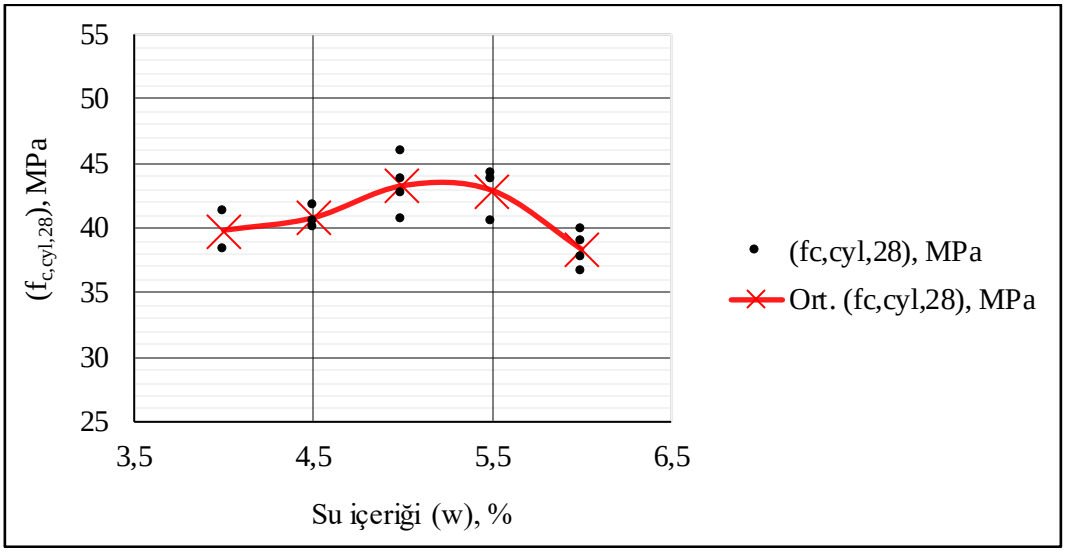


Resim 4.8. Basınç dayanımı test cihazı ve bir numunenin yükleme sırasındaki fotoğrafı

Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'de tüm su içeriklerinde hazırlanan numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım değerleri verilmektedir. Numunelerin 7 günlük basınç dayanım değerlerinin 33,0-38,4 MPa arasında değiştiği, en yüksek değerlerin %4,5 ve %5 su içeriklerinde 37,6-37,8 MPa olarak elde edildiği görülmektedir (Şekil 4.6).



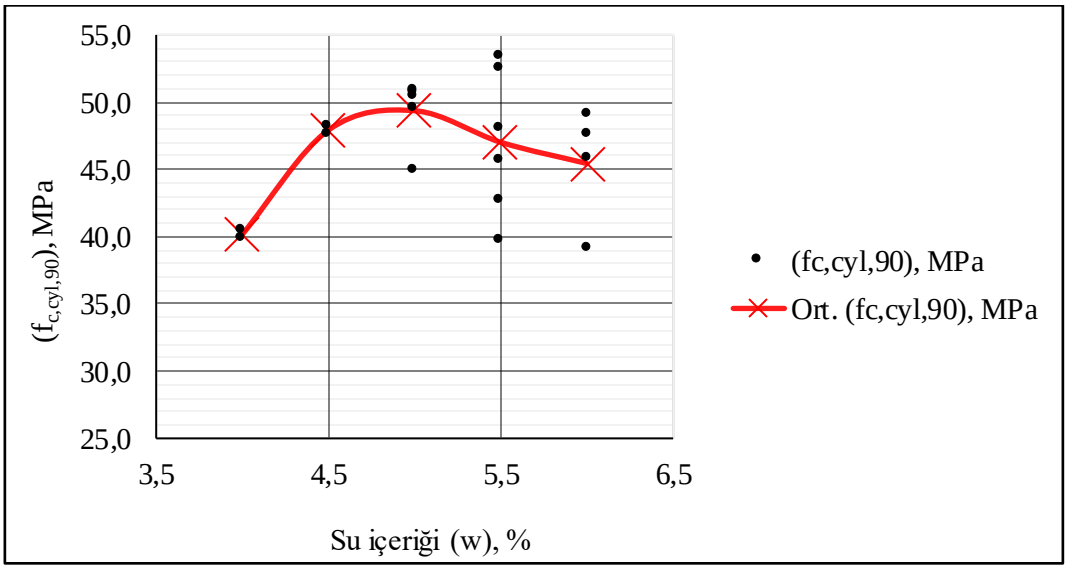
Şekil 4.6. 7 günlük basınç dayanımı su içeriği ilişkisi



Şekil 4.7. 28 günlük basınç dayanımı su içeriği ilişkisi

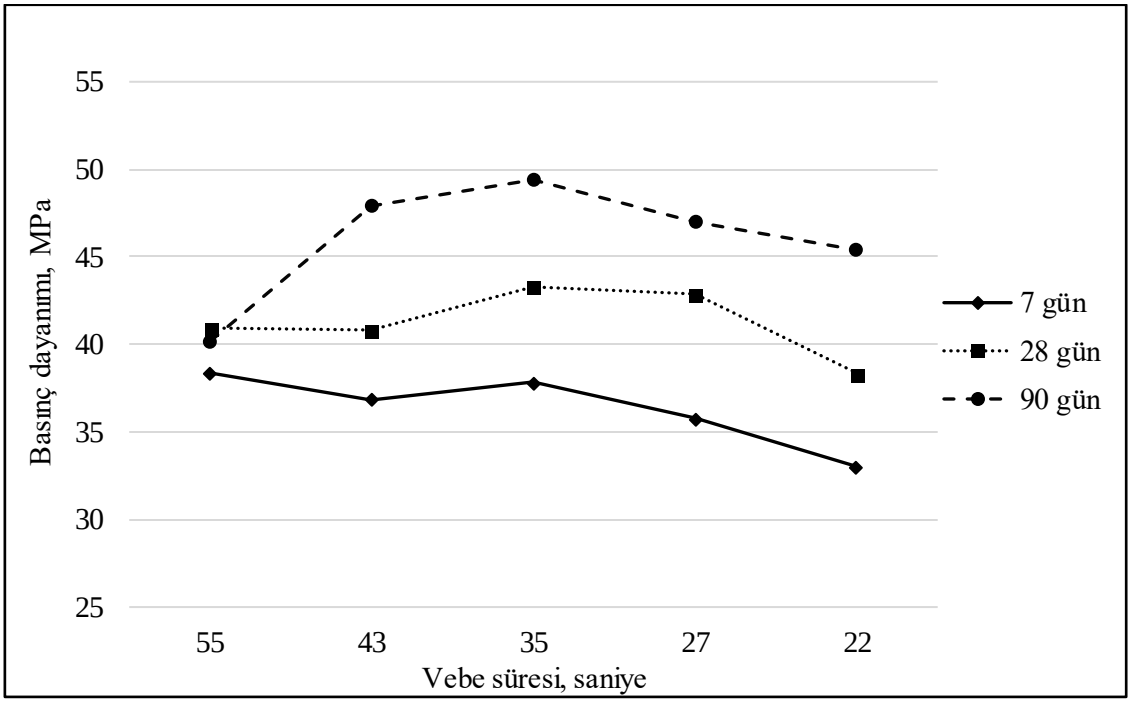
28 günlük basınç dayanım değerleri incelendiğinde, dayanımların 38,4-43,3 MPa arasında değiştiği, maksimum basınç dayanımı 43,3 MPa değerine %5 su içeriğinde ulaşıldığı görülmüştür (Şekil 4.7).

90 gün kür koşullarında bekletilen numunelerin basınç dayanım değerleri 40,2-49,4 MPa arasında değişmek olup, %5 su içeriğindeki numunelerin ortalama basınç dayanımı değeri 49,4 MPa dır (Şekil 4.8). 28 günlük değerlerle karşılaştırıldığında sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir.



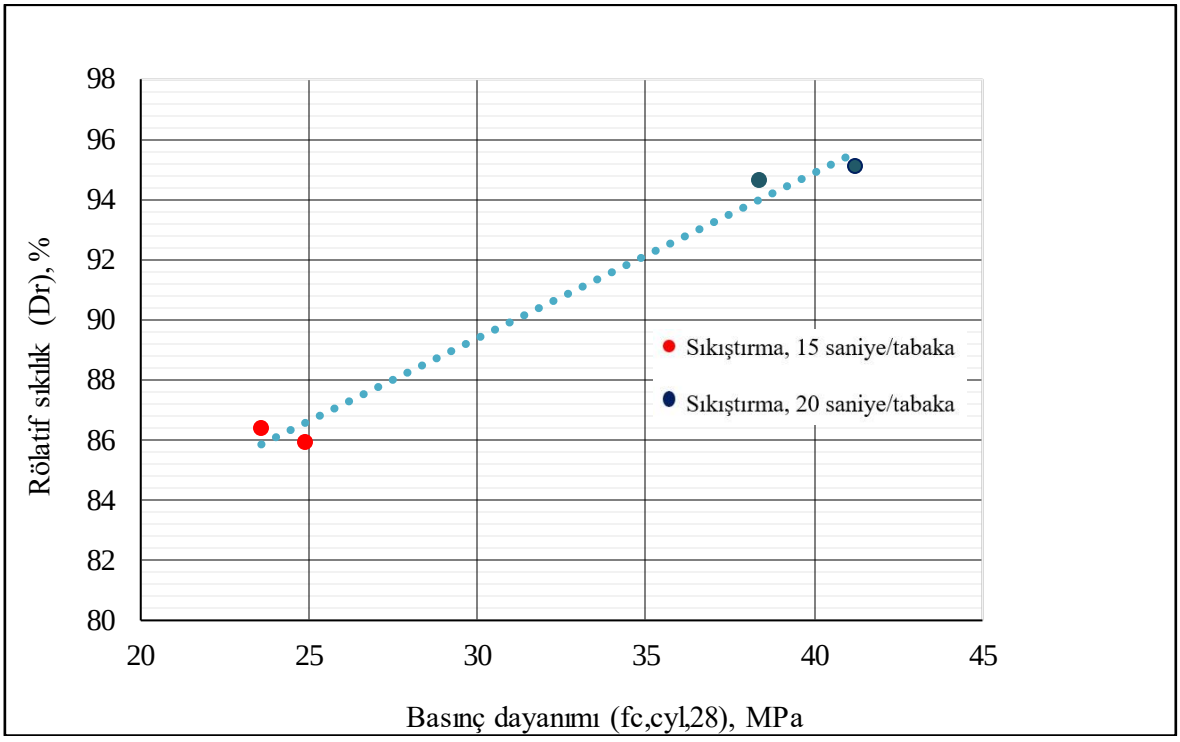
Şekil 4.8. 90 günlük basınç dayanımı su içeriği ilişkisi

Vebe süresi ile 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanım ilişkisi Şekil 4.9' da verilmiştir. Vebe süresinin 27-45 saniye aralığında genel olarak basınç dayanımlarının yüksek olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, 35 saniyede elde edilen 7, 28 ve 90 günlük dayanımların nispeten daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4.9. Vebe süresi – basınç dayanımı ilişkisi

Rölatif sıkılığın basınç dayanımı üzerindeki etkisini izlemek amacıyla; %4 su içeriğindeki 15x30 silindir numuneler farklı sıkıştırma enerjisi kullanılarak sıkıştırılmıştır. İlk grup numuneler hazırlanırken her tabakaya 15 saniye süreyle, ikinci grup numunelere ise 20 saniye süre ile titreşimli tokmak uygulanarak sıkışma işlemi yapılmıştır. İlk grup numunelerin rölatif sıkılığı ortalama %86,15 iken, ikinci grup numunelerin %94,37 dir. Hazırlanan numunelerin 28 günlük basınç dayanımları incelendiğinde; ilk grup numunelerin ortalama basınç dayanım değeri 24,25 MPa iken, ikinci grup numunelerde bu değer 39,84 MPa olarak elde edilmiştir (Şekil 4.10). Bu durum SSB karışımların özellikle arazi şartlarında sıkıştırılması (rölatif sıkılığın) ve kontrolünün önemini göstermektedir.



Şekil 4.10. Basınç dayanımı – Rölatif Sıkılık İlişkisi

Silindirle sıkıştırılmış iki tabakalı beton yol kaplamaları arasında kullanılacak ara yüzey elemanı/işlemi performanslarını değerlendirmek amacıyla yapılacak laboratuvar ve arazi çalışmaları kapsamında referans olarak %5 su içeriğinde elde edilen dayanımlar esas alınmıştır.

4.3. İki Tabaka Arası Bağ Dayanımı Deneyleri

Silindirle sıkıştırılabilir iki tabaka beton kaplamalar arası bağ performansının değerlendirilmesi amacıyla ara yüzey elemanları ve işlemleri belirlenerek (Çizelge 4.7) deney prosedürleri oluşturulmuştur. Bu bölümde ara yüzey eleman ve işlemleri, numune hazırlama prosedürleri, eğimli kesme deneyleri ve kiriş eğilme dayanımı deneyleri sunulmaktadır.

İki tabakalı ara yüzey elemanlarının ve işlemlerinin etkinliği, tabakalar arasına hiçbir malzeme kullanılmayan veya hiçbir pürüzlendirme işlemi yapılmayan numuneler referans alınarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.7. Çalışmada kullanılan iki tabakalı ara yüzey elemanları ve işlemleri

Ara yüzey elemanı/işlemi	Kod	Ürün / işlem tanımı	İçerik	Kullanım miktarı g/cm²
Ara yüzey elemansız	Y	İki tabaka arasına herhangi bir eleman/işlem yoktur	-	-
Lateks	L	Sıvı sentetik kauçuk emülsiyon	Stiren butadien emülsiyon	0,15
Epoksi reçine	E	Epoksi reçine	İki bileşenli reçine	0,055
Aderans harcı	A	Çimento esaslı gri toz	Silis dumanlı, polimer modifiye harç	0,20
Bitümlü yapıştırıcı	B	Katyonik bitüm emülsiyonu	C65B2-3	0,05
Pürüzlü yüzey	P	Ara yüzey pürüzlendirilmiştir	Mozaik tarağı ile pürüzlendirilmiştir	-

4.3.1. Ara yüzey elemanları ve işlemleri

Laboratuvar çalışmaları kapsamında, iki tabaka silindirle sıkıştırılmış beton plak arasına uygulanan malzemeler "ara yüzey elemanı", malzeme kullanılmaksızın oluşturulan ara yüzey uygulamaları ise "ara yüzey işlemi" olarak tanımlanmıştır. Dört adet ara yüzey elemanı ve iki adet ara yüzey işlemi çalışılmıştır. Tüm ara yüzey elemanları ve işlemlerinin değerlendirilmesi için tasarım aşamasında belirlenen %5 su içeriğindeki numune değerleri referans olarak kabul edilmiştir.

<u>İki tabaka ara yüzeyinde lateks kullanımı</u>

Lateks, iyi bir yapıştırma ve su geçirimsizlik istenen yerlerde çimento harçlarına katılan, sıvı sentetik kauçuk emülsiyondur. Çimento harcının yapıştırma özelliklerini artırması, harca daha fazla elastikiyet kazandırması, su geçirimsizliği, büzülmenin azaltılması, aşınma ve kimyasal dayanımı iyileştirmesi önemli özellikleridir.

Çimentonun bağlayıcılık özelliklerini artıran latekslerin genel kullanım alanları beton tamir harçları, ince tabaka tamir harçları, döşeme şapları, aşınma dayanımlı kaplamalar, duvar

harçlarıdır. Kimyasal içeriği stiren butadien emülsiyon olarak tanımlanmakta olup, teknik bilgileri Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8. Çalışmada kullanılan Lateks'in fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Görünüm, renk	Sıvı, beyaz emülsiyon
Kimyasal yapı	Stiren butadien emülsiyon
Yoğunluk, g/cm³	1,015
PH değeri	8-12
Kinematik viskozite, mm² / s	> 20,5
Donma noktası, °C	-5

Lateks, genel kullanımına uygun olarak, çimento ve agrega ile karıştırılarak hazırlanmıştır. Lateksli ara yüzey elemanı hazırlamasında agrega olarak, 0-2 mm yıkanmış taş tozu kullanılmıştır. Lateks/Çimento oranı 1:2 ve agrega/çimento oranı 1:2 alınarak ara yüzey elemanı hazırlanmıştır. Kullanım oranı, 0,15 g/cm² olan lateks, alanı belirli olan ara yüzeye numune terazideyken hassas bir şekilde uygulanmıştır (Resim 4.9).



Resim 4.9. Lateks hazırlanması ve ara yüzey uygulama aşamaları

İki tabaka ara yüzeyinde epoksi reçine kullanımı

Epoksi reçine, solvent içermeyen iki bileşenli yapıştırma malzemesidir. Genel olarak betonun çekme dayanımından daha büyük bir dayanım ile yapışma sağlar. Bu nedenle iki farklı beton yüzeylerinin yapısal olarak yapıştırılması gereken yerlerde yaygın kullanılmaktadır. Ayrıca, harç, çelik, demir vb. için de yapıştırma malzemesi olarak yaygın kullanıldığı bilinmektedir.

Epoksi reçinenin hazırlandıktan sonra yapıştırma süresi ortam sıcaklığına bağlı olarak, 60-180 dakika arasındadır (Çizelge 4.9).

Çizelge 4.9. Epoksi reçinenin fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Görünüm, renk	Açık gri
Pota ömrü (20 °C), dakika	25
Üzerine yapıştırılabilme süresi (20 °C), dakika	180
Yoğunluk, g/cm³	1,400
Basınç dayanımı, N/mm²	60-70
Eğilme dayanımı, N/mm²	30-35
Çekme dayanımı, N/mm²	18-20

Kullanım oranı, 0,055 g/cm² olan epoksi reçine, alanı belirli olan ara yüzeye numune terazideyken hassas bir şekilde uygulanmıştır (Resim 4.10).



Resim 4.10. Epoksi ile ara yüzey uygulaması

İki tabaka ara yüzeyinde aderans harcı kullanımı

Aderans harçları, çimento esaslı, silis dumanı ve korozyon inhibitörü içeren, polimer ile modifiye edilmiş tek bileşenli kaplama malzemeleridir. Beton yüzeyinde aderans artırıcı olarak kullanıldığı gibi, donatıların korozyondan korunmasına da katkı sağlamaktadır.

Çalışmada kullanılan aderans harcı fiziksel özellikleri Çizelge 4.10'da verilmektedir.

Çizelge 4.10. Aderans harcı fiziksel özellikleri

Özellik	Değer
Görünüm, renk	Toz, gri
Yoğunluk (toz), g/cm³	1,220
Yoğunluk (taze harç), g/cm³	2,100
En büyük dane boyutu, mm	1
Basınç dayanımı (28 gün, 23°C ve %60 bağıl nemde), N/mm²	60-75
Eğilmede çekme dayanımı (28 gün, 23°C ve %60 bağıl nemde), N/mm²	5-10
Çekme yapışma dayanımı (28 gün, 23°C ve %60 bağıl nemde), N/mm²	1,5-2,5

Deneylerde ara yüzey elemanı olarak kullanılan aderans harcı 5,6:1 oranında su ile karıştırılarak, yüzeye 0,2 g/cm² uygulanmıştır (Resim 4.11).



Resim 4.11. Aderans harcı ile ara yüzey uygulaması

İki tabaka ara yüzeyinde bitümlü yapıştırıcı kullanımı

Bitümlü yapıştırıcılar, yol yapımında, bitümlü sıcak karışım tabakaları arası aderansı sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Deneylerde kullanılan yapıştırıcı C65B2-3 sınıfı katyonik bitüm emülsiyonu olup, fiziksel özellikleri Çizelge 4.11'de verilmektedir.

Çizelge 4.11. Bitümlü yapıştırıcı fiziksel özellikleri

Özellik	Standart	Değer
Kesilme değeri	TS EN 13075-1	< 110
Bitüm içeriği, %	TS EN 1431	65
Akma zamanı, 2 mm, 40°C, s	TS EN 12846-1	55
Elek üstü kalıntısı (0,5 mm elek), % m/m	TS EN 1429	0,05
Çökelme eğilimi, %	TS EN 12847	1,5
Yapışkanlık, %	TS EN 13614	90,5

Bitümlü emülsiyonu yüzeye 0,05 g/cm² miktarda uygulanmıştır (Resim 4.12).



Resim 4.12. Bitümlü yapıştırıcı ile ara yüzey uygulaması

İki tabaka ara yüzeyinde pürüzlendirme işlemi

SSB tabakaları arası bağ performansının tabakalar arası yüzeyin pürüzlendirilerek de değerlendirilmesi yapılmıştır. Bu amaçla birinci tabaka SSB yüzeyi mozaik tarağı

kullanılarak pürüzlendirilmiş (Resim 4.13), yüzey nemlendirildikten sonra ikinci tabaka SSB uygulaması yapılmıştır.



Resim 4.13. İki tabaka ara yüzeyinde pürüzlendirme işlemi

4.3.2. Eğimli kesme deneyi

Eğimli kesme deneyi, iki tabaka yüzeyinin arasındaki bağın yük aktarma kapasitesini belirlemek amacıyla yapılmaktadır. Deneyler sonrasında numunelerin kırılma şekilleri de incelenmiştir. Her ara yüzey elemanı ve işlemi için 7, 28 ve 90 günlük numuneler üzerinde toplam 96 adet deney gerçekleştirilmiştir.

Eğimli kesme deneyi numunelerinin hazırlanması

İki tabaka SSB numuneleri hazırlanmasında %5 su içeriğinde ve Bölüm 4.2'de belirlenen SSB bileşen ve miktarları (çimento dozajı=300 kg/m³, s/ç=0,4, agrega miktarı=2.095 kg/m³) kullanılmıştır. İki tabaka SSB numunelerinin hazırlanma aşamaları ana hatlarıyla şöyledir:

- 15x30 silindir SSB numunelerin hazırlanması.
- Numunelerin 24 saat sonra kalıptan çıkarılıp 45º açı ile iki eşit parçaya kesilmesi (Resim 4.14).
- Kesilen numunelerden biri yüzeyine ara yüzey elemanı/işlemi uygulanması ve kalıp içerisine yerleştirilmesi.

- İkinci tabaka SSB'nin, özel bir sıkıştırma tokmağı da kullanılarak (Resim 4.15b), kalıba yerleştirilen numune üzerine sıkıştırılması (Resim 4.15).
- Numunelerin 24 saat sonra kalıptan çıkarılıp 7, 28 ve 90 gün küre tabi tutulması.
- Eğimli kesme deneylerinin yapılması.



Resim 4.14. Numunelerin kesme makinesi ile 45^{o} lik 2 eşit parçaya bölünmesi



a **b**

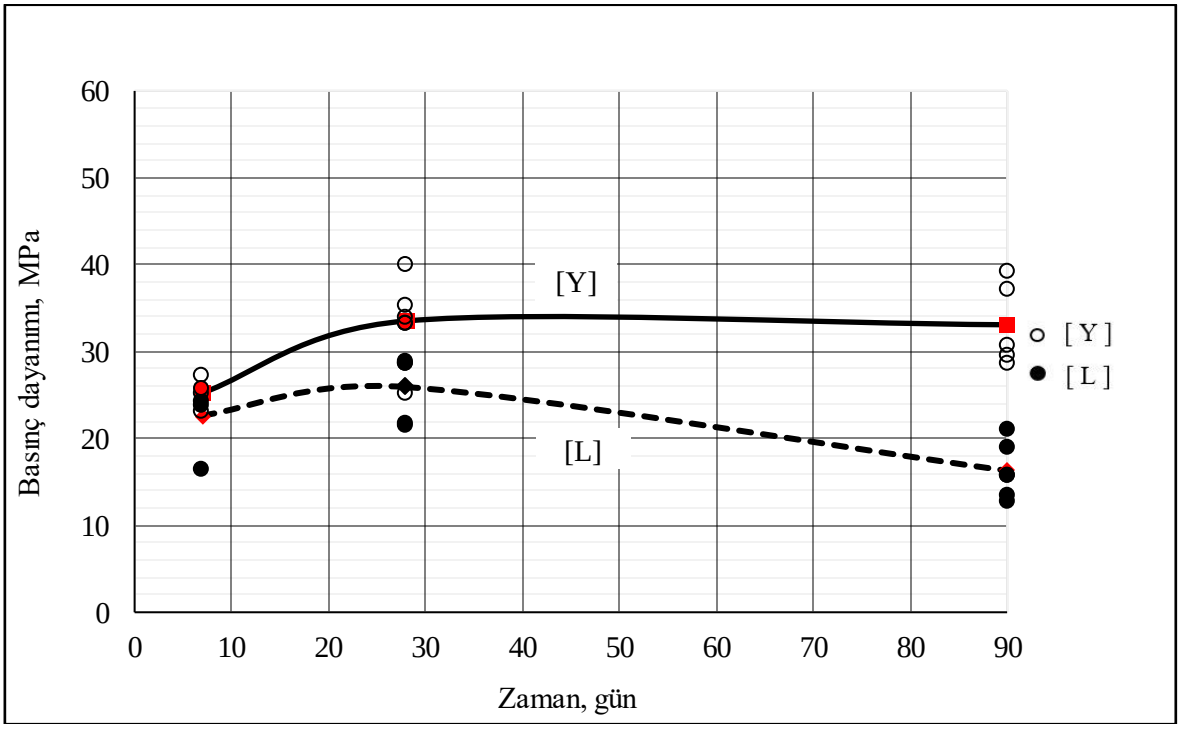
Resim 4.15. Titreşimli tokmak başlıkları

Her bir ara yüzey elemanı/işlemi için yukarıda açıklanan prosedürle ez az 12 adet numune hazırlanmıştır. Kür işlemi sonrasında, hazırlanan numuneler üzerinde eğimli kesme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Eğimli kesme deneyleri

Eğimli kesme deneyi dört adet ara yüzey elemanı, iki adet ara yüzey işlemi olmak üzere toplam altı farklı tipte toplam 96 adet numune üzerinde yapılmıştır (ASTM C39M-18, 2020). Her ara yüzey elemanı/işlemi ile elde edilen dayanım değerleri ara yüzey elemansız [Y] dayanım değerleriyle karşılaştırılmıştır.

Şekil 4.11'de lateks ara yüzey elemanlı numunelerin ve ara yüzey elemansız [Y] numunelerin 7, 28 ve 90 günlük basınç dayanımları birlikte verilmiştir.



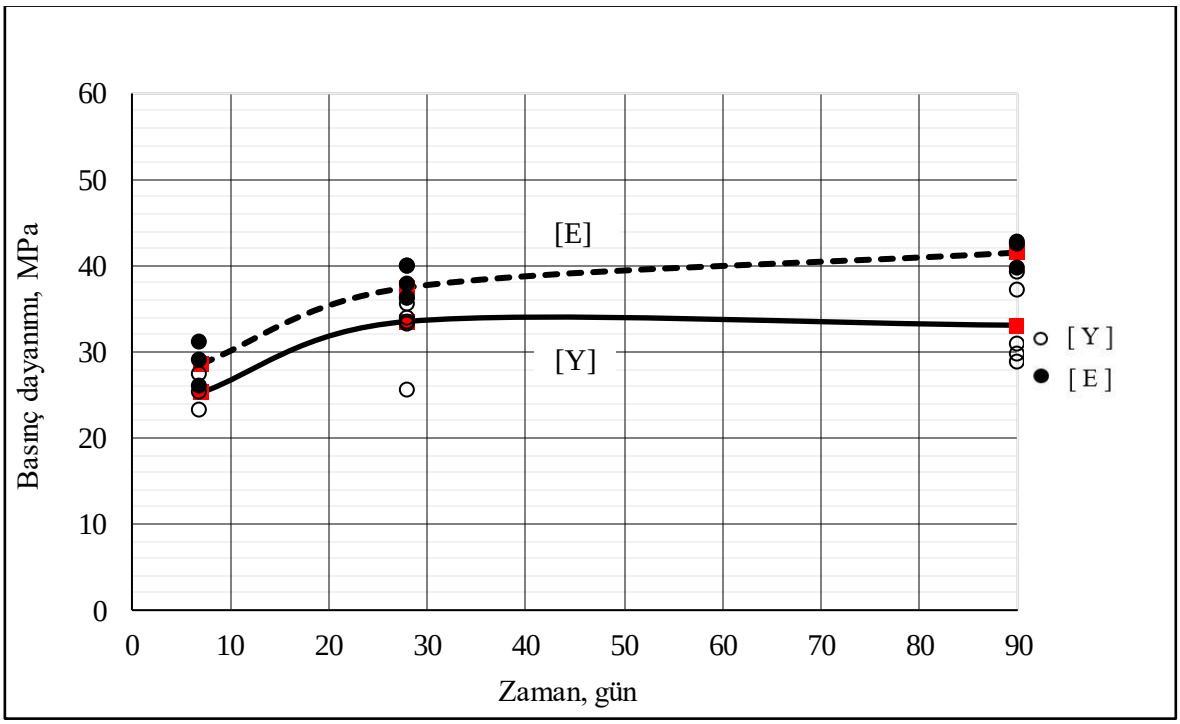
Şekil 4.11. Ara yüzey elemansız [Y] ve Lateks [L] numunelerin basınç dayanımları

Lateks ara yüzey elemanlı numunelerin 7 ve 28 günlük ortalama dayanımları, ara yüzey elemansız [Y] numunelerin %70-77'sine ulaşırken, 90 günlük ortalama dayanım değerleri %50,8'ine ulaşmıştır. 90 günlük dayanım değerlerindeki azalışın, lateksin ara yüzey elemanı olarak belirli bir süre katkı sağladığı, fakat zamanla özelliğini kaybetmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Lateks ara yüzey elemanlı numunelerin eğimli kesme deneyi sonrası fotoğrafları Resim 4.16'da sunulmuştur.



Resim 4.16. Lateks [L] ara yüzeyli numunelerin eğimli kesme deneyi sonrası fotoğrafları

Şekil 4.12'de epoksi reçine ara yüzey elemanlı numunelerin [E], ara yüzey elemansız [Y] numunelerle birlikte eğimli kesme deneyi sonuçları verilmektedir. Ara yüzeyine epoksi reçine uygulanmış numunelerin 28 günlük dayanımları, ara yüzey elemansız numunenin %112'sine, 90 günlük dayanımları ise, %125'ine ulaşmıştır.



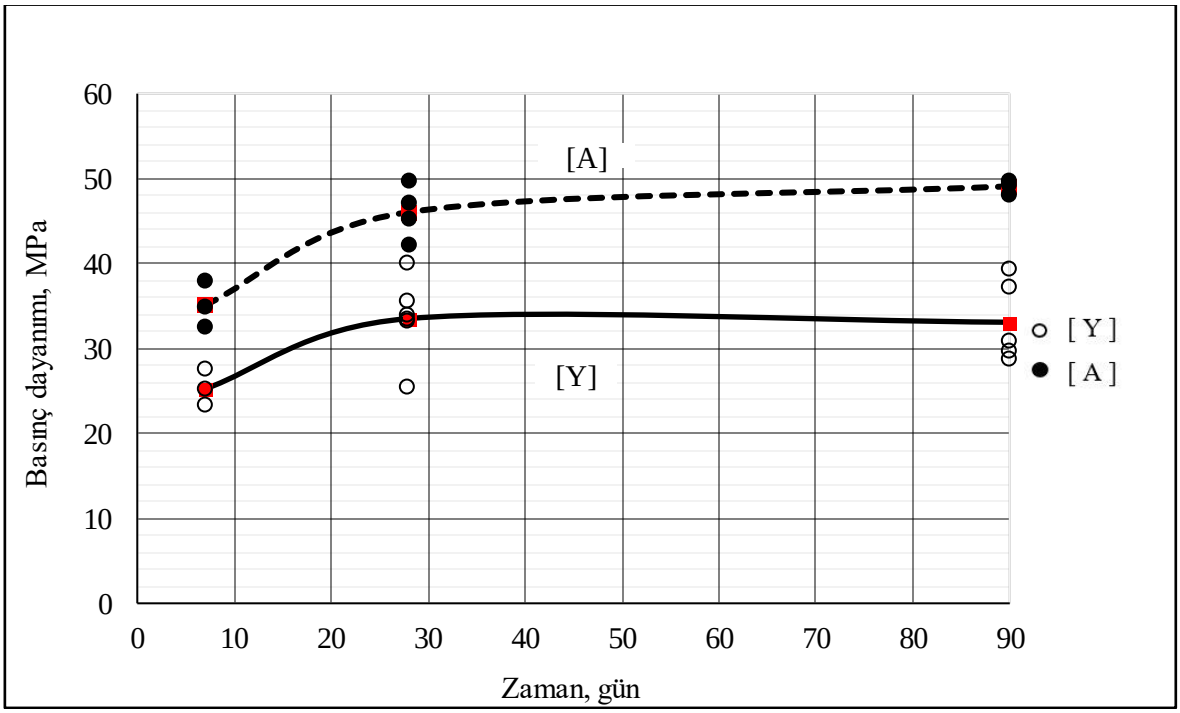
Şekil 4.12. Ara yüzey elemansız [Y] ve Epoksi reçine [E] numunelerin basınç dayanımları

Yenilme 7, 28 ve 90 günlük numunelerin tamamında ara yüzey kesitinde meydana gelmiştir (Resim 4.17). Numuneler kırım sırasında maksimum yüke ulaştıktan hemen sonra, yenilme ara yüzeyde aniden gerçekleşmiştir.



Resim 4.17. Epoksi reçine [E] ara yüzeyli numunelerin eğimli kesme deneyi sonrası fotoğrafları

Şekil 4.13'de aderans harçlı ara yüzey numuneleri ile ara yüzey elemansız numune değerleri bir arada sunulmuştur. Aderans harçlı numunelerin 28 günlük dayanım değerleri 42,2-49,7 MPa arasında değişmekle birlikte, ortalama dayanım değeri 46 MPa, ara yüzey elemansız numune dayanımları 25,35-39,92 MPa arasında değişmekte, ortalama 33,5 MPa elde edilmiştir.



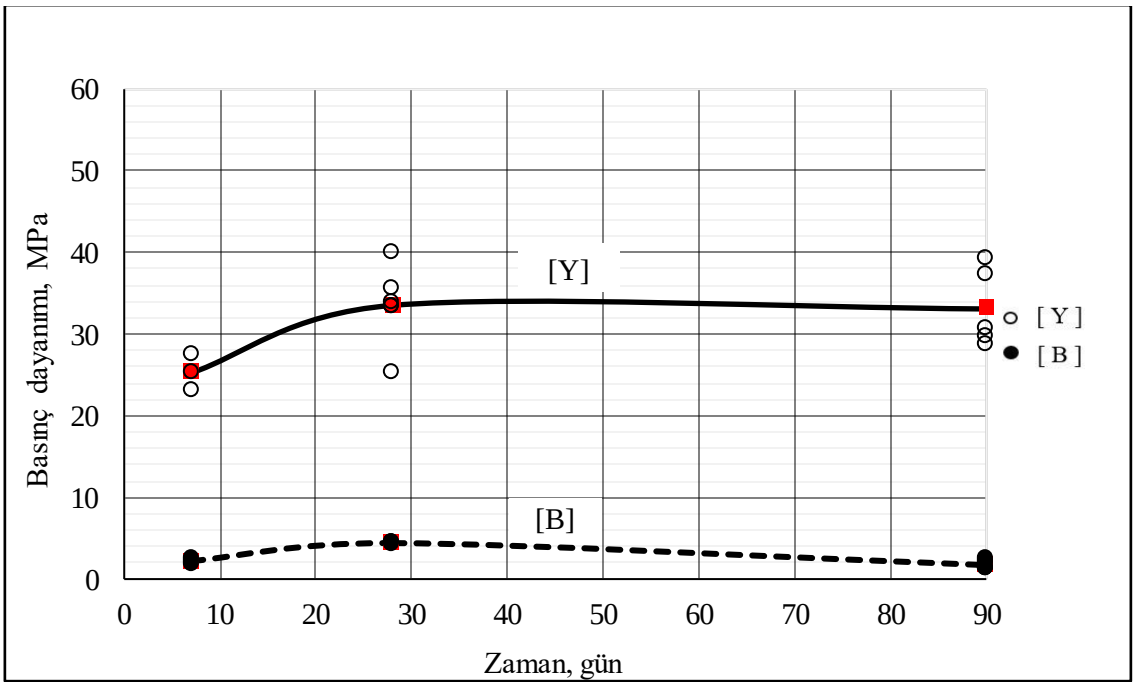
Şekil 4.13. Ara yüzey elemansız [Y] ve Aderans harcı [A] numunelerin basınç dayanımları

Yenilme 7, 28 ve 90 günlük numunelerin tamamında tüm kesit boyunca meydana gelmiş, ara yüzeyde yenilme gerçekleşmemiştir (Resim 4.18).



Resim 4.18. Aderans harcı [A] ara yüzeyli numunelerin eğimli kesme deneyi sonrası fotoğrafları

Şekil 4.14'de tabakalar arası yüzeye bitümlü yapıştırıcı uygulayarak hazırlanan numuneler [B] ile ara yüzey elemansız numunelerin [Y] basınç dayanım değerleri verilmiştir. Bitümlü yapıştırıcı ara yüzey elemanlı numunelerin dayanımları ara yüzey elemansız numunenin %5-13'üne düşmüştür. Bitüm emülsiyonları asfalt yol üstyapı tabakaları arasında yapıştırıcı olarak yaygın kullanılmaktadır. SSB tabakaları arasında kullanıldığında beklenenin aksine yük aktarımını azaltıcı yönde davranış göstermiştir. Deformasyon tabakalar arası 45° eğimli ara yüzey üzerinde kayma şeklinde oluşmuştur. Resim 4.19'da SSB tabakaları arasında bitümlü yapıştırıcı kullanılan numunelerin deney sonrası temsili görüntüleri verilmiştir.

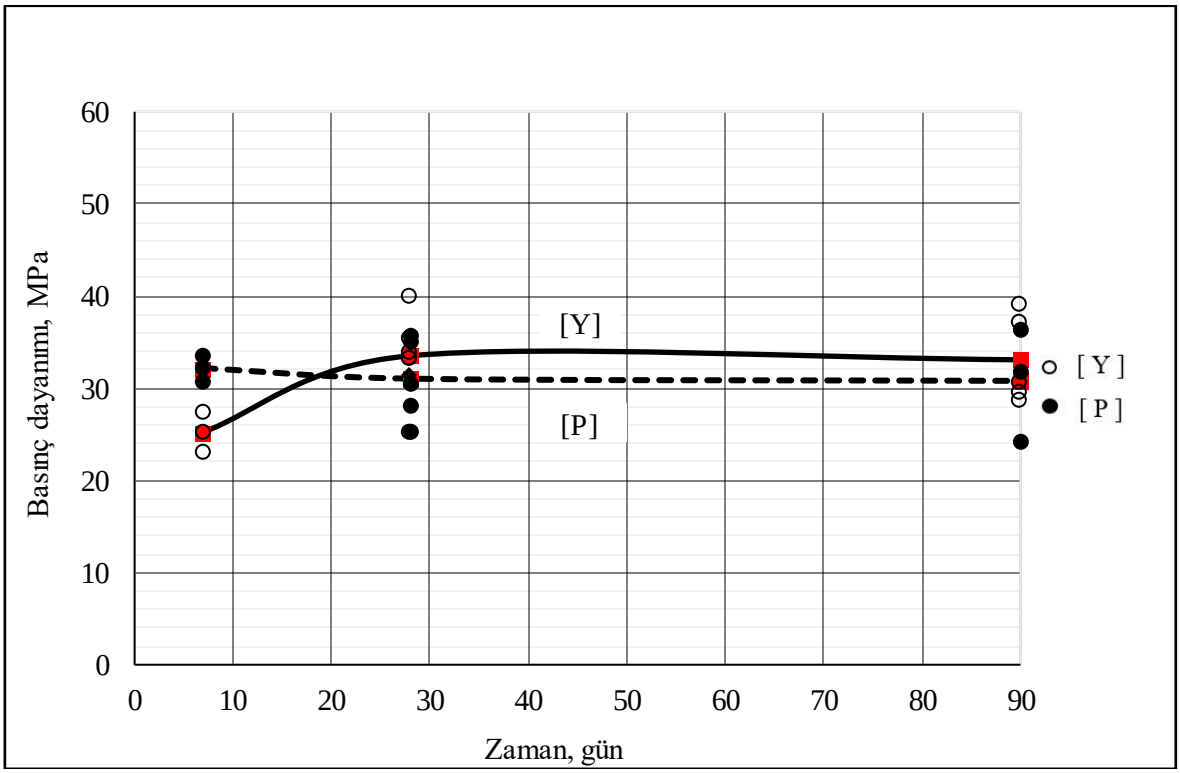


Şekil 4.14. Ara yüzey elemansız [Y] ve Bitümlü yapıştırıcı [B] numunelerin basınç dayanımları



Resim 4.19. Bitümlü yapıştırıcı [B] ara yüzeyli numunelerin eğimli kesme deneyi sonrası fotoğrafları

Şekil 4.15'de ara yüzeyi pürüzlendirilerek hazırlanan iki tabaka SSB numunelerinin basınç dayanımları ara yüzey elemansız numune değerleriyle birlikte verilmektedir. Pürüzlendirilmiş ara yüzey işlemli numunelerin ortalama basınç dayanımları, ara yüzey elemansız numunenin 28 günde %92'sine, 90 günde ise %93'üne ulaşmıştır. Bununla birlikte numunelerin 7, 28 ve 90 günlük dayanımlarının birbirine yakın çıkması ara yüzeyin yük aktarma kapasitesinin zamanla değişmediğini göstermektedir.



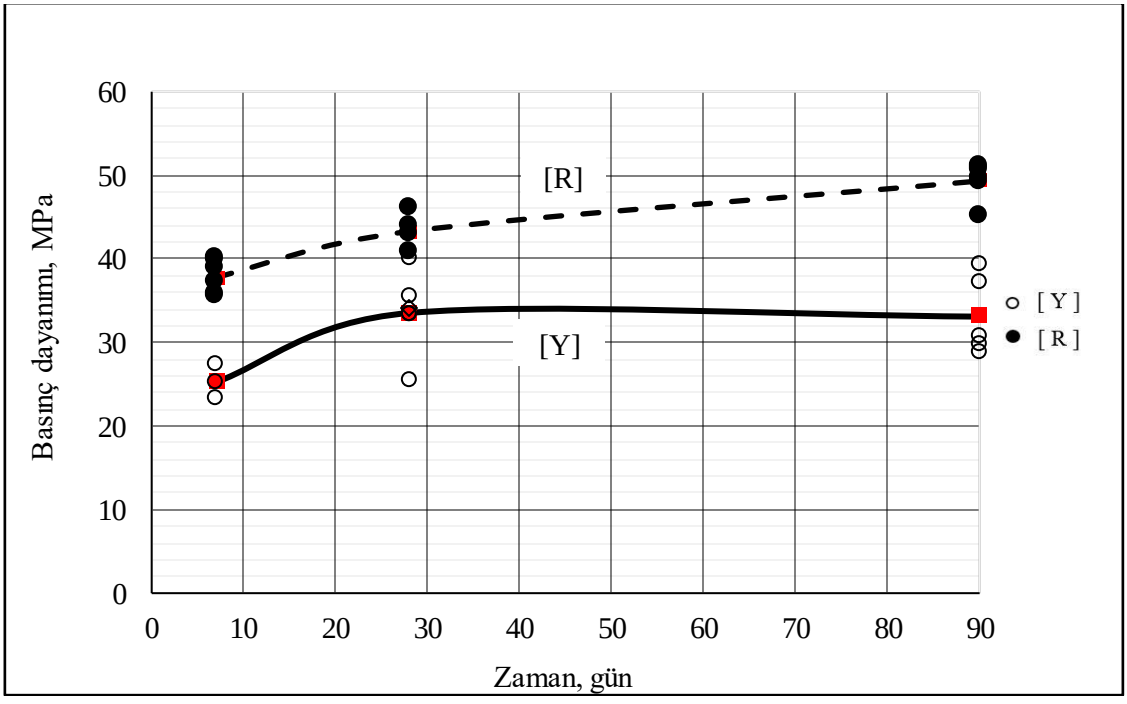
Şekil 4.15. Ara yüzey elemansız [Y] ve Pürüzlü yüzey [P] numunelerin basınç dayanımları

Resim 4.20'de SSB tabakaları arasında pürüzlü yüzey kullanılan numunelerin deney sonrası temsili görüntüleri verilmiştir.



Resim 4.20. Pürüzlü yüzey [P] ara yüzeyli numunelerin eğimli kesme deneyi sonrası fotoğrafları

Şekil 4.16'da ara yüzey elemanı/işlemi uygulanmadan hazırlanan numunelerin değerleri verilmektedir. Ara yüzey elemanı kullanılmadan hazırlanan numunelerin 28 günlük ortalama basınç dayanımları, referans numune basınç dayanımının %77 sine ulaşabilmiştir. 28 günlük ve 90 günlük dayanım sonuçları birbirine yakın olup, numunelerin zamanla dayanımında artış olmadığı görülmüştür.



Şekil 4.16. Referans [R] ve Ara yüzey elemansız [Y] numunelerin basınç dayanımları

Ara yüzey elemanı/işlemi kullanılmadan hazırlanan numunelerin yenilmeleri 45º açılı ara yüzeyde oluşmuştur (Resim 4.21).



Resim 4.21. Ara yüzey elemansız [Y] numunelerin eğimli kesme deneyi sonrası fotoğrafları

Ara yüzey elemanı/işlemi uygulanan numunelerin (45º açılı iki parçadan oluşan silindirik numune) ve referans numunelerin (tek parça silindirik numune), sertleşmiş yaş yoğunluk değerleri, rölatif sıkılık değerleri ve 7, 28 ve 90 günlük eğimli kesme deney sonuçları Çizelge 4.12'de özetlenmiştir.

Tüm numunelerin rölatif sıkılık değerleri %97,1-98,4 arasında değişmektedir. Tasarım aşamasında yapılan deneylerde, rölatif sıkılık değerinin artması ile basınç dayanımı değerlerinin arttığı görülmüştür. Bu nedenle, rölatif sıkılığın kabul edilebilir değerler arasında olmasına özellikle dikkat edilmiştir. Çizelge 4.12'de numunelerin kırılma şekilleri Tip 1, Tip 2 ve Tip 3 olarak belirtilmiş olup, tarifleri bölüm 4.3.2.3'de verilmiştir.

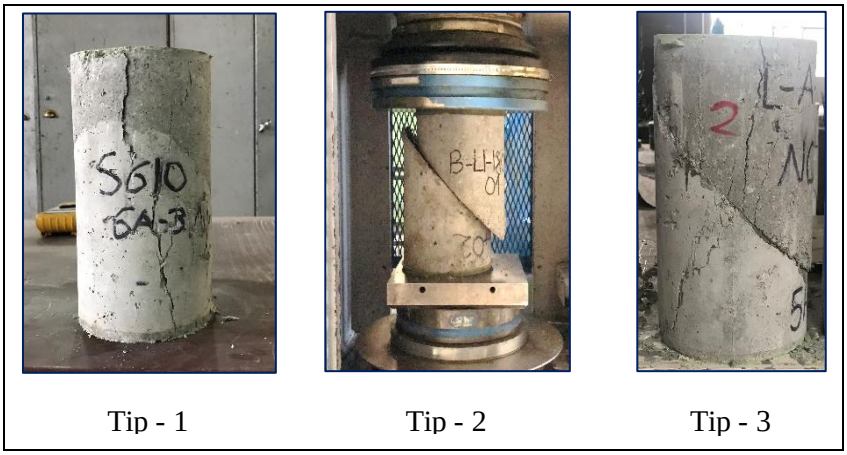
Çizelge 4.12. Ortalama eğimli kesme dayanım değerleri (%CoV değerleri parantez içindedir)

Ara yüzey elemanı/işlemi	Kod	Numune sayısı Adet	Sertleşmiş yaş yoğunluk kg/m³	Rölatif sıkılık, Dr %	Ortalama basınç dayanımı [MPa]			Kırılma Şekli
					7 günlük	28 günlük	90 günlük	
Referans	R	16	2.447	97,3	37,8 (5,3)	43,3 (5)	49,3 (4,5)	TİP 1
Lateks	L	16	2.441	97,1	22,7 (18)	25,9 (14)	16,3 (19)	TİP 2 TİP 3
Epoksi reçine	E	12	2.457	97,7	28,6 (9)	37,5 (4)	41,5 (4)	TİP 2
Aderans harcı	A	12	2.457	97,7	35,1 (8)	46 (7)	49,1 (2)	TİP 1
Bitümlü yapıştırıcı	B	14	2.474	98,4	2,2 (13)	4,4 (3)	1,7 (31)	TİP 2
Pürüzlü yüzey	P	12	2.458	97,7	32,2 (4)	31 (13)	30,8 (20)	TİP 2 TİP 3
Ara yüzey elemansız	Y	14	2.457	97,7	25,3 (8,5)	33,5 (14,1)	33,1 (14,4)	TİP 2

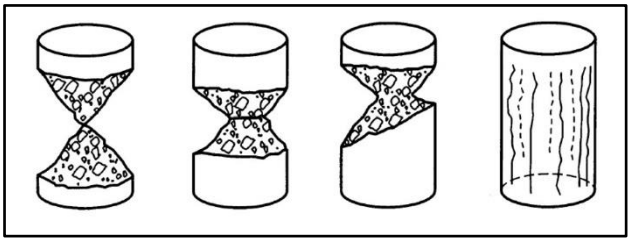
Çizelge 4.12'de görüleceği üzeresadece aderans harçlı ara yüzey elemanlı numunelerin [A] dayanım değerleri tüm kür sürelerinde tek parça silindirik numunelerin [R] basınç dayanımına çok yakın elde edilmiştir.

Eğimli kesme deney numunelerinin kırılma şekilleri

Eğimli kesme deneylerinde numunelerin kırılma şekilleri incelenmiş olup, üç tip kırılma şekli gözlenmiştir (Resim 4.22). Tip 1 olarak tanımlanan kırılma şeklinde, numune basınç altında ara yüzey kesitinden kırılmamış, tabakalar arası yük aktararak numune boyunca kırılmıştır. Bu kırılma şekli ilgili standartta (TS EN 12390-3, 2019) kabul edilebilir kırılma şekilleri arasında yer almaktadır (Şekil 4.17).



Resim 4.22. 45º eğimli ara yüzeyli silindirik numunelerin kırılma şekilleri



Şekil 4.17. Silindir numunelerin kabul edilebilir kırılma şekilleri (TS EN 12390-3, 2019)

Tip 2 olarak tanımlanan kırılma şeklinde ise, SSB tabakaları arasındaki 45º açılı ara yüzey üzerinde gerçekleşmiştir. İlgili standartta benzer kırılma şekli olumsuz olarak listelenmiştir (TS EN 12390-3, 2019). Bu nedenle Tip 2 kırılma şekli gösteren numunelerin eğimli kesme deneyi performansı olumsuz olarak değerlendirilmiştir.

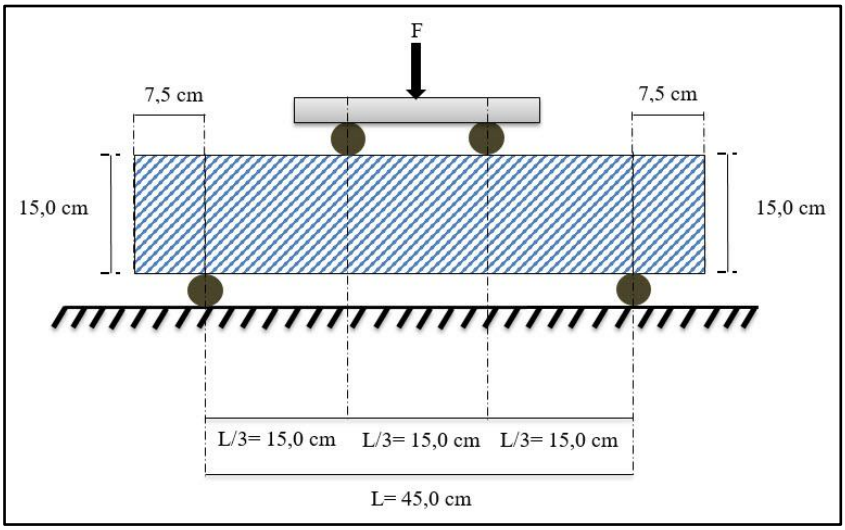
Tip 3 kırılma şekli, Tip 1 ve Tip 2 kırılma şekillerinin birlikte izlendiği numunelerdir. Bu kırılma şekli lateks ara yüzey elemanlı ve pürüzlü ara yüzey işlemli numunelerde izlenmiştir (Çizelge 4.12). Tip 1 kabul edilebilir kırılma şekli tek tabaka referans numune ve iki tabakalı aderans harçlı ara yüzey elemanlı numunelerde gözlenmiştir. Tip 2 kırılma şekli belirgin olarak epoksi reçineli ve bitümlü yapıştırıcı ara yüzey elemanlarının kullanıldığı numunelerde görülmekle birlikte, epoksi reçine ara yüzeyli numunelerin yük taşıma kapasitesi oldukça yüksektir. Bitümlü yapıştırıcı ara yüzeyli numuneler Tip 2 şeklinde kırılma gösterirken, eğimli kesme dayanımları oldukça düşük çıkmıştır. Bitümlü yapıştırıcı tabakası uygulanması tabakalar arası sürtünme dayanımını azaltmış, tabakaların birbiri üzerinde kaymasına sebep olmuştur.

Yukarıdaki değerlendirmeler ışığı altında bir sonraki aşamada, kiriş eğilme deneylerinin sadece aderans harçlı ara yüzey elemanı kullanılarak yapılmasına karar verilmiştir.

4.3.3. Kiriş eğilme deneyleri

Kiriş eğilme deneyi, hem rijit yol üstyapı tabakaları kalınlık tasarımda, hem de kalite kontrol çalışmaları kapsamında yaygın olarak kullanılmaktadır. Kiriş eğilme deneyleri, referans olarak kullanılacak tek tabaka SSB, ara yüzey elemansız iki tabaka SSB ve eğimli kesme deneyinde en iyi sonucu veren aderans harç ara yüzeyli iki tabaka SSB numuneleri üzerinde yürütülmüştür.

Şekil 4.18'de dört nokta kiriş eğilme deney düzeneği şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.18. Kiriş eğilme dayanımı deney düzeneği şematiği

%5 su içeriğinde tek tabaka olarak hazırlanan numunelerin 28 ve 90 gün kür sonunda, ara yüzey elemansız ve aderans harçlı ara yüzeyli iki tabaka kiriş numunelerinin ise 28 gün kür sonunda kiriş eğilme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Kiriş eğilme deney numunelerinin hazırlanması

Tüm kiriş eğilme deneyi numuneleri; 15x15x60 cm^3 çelik kalıplarda, 7,5 cm kalınlıklarda iki tabaka halinde hazırlanmıştır. Sıkıştırma işlemi her tabakaya 20 s süreyle titreşimli

tokmak uygulanarak yapılmıştır. Üst tabaka sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, numune yüzeyleri düzeltilmiş, 24 saat sonra kalıptan çıkartılmıştır (Resim 4.23).

İki tabakalı ara yüzey elemansız ve aderans harçlı ara yüzey elemanlı numuneler benzer şekilde hazırlanmıştır. Bu numuneler 24 saat sonra kalıptan çıkarılıp boyuna iki eşit parçaya kesilmiştir. Aderans harçlı ara yüzey, daha önce belirtildiği biçimde (0,2 g/cm³) uygulanmıştır. İkinci tabakalar titreşimli tokmakla 20 saniye süre ile sıkıştırılıp düzeltilmiştir (Resim 4.24). Tekrar 24 saat sonra kalıptan çıkarılan numuneler 28 gün kür ortamında bekletildikten sonra kiriş eğilme deneyine tabi tutulmuştur.



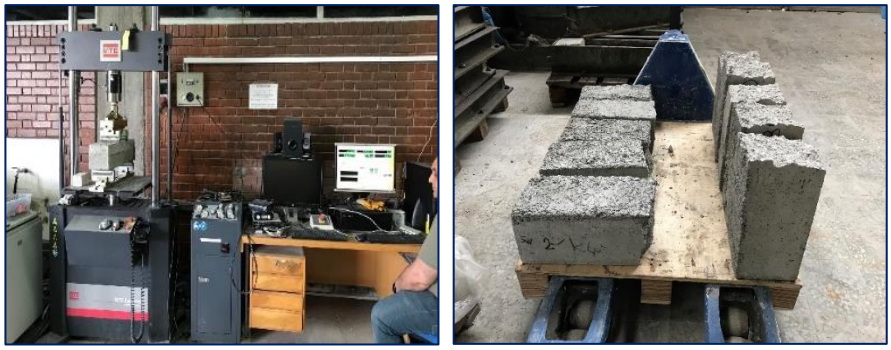
Resim 4.23. Kiriş numunelerinin hazırlanması



Resim 4.24. Ara yüzey elemanı ve kiriş üst yüzeylerinin düzenlenmesi

Kiriş eğilme deneyi sonuçları

Kiriş numunelerinin dört nokta kiriş eğilme dayanımı deneyleri, ASTM C78M-18, 2021 standardına uygun Landmark 250 kN model servo hidrolik MTS cihazı ile 0,5 mm/dk yükleme hızında yürütülmüştür (Resim 4.25). Numunelerin yük-deformasyon ilişkileri EK-2'de sunulmuştur.



a



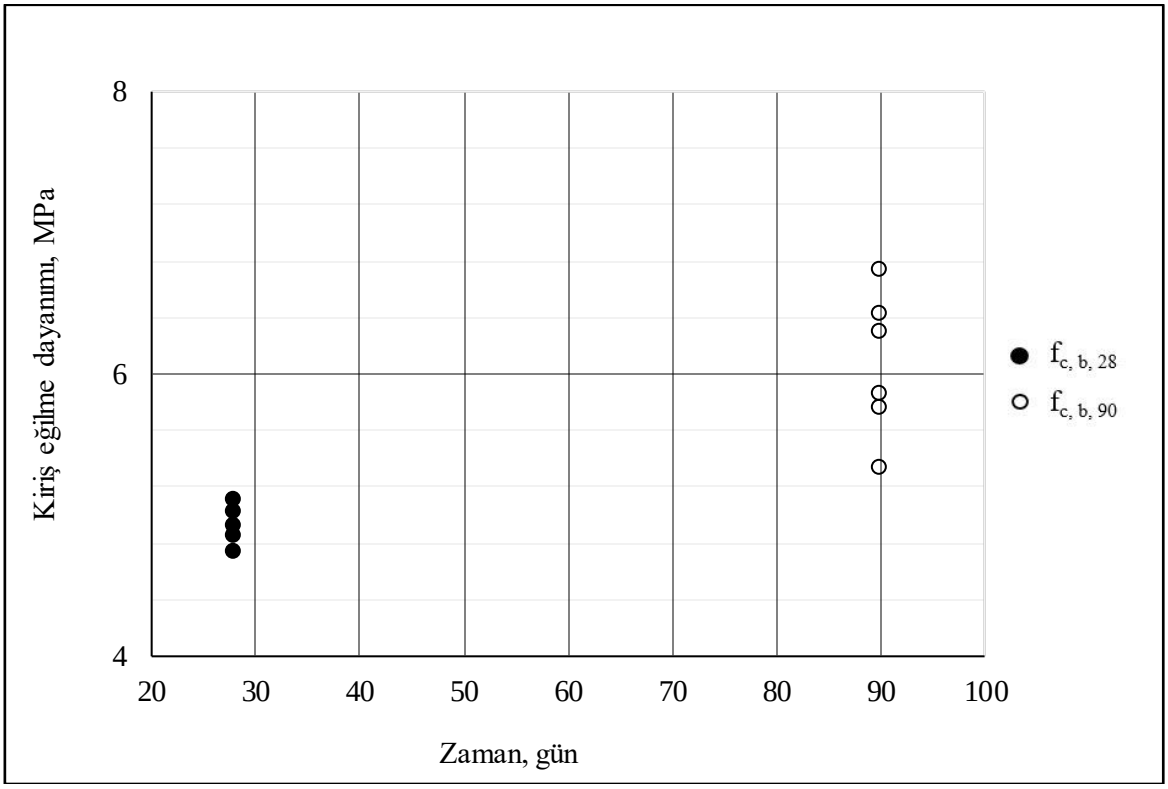
b



c

Resim 4.25. Kiriş eğilme deneyleri: a) Referans numune, b) Ara yüzey elemansız, c) Aderans harçlı ara yüzey

Tek tabaka SSB kiriş numunelerinin 28 ve 90 günlük kiriş eğilme dayanımları Şekil 4.19'da verilmiştir. Şekil 4.19'a göre, 28 günde 4,94 MPa olan kiriş eğilme dayanımı, %23 artarak 90 gün sonrasında 6,08 MPa değerine ulaşmaktadır.



Şekil 4.19. Tek tabaka kiriş numunelerinin kür süresi kiriş eğilme dayanımı ilişkisi

28 gün kürde bekletildikten sonra yürütülen deneylerden elde edilen kiriş eğilme dayanımları Çizelge 4.13'de sunulmuştur. Çizelge 4.13'de görüleceği üzere, tek tabaka kiriş numuneleri ile iki tabaka aderans harçlı ve ara yüzey elemansız numunelerin ortalama kiriş eğilme dayanımları oldukça yakındır. Diğer yandan varyasyon katsayısı tek tabakalı numunelerde en az (3,3) ve ara yüzey elemansız iki tabakalı numunelerde en yüksek (9,2) elde edilmiştir.

Çizelge 4.13. Kiriş eğilme dayanımı değerleri [%CoV değerleri parantez içindedir]

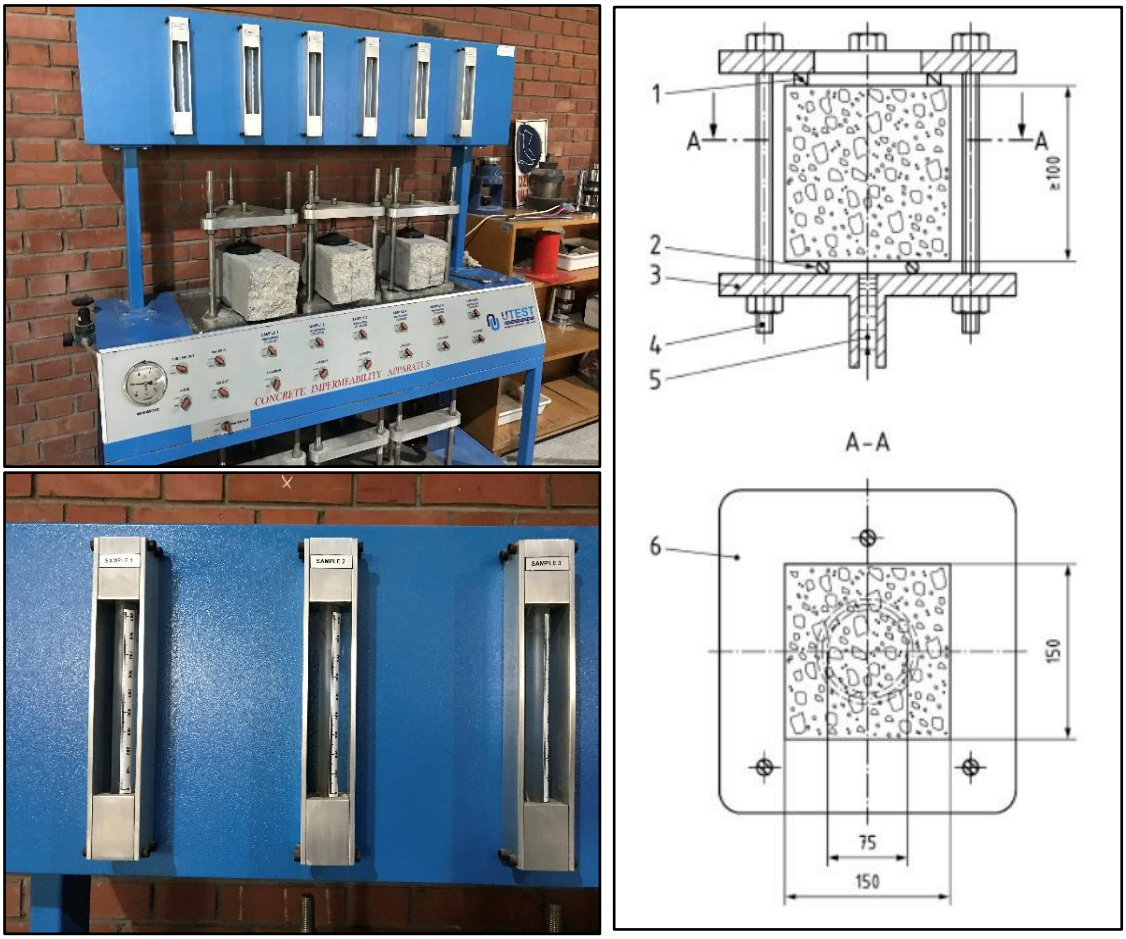
Numune adı	Tanım	Numune yaşı [gün]	Kiriş eğilme dayanımı [MPa]	Ortalama kiriş eğilme dayanımı [MPa]
K-R28-1	Referans	28	5,11	4,94 [3,3]
K-R28-2			5,02	
K-R28-3			4,94	
K-R28-4			4,86	
K-R28-5			4,75	

Çizelge 4.13.(devam) Kiriş eğilme dayanımı değerleri [%CoV değerleri parantez içindedir]

K-Y28-1	Ara yüzey yok	28	4,80	4,48 [9,2]
K-Y28-2			4,41	
K-Y28-3			4,41	
K-Y28-4			4,91	
K-Y28-5			3,86	
K-A28-1	Aderans harçlı ara yüzey	28	4,40	4,57 [5,2]
K-A28-2			4,73	
K-A28-3			4,45	
K-A28-4			4,61	
K-A28-5			4,51	
K-A28-6			4,70	

4.3.4. Basınçlı su işleme derinliği tayini

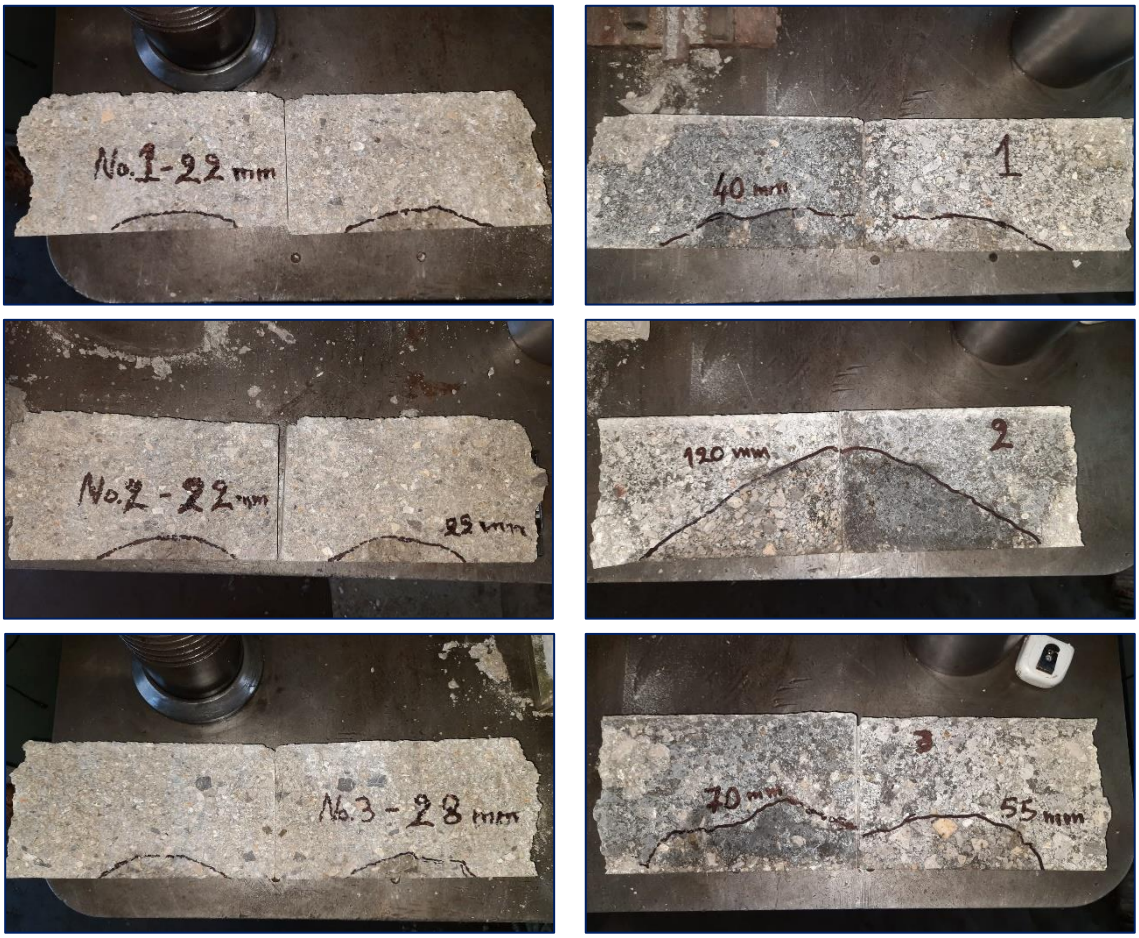
Basınçlı su işleme deneyi, sertleşmiş betonun basınçlı su altında, su işleme derinliğinin belirlenmesine yönelik olup, çalışma kapsamında iki tabaka SSB plağın ara yüzeyindeki su işleme derinliği de araştırılmıştır. Kullanılan deney düzeneği Resim 4.26' da gösterilmektedir.



Resim 4.26. Su işleme derinliği tayini deneyi cihazı

Su işleme derinliği tayini deneyi en az 28 gün kürde bekletilen aderans harçlı ara yüzey elemanlı ve tek tabaka 3' er adet numuneye uygulanmıştır (TS EN 12390-8, 2019). Deneylerde 500 ± 50 kPa basınç 72 ± 2 saat uygulanmıştır. Deney sonrasında numuneler 2 parçaya bölünerek su işleme derinlikleri 1 mm hassasiyetle ölçülmüştür (Resim 4.27).

Resim 4.27'den elde edilen ölçümlere göre su işleme derinliği ara yüzey uygulaması olmayan numunelerde ortalama 24 mm, aderans harçlı ara yüzeyde ise 74 mm düzeylerindedir.



(a) (b)

Resim 4.27. Su işleme derinliği tayini deneyi sonrası (a) ara yüzey elemansız (b) aderans harçlı ara yüzey

5. ARAZİ ÇALIŞMALARI

Silindirle sıkıştırılabilir iki tabakalı beton kaplamaların performansı, ara yüzey ürünleri ve işlemleri uygulanarak laboratuvar ortamında incelenmiş ve aderans harçlı ara yüzeylerin tek tabaka numunelere en yakın sonuçları verdiği bir önceki bölümde gösterilmişti.

Arazi şartlarında inşa edilen tek tabakalı ve iki tabakalı (ara yüzey aderans harçlı ve ara yüzey işlemsiz) kaplamalarda elde edilen karot ve kiriş numuneler üzerinde yürütülen çalışmalar bu bölümde sunulacaktır.

5.1. Arazi Çalışmalarının Lokasyonu

Ankara Büyükşehir Belediyesi yol ağında bulunan ve yapım çalışmaları ihaleli olarak devam eden "Ankara Çubuk, Yazır Mahallesi-Ankara Bulvarı Bağlantı Yolu, Silindirle Sıkıştırılmış Beton Yol Yapım İşi" kapsamında tek tabakalı ve iki tabakalı SSB yol uygulaması yapılmıştır (Resim 5.1).

SSB yol uygulaması kalınlığı 30 cm, CBR%>20 seçme malzeme ve 15 cm temel üzerine yapılmıştır.



Resim 5.1. Uygulama yeri – Çubuk, Yazır Mahallesi yolu (40°10'31.36"K, 33°0'29.87"D)

5.2. Arazide Uygulanan Karışım Tasarımı

Uygulamada kullanılan SSB'nin karışım tasarımında kullanılan malzemelerin özellikleri Çizelge 5.1'de sunulmuştur.

Çizelge 5.1. Agrega fiziksel özellikleri (uygulama aşaması)

Özellik	Standart	Değer
Parçalanma direncinin tayini (Los Angeles Deneyi), %	TS EN 1097-2	25,3
Magnezyum sülfat kütlece kayıp değeri (don mukavemeti), %	TS EN 1367-2	4,55
Yassılık indeksi, %	TS 9582 EN 933-3	8
Su emme, iri agrega (12-22 mm), %	TS EN 1097-6	0,30
Su emme, iri agrega (5-12 mm), %	TS EN 1097-6	0,40
Su emme, ince agrega (0-5 mm), %	TS EN 1097-6	1,24
Doygun yüzey kuru birim hacim ağırlık, iri agrega (12-22 mm), g/cm³	TS EN 1097-6	2,710
Doygun yüzey kuru birim hacim ağırlık, iri agrega (5-12 mm), g/cm³	TS EN 1097-6	2,700
Doygun yüzey kuru birim hacim ağırlık (0-5 mm), g/cm³	TS EN 1097-6	2,690
Metilen mavisi deneyi	TS EN 933-9	1,1

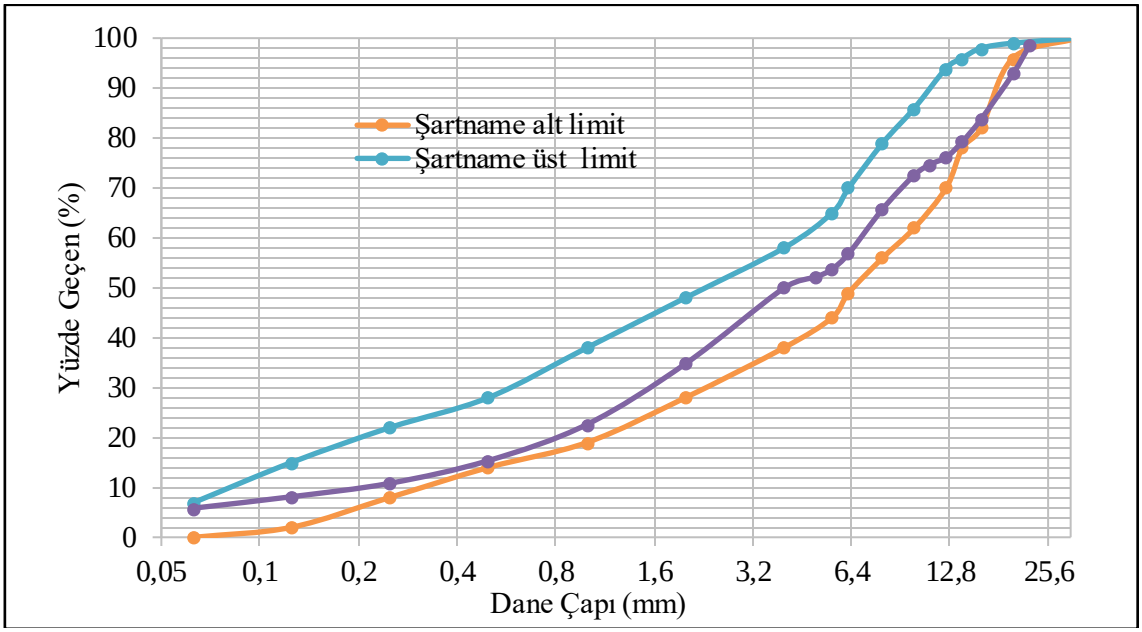
Türkiye'de beton santrallerinde kullanılan agrega menşei olarak kalker (kireçtaşı) yaygındır ve genel olarak üç veya dört agrega grubunda stoklanmaktadır. SSB tasarımlarında ince agrega kullanım oranı %48-58 arasında değişmektedir. SSB karışımlarda genel olarak taze betonda kullanılan agrega grupları kullanılmaktadır.

Kullanılan agrega kalker kayaçtan elde edilmiş olup, 0-5 mm, 5-12 mm ve 12-22 mm olmak üzere üç farklı gradasyonda depolanmıştır. Agregaların elek analizleri yapılmış olup, şartname limitlerine uygun olarak karışım gradasyonu belirlenmiştir (ÇŞB, 2020a). En uygun karışım 0-5 mm agreganın %50, diğer agrega gruplarının ise %25 oranında kullanılmasıyla elde edilmiştir (Çizelge 5.2, Şekil 5.1).

Tasarımda C30/37 beton dayanım sınıfı esas alınmış ve CEM I 42.5 R sınıfı çimento kullanılmıştır. Yukarıda özellikleri verilen agrega ve çimento kullanılarak yapılan tasarım sonucunda beton bileşenleri belirlenmiş ve SSB üretimi yapılmıştır (Çizelge 5.3).

Çizelge 5.2. Agrega elek analizi (uygulama aşaması)

Elek açıklıkları	Agrega grupları elek analizleri			SSB karışım elek analizi		
	(12-25) %25	(5-12) %25	(0-5) %25	Elek üstünde kalan %	Yığışımlı kalan %	Yığışımlı geçen %
22,5	94,5	100	100	0	1,4	98,6
20	71,5	100	100	5,7	7,1	92,9
16	35,3	100	100	9,1	16,2	83,8
14	17,0	100	100	4,6	20,7	79,3
12,5	4,5	100	100	3,1	23,9	76,1
11,2	0,9	98,1	100	1,4	25,2	74,8
10	0,5	89,8	100	2,2	27,4	72,6
8	0,1	63,1	100	6,8	34,2	65,8
6,3	0,1	27,4	100	8,9	43,1	56,9
5,6	0,1	15,4	99,7	3,1	46,3	53,7
5	0,1	10,1	99,2	1,6	47,8	52,2
4	0,1	9,6	95,1	2,2	50,0	50,0
2	0,1	6,3	66,4	15,2	65,2	34,8
1	0,1	6,2	42,1	12,2	77,4	22,6
0,5	0,1	6,2	27,6	7,2	84,6	15,4
0,25	0,1	6,2	18,5	4,6	89,2	10,8
0,125	0,1	6,2	13,1	2,7	91,9	8,1
0,063	0,0	5,7	8,8	2,3	94,1	5,9



Şekil 5.1. Karışım gradasyonu ve şartname limitleri (uygulama aşaması)

Çizelge 5.3. SSB bileşen miktarları (uygulama aşaması)

Beton bileşeni	Değer
Çimento, kg	300
Su, kg	100
İri Agrega (12-25), kg	535
İri Agrega (5-12), kg	535
İnce Agrega (0-5), kg	1070
Su/çimento (s/ç)	0,33
Taze yaş yoğunluk, kg/m³	2540

SSB tasarımı laboratuvarda yapılmaktadır. Laboratuvar şartları ile arazi şartları farklı olduğundan uygulama aşamasında iş yeri karışım tasarımı yapılarak, laboratuvar tasarımının geçerliliği kontrol edilmeli ve sıkışma kontrolüne esas taze yaş BHA değerleri belirlenmelidir. Bununla birlikte SSB üretildikten sonra serim yerine kamyonlarla taşınmaktadır. Taşıma mesafesi ve hava sıcaklığına bağlı olarak santraldeki kıvamı ile arazideki kıvamı arasında farklılıklar oluşmaktadır. Burada dikkat edilmesi gerekli en önemli konulardan biri, SSB'nin arazi koşullarına uygun kıvamı verecek şekilde üretimin yapılmasıdır. Aksi takdirde arazide istenilen sıkışma ve/veya yüzey düzgünlüğü sağlanamayacaktır. Bu nedenle uygulama aşamasında su içeriği 100-120 kg arasında değişiklik göstermiştir.

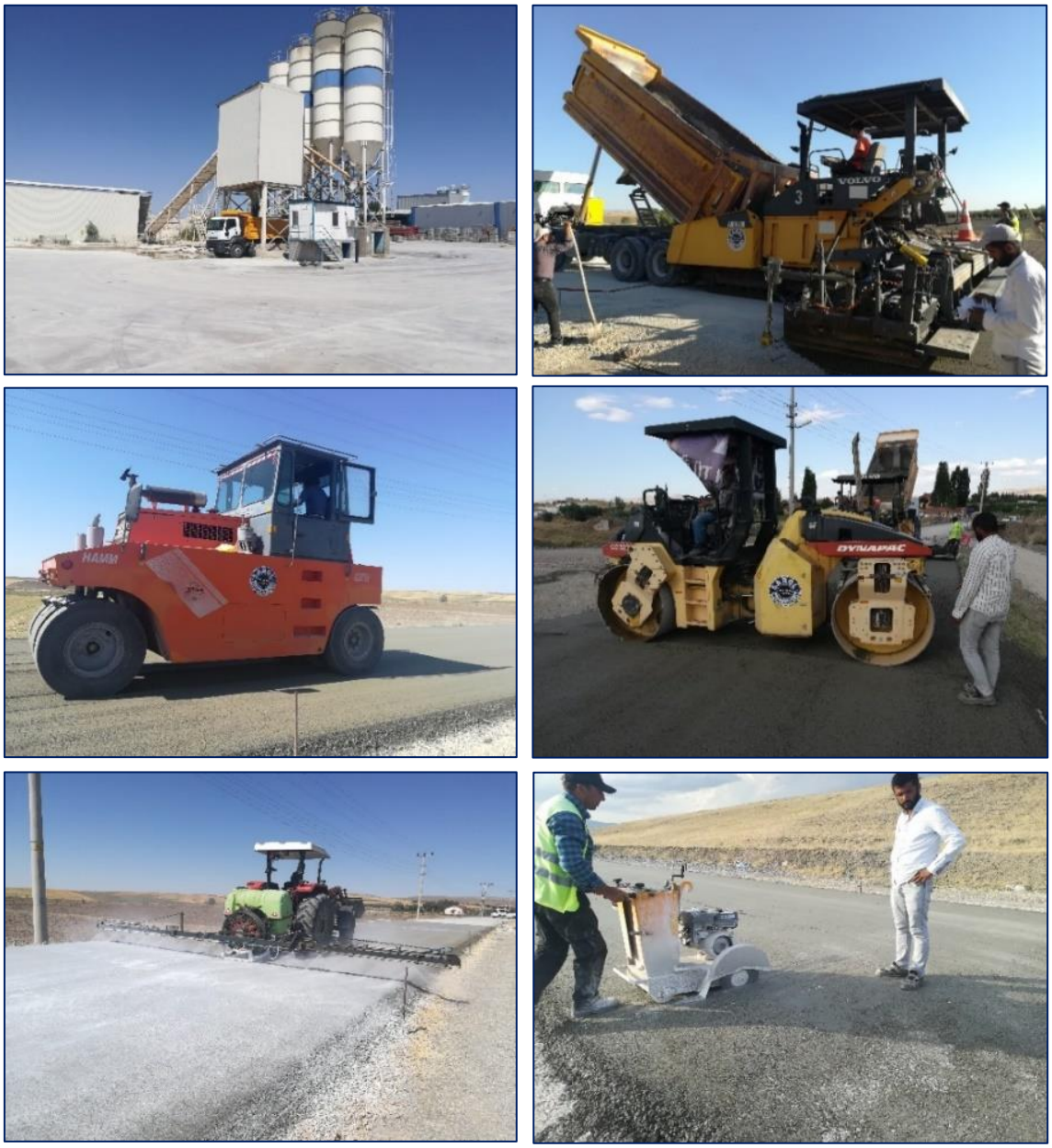
5.3. Beton Santrali ve Serme Sıkıştırma Ekipmanları

SSB beton santralinde üretilir, kamyonlarla taşınır, finişer ve silindirler kullanılarak serilir ve sıkıştırılır. Kür ve derz kesim işlemleri için ayrı ekipmanların kullanılması gerekmektedir. Uygulamada kullanılan ekipmanlar Çizelge 5.4 ve Resim 5.2'de verilmektedir.

Uygulamada, beton santralinin kapasitesi oldukça önemli olup, finişerin sürekli serim yapmasını sağlayacak şekilde SSB üretimi yapmalıdır. Aksi takdirde finişerin serim için beklediği süre içerisinde finişer tablası altında kalan ve henüz sıkıştırma işlemi başlamamış SSB prizini almaya başlamakta ve sonrasında istenilen sıkışmayı sağlamakta zorlanılmak ve bu kesimlerde ondülasyonlar olmaktadır.

Çizelge 5.4. Ekipman listesi

Ekipman	Adet
Beton santrali (SSB üretimi), 90 m³/sa	1
Elektronik duyargalı finişer	1
Lastik tekerlekli (pnömatik) silindir, 8.265 kg ağırlığında	1
Demir bandajlı (tandem) silindir, 32 kg/cm statik çizgisel yük	1
Derz Kesme Makinesi	2
Traktör (kür tankı ile birlikte)	1
Kazıcı-Yükleyici	1
Arazöz	2
Damperli kamyon	7



Resim 5.2. SSB uygulamasında kullanılan makina ve ekipmanlar

Diğer yandan SSB bileşenlerinin homojen olarak karıştırılabilmesi için, santral mikserinde karıştırma süresinin yaş beton üretiminden daha fazla olması (45-50 s) gerekmektedir. Bu durum santralin üretim kapasitesini %20-30 oranında düşürmektedir. Tüm bu koşullar göz önünde bulundurularak, SSB üretiminde kullanılacak beton santrali dikkatli bir şekilde belirlenmelidir. Uygulamada, taşıma mesafesi 15 km olup, santral mikserinde karışım süresi 50 saniye belirlenmiş ve 7 adet kamyon kullanılarak SSB'nin sürekli serimi sağlanmıştır.

Santral seçiminde dikkat edilmesi gereken bir diğer konu ise; SSB'nin kıvamının yaş betona göre çok daha düşük olması nedeniyle, santralin beton boşaltma hunisinde tıkanmalar

olabilmekte, üretimde duraksamalara yol açmaktadır. Bu nedenle, huni çevresine vibrasyon takılarak sorun giderilmelidir. Uygulama aşamasında huni çevresine iki adet vibratör yerleştirilmiş ve tıkanmaların önüne geçilmiştir.

SSB kuru kıvamlı bir beton olduğundan ve asfalt finişerleri ile serildiğinden, yaş beton gibi transmikser ile taşınmaz ve pompa ile dökülmez. Taşıma için kamyonlar kullanılır. SSB taşımasında kullanılan kamyonların damper temizliğinin yapılması ve nakliye sırasında SSB'nin hidratasyonu için gerekli karışım suyunu kaybetmemesi için üzerinin brandalarla kapatılması tercih edilmelidir. Uygulama aşamasında bu duruma dikkat edilmiştir.

SSB seriminde kullanılan finişerin serim yapılırken, %80-90 arasında sıkıştırma sağlaması, hedef sıkışmaya ulaşılması yanısıra, silindiraj sırasındaki yüzey kusurlarını da azaltmaktadır. Yüksek yoğunluklu sıkıştırma ekipmanlı finişerlerin kullanılması, bu sorunları büyük ölçüde ortadan kaldırmaktadır. Bu doğrultuda, uygulama öncesi uygun serim hızı, tabla ve bıçak ayarları yapılmıştır.

SSB sıkıştırılmasında ülkemizde, lastik tekerlekli ve demir bandajlı silindirler kullanılmaktadır. Finişerin yüksek yoğunluklu sıkıştırma düzeneğine sahip olması durumunda ise sadece demir bandajlı silindir kullanımı yeterli olmaktadır (Zollinger, 2019).

SSB içerisindeki su miktarı az olduğundan sıkıştırma sonrası beton içerisindeki suyun buharlaşmasını engellemek için kür uygulanmalıdır. Kür için su ve kimyasal kür malzemeleri kullanılmaktadır. Uygulanmada her iki kür işlemi de kullanılmıştır.

SSB yollarda doğal derz oluşum süresi ve aralıkları çevre iklim koşullarına göre değişiklik göstermektedir. Doğal derz oluşumuna izin verilmeden kontrollü enine ve boyuna derzlerin zamanında oluşturulması gerekmektedir. Derz kesimi için derz kesme makineleri kullanılmakta olup, bıçaklarının körelmemiş olması, derz yan yüzeylerinin kırılmadan derzin oluşması açısından son derece önemlidir. Derz işçiliğinin iyi olması beton yolun uzun ömürlü olmasını sağlayan önemli bir kriterdir.

5.4. Uygulama Aşamaları

5.4.1. SSB serimi yapılacak yüzeyin hazırlanması

SSB serimi öncesi üstyapı tabanı ve temel tabakası proje kotlarına uygun şekilde serilip, projesine uygun kalınlıkta sıkıştırılmalıdır. SSB serimi öncesinde ise, temel yüzeyi mutlaka rutubetlendirilmelidir. Bu durum hava sıcaklığının yüksek olduğu dönemlerde SSB içerisinde hidratasyon için gerekli suyun azalmaması açısından ayrıca önem arz etmektedir. Aksi takdirde betonda uzun dönemde dayanım sorunları yaşanabilecektir. Uygulama öncesi taban zemini yukarıdaki açıklamalara dikkat edilerek hazırlanmıştır.

5.4.2. SSB üretilmesi ve nakli

Beton santralinde SSB üretimi yapılırken malzemenin homojen karışmasına dikkat edilmiştir. Santralin mikserinde her defasında 1,7 m^3 beton üretilip, kamyonlara yüklenmiştir. Her kamyona 8 defa yükleme yapılmış olup, toplam 13,6 m^3 beton yüklenmiştir. Yüklemenin kamyonun ön, orta ve arka tarafına dengeli bir biçimde yapılmasına dikkat edilmelidir.

Beton santrali ile SSB yapılacak yol arası 15 km, kamyon sayısı ise 7 adettir. 1 adet kamyonun santrale yanaşması, betonun yüklenmesi, serim yerine nakli ve finişere yanaşarak betonu boşaltması ile santrale geri dönmesi 55 dakika sürmüştür. Santral ortalama 80 m^3/sa kapasite ile çalışmıştır. Bu durumda 10-12 dakikada bir adet kamyon SSB finişerle serime girmiştir. Bu istenilen bir kapasite olup, uzun süre finişerin serim için beklemesi engellenmiştir.

5.4.3. SSB serimi ve sıkıştırılması

SSB kaplama seriminde kullanılacak finişerlerin yüksek sıkıştırma teknolojisine sahip tablaya sahip olması, konforlu, yan yüzeyleri dâhil iyi sıkışmış kaplama elde etmek için önemlidir. Geleneksel finişer tablaları ile ilk serimde %80-90 arası sıkışma elde edilirken, yüksek donanımlı titreşimli tabalar ile bu oran %98'lere yaklaşmaktadır.

SSB 7 metre genişliğinde serilmiştir. Serme sırasında malzemenin homojen dağılmasına dikkat edilmiş, sabit hızla serim yapılmıştır. Kamyonların yanaşırken finişere çarpmamalarına özen gösterilmiştir.

Taze beton kaplama üzerinde çalıştırılacak silindirlerin pas sayısı arazide sürekli sıkışma ölçümleri alınarak belirlenmelidir. Silindirlerin sabit azami 5 km/sa hızla hareket etmesi, kaplama üzerinde ani duruş ve kalkış yapmamaları, ayrıca sıkışmamış kaplama üzerinde uzun süre sabit bekletilmemesi önemlidir. Bu hususlar SSB kaplamaların konforunu olumsuz etkilemektedir.

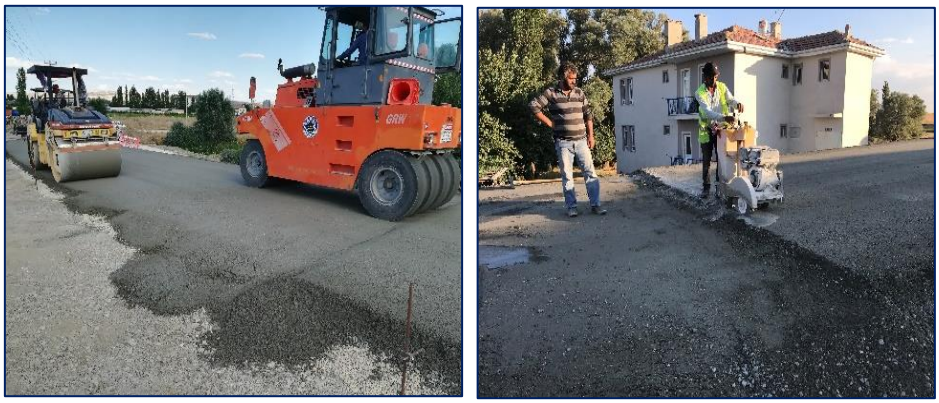
Sıkıştırma işlemi finişerin hemen arkasında başlatılmış olup, ilk olarak lastik tekerlekli silindir kullanılmıştır. Hemen arkasından demir bandajlı silindir ile sıkıştırma devam etmiştir. Sıkıştırma işlemi sırasında silindirlerin aynı izden gidip gelmeleri, sıkışması tamamlanmamış kesimlerde uzun süre bekleme yapmamalarına dikkat edilmiştir. 3 pas lastik tekerlekli silindir, 3 pas demir bandajlı silindir çalıştırılmış olup, demir bandajlının 2 pasında vibrasyon uygulanmıştır. Sıkıştırma tekniği, finişerin serim sıkılığı, silindirlerin ağırlığı, SSB'nin kalınlığı, su içeriği ve hava sıcaklığına bağlı olarak ayarlanmalıdır. Tek tabaka SSB 18 cm kalınlığında serilmiş, sıkıştırma sonrası 15 cm SSB plak elde edilmiştir. İki tabaka SSB yapılan kesimlerde ise tabakalar 12 cm kalınlığında serilmiş ve sıkışmış 10 cm kalınlıkta SSB plaklar elde edilmiştir.

SSB yan yüzeylerinin sıkıştırılması için uygulamada genel olarak, demir bandajlı silindir tamburuna takılan özel ekipman, el kompaktörü ve el tokmağı kullanılmaktadır.

Uygulamada el tokmakları kullanılmış olup, demir bandajlı silindirin son pasından sonra SSB yan yüzeyleri sulanmış ve el tokmakları ile sıkıştırılmıştır.

5.4.4. İki tabaka SSB uygulamasında aderans harcının kullanımı

İlk tabaka SSB serme ve sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, ikinci tabaka SSB uygulamadan önce, finişerin oturacağı yüzey derz makinesi ile kesilerek hazırlanmıştır (Resim 5.3).



Resim 5.3. Birinci tabaka SSB serimi ve yapım derzi oluşturulması

Birinci tabaka SSB yüzeyine 2 kg/m² aderans harcı fırça yardımıyla homojen olarak uygulanmıştır. Sonrasında ikinci tabaka SSB serme ve sıkıştırma işlemi yapılarak imalat tamamlanmıştır (Resim 5.4). İkinci tabaka, birinci tabaka uygulamasından 5 saat sonra yapılmıştır.



Resim 5.4. Aderans harcı uygulaması ve ikinci tabaka SSB serimi

5.4.5. Kür işlemleri

Uygulama 2020 yılı Ağustos ayında yapıldığından sahada hava sıcaklığı 32 °C olarak kaydedilmiştir. Bu gibi yüksek sıcaklıkların olduğu günlerde betonun kürü için kimyasal kür

malzemesinin kullanılması gerekli görülmektedir. Aksi takdirde SSB rutubetini hızlı kaybetmekte ve yol yüzeyinde istenmeyen tozumalar ve agrega sökülmeleri oluşmaktadır. Betonun kür koşullarının sağlanmaması durumunda hedeflenen dayanıma ulaşılamayacağı bilinmektedir. Betonun hidratasyonu için gerekli olan suyun beton yüzeyinden buharlaşmasını engellemek amacıyla uygulamada parafin içerikli kür malzemesi 350 gr/m² miktarda kullanılmıştır (Resim 5.5). Ayrıca 7 gün boyunca kimyasal kür uygulanmayan yerlerden su kaybı olmaması için ilave olarak su kürü uygulamaya devam edilmiştir (Resim 5.5).



Resim 5.5. Kür uygulanması

5.4.6. Derz işlemleri

Genel olarak, SSB kaplamaların enine derz aralıklarının belirlenmesine yönelik kabul edilmiş bir yöntem bulunmamaktadır. SSB kaplamalarda, geleneksel beton kaplamalara göre enine derz aralıkları daha fazladır. Bununla birlikte SSB plak kalınlığı 20,3 cm den az ise, enine derz aralıkları 4,6-6,1 m aralığında seçilmektedir (Harrington ve diğerleri, 2010). Çalışma yapılan kesimde 6,0 m aralıklarla enine derz oluşturulmuştur (Resim 5.6).

Derz kesme işlemi sıkıştırma işlemi tamamlandıktan 6-12 saat içerisinde tamamlanmıştır.



Resim 5.6. Derz kesilmesi işlemi

SSB yollarda yatay ve düşey drenaj yapılarının (hendek, büz, menfez vb.) tesis edilmesi son derece önemlidir. Drenaj tedbirleri yol üstyapı tabanı ve gövdesini oluşturan kısımlarda suyun uzaklaştırılmasını sağlamaktadır. Drenaj yapılarının oluşturulmaması ve suyun SSB yol gövdesine girmesi halinde, beton yolun taşıma kapasitesi ve ömrü azalacak, bozulmalar meydana gelecektir. Uygulama alanında etkin drenaj tedbirleri alınmıştır.

5.4.7. SSB imalatın kalite kontrol çalışmaları

SSB sıkıştırma işleminde dikkat edilen en önemli kriterlerden biri rölatif sıkılık değerleridir. Her iki tabakanın da kabul edilebilir sınırlar içerisinde sıkıştırılması, karşılaştırmanın sağlıklı olması açısından önemlidir. SSB uygulama sonrasında aşağıda belirtilen metotlar kullanılarak sıkışma kontrol testleri yapılmıştır (Resim 5.7).

- Kum Konisi Metodu (ASTM D1556M-15, 2016)
- Elektromanyetik yöntem (ASTM D7830M-13, 2015)

SSB kaplamaların sıkışma kriteri rölatif sıkılığın %96 ve üzerine ulaşması olarak önerilmektedir. Uygulamada yeterli sıkışmanın sağlanamaması durumunda gereğinden fazla boşluklu beton kaplama içerisine, proje ömrü boyunca su girişleri ve donma çözülme sonucu kaplamada dayanım kayıpları olması muhtemeldir.

Tek tabaka SSB'nin yapıldığı lokasyondaki sıkışma testleri sonuçlarına göre ortalama rölatif sıkılık %98,1 olarak tespit edilmiştir. İki tabakalı SSB'nin uygulandığı kesimlerden ölçülen hem alt tabakanın hemde üst tabakanın rölatif sıkılık değerleri Çizelge 5.5'de sunulmuştur.

Her ölçüm noktasında, her iki SSB tabakasında enine yönde hat boyunca sağ ve sol şeritte olmak üzere ikişer adet ölçüm alınmıştır.

İki tabaka SSB plak yapılan kesimlerde alt ve üst tabakalarda ortalama sıkışma oranları %98'in üzerinde elde edilmiştir.

Çizelge 5.5. İki tabakalı SSB uygulamasının rölatif sıkılıkları

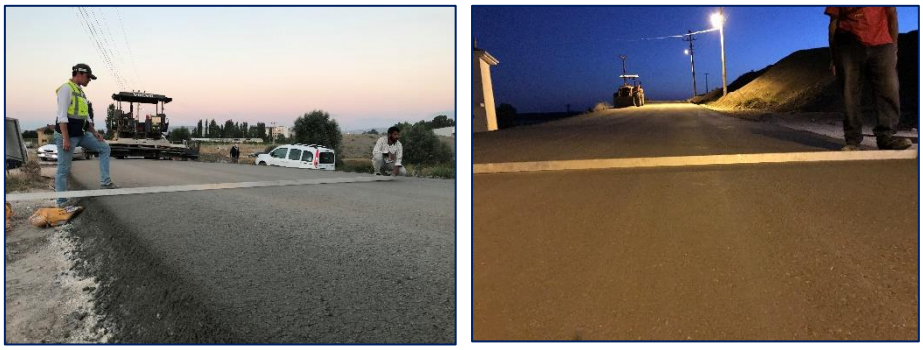
Şerit no	Rölatif sıkılık (D_r), %	
	Birinci (alt) tabaka	İkinci (üst) tabaka
sağ	98,3	99,7
sol	97,4*	99,1*
sağ	99,2	98,1
sol	98,3	98,2
sağ	99,3*	98,9*
sol	96,7	99,7
sağ	98,1	97,2
sol	98,7	98,5
Ortalama	98,3	98,6

*(*kum konisi metodu)*



Resim 5.7. Sıkışma kontrol ölçümleri (a) Kum konisi testi (b) Elektromanyetik test

Yol yüzeyinin düzgünsüzlük ölçümleri 5 m lik mastar kullanılarak yapılmıştır. Mastar tüm kesimlerde yol ekseni doğrultusunda ve yol eksenine dik yönde yerleşitilmiştir.Mastarın yola temas eden herhangi iki noktası arasındaki bölümde, mastarla yol yüzeyi arasındaki açıklık 10 mm nin altında ölçülmüştür (Resim 5.8).



Resim 5.8. Yol düzgünsüzlüğünün 5 m'lik mastarla ölçümü

5.5. Karot Çalışmaları ve Deneyleri

İki tabaka SSB yol uygulaması üzerinden yaklaşık 1 yıl geçtikten sonra, 08.06.2021 günü uygulama alanından silindirik karot ve kiriş numuneleri alınarak üzerinde basınç dayanımı ve kiriş eğilme deneyleri yürütülmüştür.

Karot alma çalışmaları yol taşıt trafiğine kapatılıp, trafik güvenliği önlemleri alındıktan sonra gerçekleştirilmiştir. Açılı silindir karot numuneleri için açılı karot alma ekipmanı kullanılmıştır. Kiriş numunelerinin alınması için, derz kesme makinesi kullanılmıştır.

5.5.1. Açılı silindir karot alma çalışmaları ve basınç dayanımı deneyleri

İki tabaka arasındaki bağ performansını ölçmek için 45° açılı numuneler alınmıştır (Şekil 5.2). Bölüm 4'de tartışıldığı üzere, maksimum kayma gerilmesi yatayda 45° açı yapan düzlemde oluşmaktadır. Dolayısıyla, hem tek tabakalı hemde iki tabakalı SSB tabakalarından (aderans harç uygulamalı ve uygulamasız) ikişer adet olmak üzere toplam 6 adet 13 cm çapında silindirik numune alınmıştır (Resim 5.9).

İki tabaka ara yüzey elemansız SSB uygulanan kesimden alınan karotta tabakalar birbirinden ayrılmıştır (Resim 5.9). Bu durum tabakalar arası bağın numune alımı sırasında yük aktarımında zayıf kaldığı ve karot bıçağının titreşimiyle birbirinden ayrıldığı olarak yorumlanmıştır. Diğer kesimlerden alınan karotlar tek parça olarak alınmıştır (Resim 5.10).

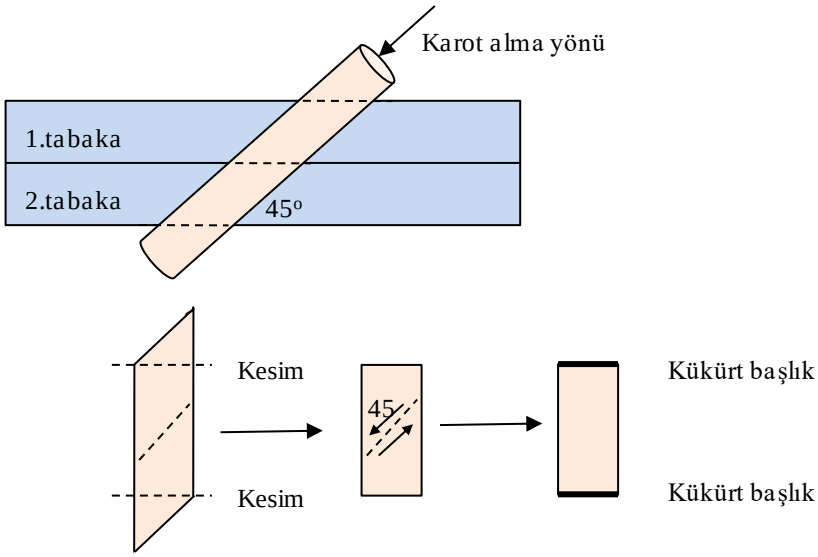


(a) **(b)**

Resim 5.9. 45º açılı karot alma çalışmaları (a) numune alımı (b) ara yüzey uygulamasız iki tabaka numune



Resim 5.10. Aderans harçlı iki tabaka SSB karot alım aşamaları



Şekil 5.2. Açılı karot numune alımı ve basınç dayanımı deneyine hazırlanmasının şematik gösterimi

Şekil 5.2'de belirtildiği şekilde hazırlanan karot numunelerin (Resim 5.11) eğimli kesme deneyleri basınç dayanım test cihazı kullanılarak yapılmıştır. Yük numune kırılıncaya kadar, 0,25±0,05 MPa/s sabit hızla, darbe etkisi oluşturmadan gerilme kontrollü olarak uygulanmıştır (ASTM C39M-18, 2021). Deney sonuçları Çizelge 5.6'da verilmektedir.

Çizelge 5.6. SSB yol uygulamasından alınan numunelerin basınç dayanım değerleri

Numune kodu	Numune yaşı (gün)	Basınç dayanımı (MPa)	Ortalama basınç dayanımı (MPa)	Kırılma şekli
Tek tabaka SSB [T-1]	313	34,28	31,80	Tip-1
Tek tabaka SSB [T-2]	313	29,31		Tip-1
İki tabaka, aderans harçlı SSB [A-1]	313	26,68	31,15	Tip-1
İki tabaka, aderans harçlı SSB [A-2]	313	35,62		Tip-1



Resim 5.11. Basınç dayanımı deneyi için hazırlanan karot numuneleri

Ara yüzey elemansız iki tabaka SSB'de tek parça karot alınamadığından eğimli kesme deneyi yapılamamıştır. Tek tabaka SSB yapılan kesimde eğimli kesme dayanım değerleri 29,31-34,28 MPa arasında değişmekle birlikte ortalama 31,8 MPa olarak belirlenmiştir

(Çizelge 5.6). Aderans harçlı ara yüzeyli kesimde ise bu değer 26,68-35,62 MPa arasında ve ortalama 31,15 MPa olarak kaydedilmiştir (Çizelge 5.6). Aderans harcı iki tabaka arasında bağ işlevini gerçekleştirerek tek tabaka dayanım performansı sağlamaktadır.

5.5.2. Kiriş karot alma çalışmaları ve kiriş eğilme deneyleri

Tek ve iki tabakalı SSB yol üzerinden 08.06.2021 tarihinde 15x15x60 cm³ boyutlarında her kesimden ikişer adet olmak üzere toplam altı adet kiriş numunesi alınmıştır. İki tabaka SSB yolun bulunduğu kesimlerden numune alınırken temel tabakası ile SSB tabakasını birbirinden ayırmak için dikkatli davranılmıştır. Resim 5.12'de kullanılan ekipman ve kiriş numune alma işlemleri görülmektedir.



Resim 5.12. Kiriş karot ekipmanları ve kiriş numune alma işlemleri

Kiriş numuneleri başarıyla alındıktan sonra, hem kiriş numunelerinin yüzeyleri hem de numunenin alındığı kesit yüzeyleri (Resim 5.13) gözlemsel olarak incelenmiştir. SSB yüzeylerinde agreganın homojen olarak dağıldığı tespit edilmiştir. Kiriş elemanların yüzeylerinde herhangi bir boşluk veya çatlak gözlenmemesi sıkıştırma işleminin sağlıklı yapıldığına işaret etmektedir. SSB beton tabakaları aderans harçlı ve ara elemansız kesimlerde tek parça olarak alınmıştır.



Tek tabaka SSB | İki tabaka, aderans harçlı SSB | İki tabaka ara yüzey elemansız SSB

Resim 5.13. Kiriş numuneleri alındıktan sonra SSB yan yüzeyleri

Alınan kiriş numuneleri üzerinde kiriş eğilme dayanımı deneylerinin yapılabilmesi için özellikle temel ile birleşen yüzeylerinin düzeltilmesi gerekmiştir. Bu amaçla kirişler, hassas taş kesme makinasıyla, 15x60x60 cm boyutlarında kesilerek deneye hazır hale getirilmiştir. İki tabakalı ara yüzey elemansız kiriş numuneleri dâhil bu işlemler sırasında tabakalar arasında hiçbir ayrılma olmamıştır (Resim 5.14).



Resim 5.14. Kiriş numunelerinin deney için hazırlanması

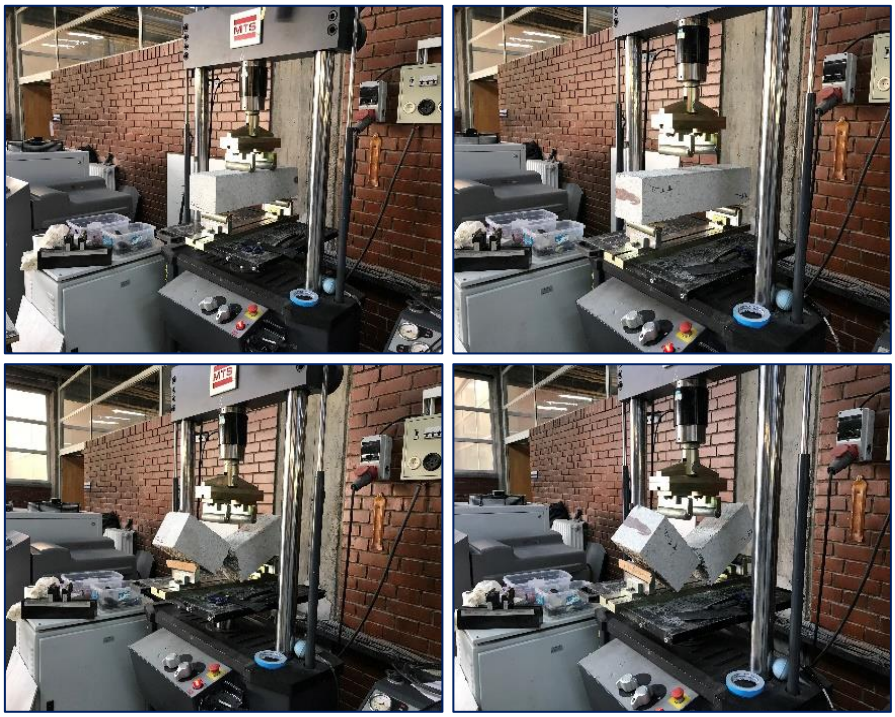
Dört nokta kiriş eğilme dayanımı deneyleri Landmark 250 kN model servo hidrolik MTS cihazı ile yapılmıştır. 15x15x60 cm boyutlarında hazırlanan kiriş numuneleri eğilme dayanım deneyleri deplasman kontrollü olarak yapılmış olup yükleme hızı 0,5 mm/dk olarak alınmıştır (ASTM C78M-18, 2021). Dört nokta kiriş eğilme dayanımı değerleri Çizelge 5.7'de, deney numunelerinin yenilme şekilleri ise Resim 5.15, Resim 5.16 ve Resim 5.17'de sunulmuştur.

Çizelge 5.7. Kiriş eğilme dayanımı değerleri

Numune adı	Numune yaşı (gün)	Kiriş eğilme dayanımı (MPa)	Ortalama kiriş eğilme dayanımı (MPa)
T-K1	313	4,17	4,09
T-K2	313	4,02	
A-K1	313	4,10	4,03
A-K2	313	3,95	
Ç-K1	313	1,99	2,21
Ç-K2	313	2,44	

Kiriş eğime dayanımı deney sonuçlarına göre; tek tabaka kiriş numuneleri ile iki tabaka aderans harcı ara yüzeyli kiriş numuneleri, birbirine çok yakın eğilme dayanım değerleri vermiştir. Bu durum silis dumanlı polimer modifiye aderans harcı yüzey elemanının tabakalar arası yük transferini sağlıklı bir biçimde sağladığını göstermiştir.

Diğer yandan, ara yüzey elemansız iki tabaka kiriş numunelerin eğilme dayanımı yaklaşık %50 azalmıştır. Deney sırasında tabakaların birbirinden ayrıldığı gözlemlenmiştir. (Resim 5.17).



(a) **(b)**

Resim 5.15. Tek tabaka SSB numuneleri kiriş eğilme deneyleri (a) T-K1 numunesi (b) T-K2 numunesi



(a) **(b)**

Resim 5.16. Aderans harçlı iki tabaka SSB numuneleri kiriş eğilme deneyleri (a) A-K1 numunesi (b) A-K2 numunesi



(a) **(b)**

Resim 5.17. Ara yüzey elemansız iki tabaka SSB numuneleri kiriş eğilme deneyleri (a) Ç-K1 numunesi (b) Ç-K2 numunesi

Kiriş eğilme dayanımı deneyi sonrası numuneler gözle incelenmiştir. Tek tabaka ve aderans harçlı iki tabaka numunelerin kırılma şekilleri benzerdir (Resim 5.18a). Ara yüzey elemansız iki tabaka kiriş numunelerinde tabakalar arası kademe oluşarak ayrılma gözlenmiştir (Resim 5.18b).



(a) **(b)**

Resim 5.18. Kiriş eğilme dayanımı sonrası numuneler

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında, günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) yol kaplamalarının, Türkiye için önemi teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilmiş, iki tabaka halinde yapılan SSB kaplamaların tabakalar arası bağ performansının incelenmesi amacıyla, laboratuvar ve arazi çalışmaları yürütülmüştür. Çalışma sonucu elde edilen bulgular, sonuç ve öneriler aşağıda verilmektedir.

6.1. SSB Yolların Türkiye İçin Önemi

SSB yol kaplamaları, yola serilmesi ve sıkıştırılmasında esnek üstyapı yapımında kullanılan ekipmanların kullanılabilirliği, geleneksel beton kaplamaların aksine kalıp ve donatı kullanılmadan hızlı yapılıp, kısa sürede trafiğe açılabilmesi, düşük geçirgenliği ile donma-çözülme döngüsüne dayanıklı olması ve ekonomik olarak inşa edilmesi nedeniyle yaygınlaşan ve gelişme gösteren bir yol yapım teknolojisidir.

Günümüzde, Türkiye'de genelde yerel yönetimlerde oldukça yaygın kullanılmaya başlanılmış, kamu kurumları tarafından teknik şartname ve birim fiyatları yayınlanmıştır (ÇŞB, 2020a; ÇŞB, 2021). Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) yol ağının il yollarında, aynı projelendirme kriterleri, trafik ve taban zemini tasarım koşulları altında SSB üstyapı ile bitümlü sıcak karışım (BSK) üstyapıların ilk yapım maliyetleri karşılaştırılmıştır.

Çalışma bulgularına göre; SSB yol üstyapıları BSK yol üstyapılarına göre daha ekonomiktir. 20 yıl proje süresi için, SSB yol üstyapı maliyetleri, BSK üstyapı maliyetlerine göre ortalama %33 daha düşük iken, proje süresinin 30 yıla çıkmasıyla bu oran %38'e ulaşmaktadır.

Trafik hacmi arttıkça SSB yol üstyapıların ekonomiklik oranı artmaktadır. Tüm proje sürelerinde ve düşük yoğunlukta trafik hacimlerinde ortalama %27,5 olan ekonomiklik oranı, yüksek yoğunlukta trafik hacimlerinde %43,5 olmaktadır.

Zayıf, orta ve yüksek dayanımlı taban zeminlerinde yapılan tasarımlarda; SSB üstyapılar, BSK üstyapılara göre ortalama %35,6 daha ekonomik olarak yapılabilmektedir.

SSB üstyapı tasarımlarında temel ve alttemel tabakaları toplam kalınlığı 30 cm iken, BSK üstyapılarda 30-40 cm arasında değişmektedir. Bu durum SSB kaplamaların trafik yükleri altında rijit davranarak, plağın her noktasında alt tabakalara yük aktardığını göstermektedir. Esnek üstyapılar ise trafik yüklerini taban zeminine aktarma davranışları açısından, daha kalın alttemel ve temel tabakalarına ihtiyaç duymaktadır.

Türkiye'nin çimento sektöründe uluslararası ölçekte önemli rolü, beton ve çimento tesislerinin kolay ulaşılabilir olması, SSB kaplamaların hızlı ve ekonomik inşa edilmesi ile çevre, iklim koşullarına dayanıklı olması, esnek yol üstyapılarına (BSK) alternatif olarak değerlendirilmesi gerektiği göstermektedir. Donatı maliyetinin çok az olduğu SSB kaplamaların, özellikle bitümlü bağlayıcı fiyatlarının yüksek olduğu ve/veya temininde zorluklar yaşanan dönemlerde, hafif trafikli yol kesimlerinde önemli bir alternatif olduğu görülmektedir.

6.2. Laboratuvar Çalışmaları Sonuçları

İki tabakalı SSB kaplamalar arası bağ performansının değerlendirilmesi amacıyla yapılan laboratuvar çalışmaları kapsamında; SSB karışım tasarımının yapılması, numune hazırlama prosedürlerinin oluşturulması, performans deneylerinin yapılarak farklı ara yüzey eleman/işleminin değerlendirilmesi aşamaları izlenmiş olup, elde edilen bulgular aşağıda verilmektedir.

Rölatif sıkılığın artmasıyla (%86'dan %94'e), SSB basınç dayanımlarında çarpıcı bir şekilde artış (24 MPa'dan 40 MPa'ya) gözlenmektedir. Bu durum özellikle arazi uygulamalarında SSB'nin yeterince sıkıştırılmasının ne kadar önemli olduğunu, daha uzun ömürlü SSB kaplamaların inşa edilmesinde sıkıştırmanın önemli bir parametre olduğunu göstermiştir.

SSB kaplamaların su içeriği işlenebilirlik özeliklerini doğrudan etkilemektedir. SSB kaplamalar, finişerle serilebilecek ve silindir altında dağılmayacak kıvamda olmalıdır. Çalışma kapsamında en yüksek basınç dayanım değerleri, 27-43 saniye arasındaki Vebe süresinde elde edilmiştir.

Silis dumanı ve aderans inhibitörü içeren polimer ile modifiye edilmiş tek bileşenli aderans harcı kullanılarak hazırlanan numunelerin basınç dayanımı ve kiriş eğilme dayanımları, tek

tabaka numuneye yakın değerler verdiğinden, aderans harcının ara yüzey elemanı olarak kullanılabileceği görülmüştür. Aderans harçlı iki tabakalı SSB kaplamaların, eğimli kesme deneyinde tabakalar arası yük aktarımı sağladığı ve kırılma şekillerinin kabul edilebilir olduğu gözlemlenmiştir.

Epoksi esaslı çift kompenantlı ara yüzey malzemesi kullanılarak hazırlanan iki tabaka SSB kaplamaların basınç dayanımları (28 günlük 37,5 MPa), tek tabaka değerinin (28 günlük 43,3 MPa) %87'sine ulaşmakla beraber, numunelerin kırılma şekilleri kabul edilebilir değildir. Yük altında tabakalar arası yüzeyde ani kayma şeklinde yenilme oluşmuştur.

Asfalt tabakaları arasında bağ dayanımını sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılan bitüm emülsiyonu yapıştırma malzemesi, SSB kaplama tabakaları arasında olumsuz etki yapmış, ayırıcı bir ara yüzey elemanı olarak davranış göstermiştir. Bitüm emülsiyonu yapıştırıcı malzemelerinin SSB tabakaları arasında bağ elemanı olarak kullanılması uygun değildir.

Tabakalar arasında hiçbir malzeme veya işlem uygulanmadan yapılan SSB kaplamaların basınç dayanımlar (28 günlük 33,5 MPa) ile ara yüzeyi pürüzlendirilerek hazırlanan numunelerin basınç dayanımları (28 günlük 31 MPa) birbirine yakın sonuçlar vermiştir.

İki tabakalı SSB kaplamaların laboratuvar şartlarında kiriş eğilme dayanımları incelendiğinde, tek tabaka kiriş numuneleri (4,94 MPa) ile iki tabaka aderans harçlı (4,57 MPa) ve ara yüzey elemansız (4,48 MPa) numunelerin ortalama kiriş eğilme dayanımlarının oldukça yakın değerler verdiği görülmüştür.

Arazi şartlarında trafik yükü ve atmosferik şartlara maruz kalan iki tabaka SSB kaplama uygulamasında ise, ara yüzey elemansız iki tabakalı SSB kaplamanın kiriş eğilme dayanımı (2,21 MPa) tek tabaka kiriş numunesinin (4,09 MPa) %54'üne ulaşmıştır. Bu nedenlerle laboratuvar şartlarında hazırlanan numunelerin kiriş eğilme dayanımları ön değerlendirme olarak kabul edilmeli, iki tabakalı SSB kaplama uygulamasının kiriş eğilme dayanımları araziden alınan kiriş karot numuneleri ile değerlendirilmelidir.

6.3. Arazi Çalışmaları Sonuçları

Labotatuvar çalışmaları sonrası, Ankara ili, Çubuk – Yazır Mahallesi yolunda tek ve iki tabakalı SSB yol uygulaması yapılmıştır. Uygulamadan 313 gün sonra, trafik, çevre ve iklim şartlarına maruz bırakılan tek ve iki tabakalı SSB yoldan alınan açılı karot ve kiriş numunelerine eğimli kesme ve kiriş eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Arazi çalışmalardan elde edilen bulgular aşağıda sunulmuştur.

Arazi uygulaması sonrası alınan açılı silindir karot numuneleri üzerinde yapılan eğimli kesme deneyi sonuçlarına göre, tek tabaka SSB kaplama (31,80 MPa) ile aderans harçlı iki tabaka SSB (31,15 MPa) basınç dayanım değerleri birbirine oldukça yakın elde edilmiştir.

Kiriş eğilme deneyi sonuçlarına göre ara yüzeye aderans harç uygulamalı iki tabaka SSB kaplama (4,03 MPa), tek tabaka ve referans olarak kabul edilen SSB kaplama dayanım değerlerinin (4,09 MPa) %98'ine ulaşmıştır.

Laboratuvar çalışmalarında en iyi performansı gösteren aderans harçlı ara yüzey elemanlı iki tabaka SSB kaplamalar, arazi uygulamasında da tek tabakalı SSB kaplamalara yakın ve kabul edilebilir dayanım değerleri vermiştir.

Öneriler

Çalışma kapsamındaki SSB ve BSK yol üstyapı maliyetleri ilk yapım maliyetleridir. Sonraki çalışmaların, proje süresi içerisinde oluşacak bakım ve onarım faaliyetlerinin büyüklüğü ve maliyetleri de göz önünde bulundurularak uzun dönem maliyetleri için yapılması önerilmektedir.

Çalışma kapsamında; SSB yolların iki tabaka halinde dayanım özelliklerini koruyarak yapılabilirliği belirlenmiş olup, sonraki çalışmalarda SSB kaplamaların yüzey özellikleri, konfor ve gürültü seviyeleri üzerinde çalışma yapılması önerilmektedir. Bu aşamada, taşıma gücü yüksek SSB kaplamalar ile kayma dayanımı yüksek, gürültü seviyesi düşük BSK yüzey tabakalarının birlikte değerlendirildiği kompozit yol üstyapıların dikkate alınması uygun olacaktır.

İki tabaka SSB yol kaplamaları araştırma çalışmaları kapsamında, alt tabakanın sadece dayanım ve durabilite özelliklerinden faydalanacak şekilde kalker agrega ile ekonomik olarak tasarlanması, üst tabakanın ise, daha ince tabakalar halinde mağmatik kayaçlardan elde edilen sürtünme dayanımı yüksek agregalarla üretilmesi ve bu durumda farklı agrega kullanımının ara yüzeyde oluşturuduğu ilave gerilmelerin ölçülmesi ve değerlendirilmesine yönelik çalışmaların yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

AASHTO T 307. (2003). Standard method of test for determining the resilient modulus of soils and aggregate materials. *American Association of State Highway and Transportation Officials*, 1-41.

ACI-325.10R (2001). Report on Roller-Compacted Concrete Pavements. *Technical Report, ACI Committee 325*, 1-14.

Ahmadi, M., Shafabakhsh, G. A., and Hassani, A. (2021). Fracture and mechanical performance of Two-Lift Concrete Pavements made of Roller Compacted Concrete and Polypropylene Fibers. *Construction and Building Materials*, (1), 268.

Aghaeipour, A., and Madhkhan, M. (2017). Effect of ground granulated blast furnace slag (GGBFS) on RCCP durability. *Construction and Building Materials*, 141, 533-541.

Akbelen, B., ve Yaman, İ.Ö. (2019). Silindirle sıkıştırılmış beton (SSB) ve bitümlü sıcak karışım (BSK) yolların teknik ve ekonomik analizi. *1.Beton Yollar Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, 13-14.Ekim, Ankara, 261-272.

Algin Z., and Gerginci, S. (2020). Freeze-thaw resistence and water permeability properties of roller compacted concrete produced with macro synthetic fibre. *Construction and Building Materials*, 234, 1-9.

ASTM D7830M-13. (2015). Standard test method for in-place density (unit weight) and water content of soil using an electromagnetic soil density gauge. *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, West Conshohocken, PA, 1-17.

ASTM D1556M-15. (2016). Standard test method for density and unit of soil in place by sand-cone method. *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, West Conshohocken, PA, 1-8.

ASTM D6927-15. (2016). Standard test method for Marshall stability and flow of asphalt mixtures. *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, West Conshohocken, PA, 1-7.

ASTM C1170M-14. (2020). Standard test method for determining consistency and density of roller-compacted concrete using a vibrating table. *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, West Conshohocken, PA, 1-7.

ASTM C39M-18. (2020). Standart test method for compressive strength of cylindrical concrete speciments. *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, West Conshohocken, PA, 1-8.

ASTM C1435M-20. (2020). Standard practice for molding roller compacted concrete in cylinder molds using a vibrating hammer. *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, West Conshohocken, PA, 1-5.

ASTM C78M-18. (2021). Standard test method for flexural strenght of concrete (using simple beam with third-point loading. *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, West Conshohocken, PA, 1-5.

ASTM D1883-21. (2021). Standard test method for CBR (California Bearing Ratio) of laboratory-compacted soils. *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, West Conshohocken, PA, 1-16.

Cable, J. K., and Frentress, D. P. (2004). Two lift Portland cement concrete pavements to meet public needs. *Center For Transportation Research and Education, IOWA State University, DTF61-01-X-00042 (Project 8)*, 1-23.

Chhorn, C., Hong, S. J., and Lee, S. W. (2018). Relationship between compressive and tensile strengths of roller-compacted concrete. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 5 (3), 215-223.

Chhorn C., Kim, Y. K., Hong, S. J., and Lee, S. W. (2017). Evaluation on compactibility and workability of roller-compacted concrete for pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 20 (8), 905-910.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2020a). Silindirle sıkıştırılmış beton yol genel teknik şartnamesi. *ÇŞB, Resmi Gazete*, Ankara, 31066.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2020b). Mahalli idareler genel faaliyet raporu, 2015-2020. *ÇŞB*, Ankara, 108-138.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2021). İnşaat birim fiyat tarifleri eki fiyat listesi. *ÇŞB*, Ankara, 2-155.

Greene, J., Nazef, A., and Choubane, B. (2011). Thirty-year performance evaluation of two-layer concrete pavement system. *Journal of the Transportation Research Board*, 2226 (1), 21-29.

Güngör, A.G. ve Sağlık A. (2008). Karayolları esnek üstyapılar projelendirme rehberi. *Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı*, Ankara, 5-67.

Güngör, A.G., Sağlık, A., ve Ünal, N. (2013). Karayolları genel müdürlüğü beton yol deneme kesimleri performans değerlendirmesi. *Beton 2013-Hazır Beton Kongresi Çağrılı Bildiriler Kitapçığı*, 21-23 Şubat, İstanbul, 96-111.

Harrington, D., Abdo, F., Adaska, W., Hazaree, C. V., and Ceylan H. (2010). Guide for roller-compacted concrete pavements. *IOWA State University, Institute for Transportation*, 8-19.

Harrington, D., and Fick, G. (2014). Guide to concrete overlays: Sustainable solutions for resurfacing and rehabilitating existing pavements. *National Concrete Pavement Technology Center*, 25-49.

Harris, D. K., Sarkar, J., and Ahlborn, T.M. (2011). Characterization of interface bond of ultra-high-performance concrete deck overlays. *Journal of the Transportation Research Board*, 2240 (1), 40-49.

Hashemi, M., Shafigh P., Karim, M. R. B., and Atis, C. D. (2018). The effect of coarse to fine aggregate ratio an the fresh and hardened properties of roller-compacted concrete pavement. *Construction and Building Materials*, 169, 553-566.

İntenet: American Concrete Pavement Association. (2014). StreetPave, structural design software for street and road concrete pavements, *ACPA*. Web: https://www.acpa.org/streetpave/ Erişim Tarihi: 05.05.2020

Karayolları Genel Müdürlüğü. (2005). Karayolu tasarım el kitabı. *KGM,* Ankara, 81-90.

Karayolları Genel Müdürlüğü. (2013). Karayolu teknik şartnamesi (yol altyapısı, sanat yapıları, köprü ve tüneller, üstyapı ve çeşitli işler). *KGM,* Ankara, 407/1-11.

Karayolları Genel Müdürlüğü. (2014). Birim fiyat tarifi (yol, köprü, tünel, bitümlü kaplamalar, bakım ve trafik işleri). *KGM,* Ankara, 23-616.

Karayolları Genel Müdürlüğü. (2016). Yol, köprü, tünel, bitümlü kaplamalar, bakım ve trafik işlerine ait fiyat analizleri. *KGM,* Ankara, 145-258.

Karayolları Genel Müdürlüğü. (2020). 2020 Faaliyet raporu. *KGM,* Ankara, 56.

Karayolları Genel Müdürlüğü. (2021). 2021 yılı yol, köprü, tünel, bitümlü kaplamalar, bakım ve trafik işlerine ait birim fiyat listesi. *KGM,* Ankara, 6-25.

Kim, Y. K., and Lee, S. W. (2013). Performance evaluation of bonded concrete overlay. *Construction and Building Materials,* 49, 464-470.

Ko, K. H., Jeong, S., Yoo, I., Lee, S., Kim, J., and Tsunokawa, K. (2009, 23-29 September). The change rate of fuel consumption for different IRI of paved roads. *13th Road Engineering Association of Asia and Australasia (REAAA) Conference,* Incheon, Korea, 1-9.

Komut M., ve Kaşak S. (2019). Karayolları beton yol üstyapılar projelendirme rehberi. *Karayolları Genel Müdürlüğü, Araştırma ve Geliştirme Daire Başkanlığı*, Ankara, 8-64.

LaHucik, J., Dahal, S., Roesler, J., and Amirkhanian, A. N. (2017). Mechanical properties of roller-compacted concrete with macro-fibers. *Construction and Building Materials*, 135, 440-446.

Lam, M. N., Le, D., and Jaritngam, S. (2018). Compressive strength and durability properties of roller-compacted concrete pavement containing electric arc furnace slag aggregate and fly ash. *Construction and Building Materials,* 191, 912-922.

Liu, G., Lu, W., Lou, Y., Pan, W., and Wang, Z. (2018). Interlayer shear strength of roller compacted concrete (RCC) with various interlayer treatments. *Construction and Building Materials,* 166, 647-656.

Lopez-Uceda, A., Agrela, F., Cabrera, M., Ayuso, J., and Lopez, M. (2016). Mechanical performance of roller compacted concrete with recycled concrete aggregates. *Road Materials and Pavement Design,* 19 (1), 36-55.

Mardani-Aghabaglou A., Andiç-Çakir, Ö., and Ramyar, K. (2013). Freeze-thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method. *Cement & Concrete Composite,* 37, 259-266.

Mohammed, H., Thom, N., and Dawson A. (2019). Load transfer stiffness of two-layer roller compacted concrete for pavements. *Journal of Materials and Applications*, 8 (2), 65-72.

Omran, A., Harbec, D., Tagnit-Hamou, A., and Gagne, R. (2017). Production of roller-compacted concrete using glass powder: Field study. *Construction and Building Materials*, 133, 450-458.

Pourkhorshidi, A. R., and Ramezanianpour, A. A. (2020). Roller compacted concrete pavement using natural pozzolan: experimental investigation and salt-scaling durability model. *International Journal of Pavement Engineering*, 22 (2), 1-10.

Rahmani, E., Sharbatdar, M. K., and Beygi, M. H. A. (2020a). The effect of water-to-cement ratio on the fracture behaviors and ductility of Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP). *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 109.

Rahmani, E., Sharbatdar, M. K., and Beygi, M. H. A. (2020b). A comprehensive investigation into the effect of water to cement ratios and cement contents on the physical and mechanical properties of Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP). *Construction and Building Materials*, 253.

Ramezanianpour, A. A., Mohammadi, A., Dehkordi, E. R., and 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., Darter, M., Tompkins, D., Vancura, M., Khazanovich, L., Signore,J., Coleri, E., Wu, R., Harvey, J., and Vandenbossche, J. (2013). Composite pavement systems, PCC/PCC composite pavements. *Sharp 2 Report*, 15.

Rao, S. K., Srava, P., and Rao, T. C. (2016). Abrasion resistance and mechanical properties of Roller Compacted Concrete with GGBS. *Construction and Building Materials*, 114, 925-933.

Shabani, R., Sengun, E., Ozturk, H. I., Alam, B., and Yaman, I. O. (2021). Superpave gyratory compactor as an alternative design method for roller compacted concrete in the laboratory. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33 (6), 1-13.

Shafigh, P., Hashemi, M., Nam, B. H., and Koting S. (2019). Optimum moisture content in roller-compacted concrete pavement. *International Journal of Pavement Engineering*, 21(14), 1769-1779.

Shamsaei, M., Aghayan I., and Kazemi, K. A. (2017). Experimental investigation of using cross-linked polyethylene waste as aggregate in roller compacted concrete pavement. *Journal of Cleaner Production*, 165, 290-297.

Şengün, E., Alam, B., Shabani R., and Yaman, I. O. (2019). The effects of compaction methods and mix parameters on the properties of roller compacted concrete mixtures. *Construction and Building Materials*, 228.

T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. (2021). Karayolu sektör raporu-12. ulaştırma ve haberleşme şurası kitapçığı, *UAB*, Ankara, 21- 166.

Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği. (2018). SSB yollar tasarım rehberi. *TÇMB*, Ankara, 1-20.

Tompkins, D., Khazanovich, L., Darter, M. I., and Fleischer, W. (2009). Design and construction of sustainable pavements: Austrian and German two-layer concrete pavements. *Journal of the Transportation Research Board*, No. 2098, 75-85.

TS EN 14188-1. (2006). Derz dolguları ve derz sızdırmazlık malzemeleri-Bölüm 1: Sıcak uygulamalı derz sızdırmazlık malzemeleri-özellikler. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, 1-21.

TS EN 12390-3. (2019). Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 3: Deney numunelerinin basınç dayanımının tayini. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, 1-23.

TS EN 12390-8. (2019). Beton-sertleşmiş beton deneyleri-Bölüm 8: Basınç altında su işleme derinliği tayini. *Türk Standardları Enstitüsü*, Ankara, 1-11.

Williams, S. G. (2013). Comparison of the superpave gyratory and Proctor compaction methods for the design of roller-compacted concrete pavements. *Journal of the Transportation Research Board*, 2342 (1), 106-112.

Yan, W., Weng, X., and Kou, Y. (2014). Influence of fiber grid on interlayer bond property of airport double-layer pavement. *Journal of Rainforced Plastics and Composites*, 33 (1), 101-111.

Yaman, İ.Ö, ve Ceylan H. (2013). Silindirle sıkıştırılmış beton yollar. *Hazır Beton Dergisi*, Mayıs-Haziran sayısı, 69-82.

Yucel, H. E., Jashami, H., Sahmaran, M., Guler, M., and Yaman, I. O. (2013). Thin ECC overlay systems for rehabilitation of rigid concrete pavements. *Magazine of Concrete Research*, 65 (2), 108-120.

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

Ziyadi, M., Ozer H., Kang S., and Al-Qadi, I. L. (2017). Vehicle energy consumption and an environmental impact calculation model for the transportation infrastructure systems. *Journal of Cleaner Production*, 174, 424-436.

Zollinger, C. (2019). Recent advances and uses of roller compacted concrete for pavement construction in the United States. *1.Beton Yollar Kongresi ve Sergisi Bildiriler Kitabı*, 13-14.Ekim, Ankara, 63-78.

EKLER

EK-1. BSK ve SSB Tasarım Parametre ve Kalınlıkları

Çizelge 1.1 BSK üstyapı tasarım parametre ve kalınlıkları-20 yıl proje süresi için

BSK üstyapı tasarım parametreleri ve tabaka kalınlıkları (20 yıl proje süresi için)													
Yol sınıfı ve Güvenilirlik	$T_{8.2}$	CBR %	MR psi	Gerekli SN	Mevcut SN	Tabaka kalınlıkları, cm						Toplam BSK	Toplam üstyapı
						TMA	Binder	Bitümlü temel	PMT	Alttemel	Koruyucu tabaka		
İl yolu - R% = %70	245.013.820	1	1.800	24,15	24,23	4	11	14	20	15	85	29	64
		2	3.100	20,77	21,49	4	11	13	20	15	60	28	63
		4	4.750	18,41	19,59	4	11	13	20	15	40	28	63
		6	6.750	16,64	17,41	4	10	12	20	15	25	26	61
		8	8.300	15,66	15,68	4	10	12	20	20	-	26	66
		15	12.600	13,82	14,31	4	10	10	20	15	-	24	59
		50	28.000	10,74	14,31	4	10	10	20	15	-	24	59
	67.500.000	1	1.800	20,70	20,71	4	7	10	20	15	80	21	56
		2	3.100	17,74	18,34	4	7	10	20	15	55	21	56
		4	4.750	15,67	16,44	4	7	10	20	15	35	21	56
		6	6.750	14,11	15,01	4	7	10	20	15	20	21	56
		8	8.300	13,25	13,76	4	7	10	20	20	-	21	61
		15	12.600	11,62	12,75	4	7	9	20	15	-	20	55
		50	28.000	8,92	12,75	4	7	9	20	15	-	20	55
	6.000.616	1	1.800	15,34	17,09	4	10	0	15	15	75	14	44
		2	3.100	13,01	14,71	4	10	0	15	15	50	14	44
		4	4.750	11,37	13,29	4	10	0	15	15	35	14	44
		6	6.750	10,14	11,86	4	10	0	15	15	20	14	44
		8	8.300	9,46	9,96	4	10	0	15	15	-	14	44
		15	12.600	8,19	9,96	4	10	0	15	15	-	14	44
		50	28.000	6,16	9,96	4	10	0	15	15	-	14	44

EK-1. (devam) BSK ve SSB Tasarım Parametre ve Kalınlıkları

Çizelge 1.2 BSK üstyapı sayısı (SN) değerleri ve kontrolü-20 yıl proje süresi için

BSK üstyapı sayısı (SN) değerleri ve kontrolü (20 yıl proje süresi için)										
Yol sınıfı ve Güvenilirlik	$T_{8.2}$	Gerekli SN	Mevcut SN	SN1	SN2	SN1*	SN2*	D1* ≥ SN1/a1	SN1* ≥ SN1	D2* ≥ (SN2 - SN1*)/(a2)	SN1* + SN2* ≥ SN2
İl yolu - R% = %70	245.013.820	24,15	24,23	9,17	11,14	11,20	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		20,77	21,49	9,17	11,14	10,84	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		18,41	19,59	9,17	11,14	10,84	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		16,64	17,41	9,17	11,14	10,08	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		15,66	15,68	9,17	11,14	10,08	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		13,82	14,31	9,17	11,14	9,36	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		10,74	14,31	9,17	11,14	9,36	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
	67.500.000	20,70	20,71	7,56	9,27	8,16	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		17,74	18,34	7,56	9,27	8,16	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		15,67	16,44	7,56	9,27	8,16	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		14,11	15,01	7,56	9,27	8,16	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		13,25	13,76	7,56	9,27	8,16	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		11,62	12,75	7,56	9,27	7,80	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		8,92	12,75	7,56	9,27	7,80	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
	6.000.616	15,34	17,09	5,17	6,42	5,76	2,25	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		13,01	14,71	5,17	6,42	5,76	2,25	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		11,37	13,29	5,17	6,42	5,76	2,25	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		10,14	11,86	5,17	6,42	5,76	2,25	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		9,46	9,96	5,17	6,42	5,76	2,25	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		8,19	9,96	5,17	6,42	5,76	2,25	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		6,16	9,96	5,17	6,42	5,76	2,25	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun

EK-1. (devam) BSK ve SSB Tasarım Parametre ve Kalınlıkları

Çizelge 1.3 BSK üstyapı tasarım parametre ve kalınlıkları-30 yıl proje süresi için

BSK üstyapı tasarım parametreleri ve tabaka kalınlıkları (30 yıl proje süresi için)														
Yol sınıfı ve Güvenilirlik	$T_{8.2}$	CBR %	MR psi	Gerekli SN	Mevcut SN	Tabaka kalınlıkları, cm							Toplam BSK	Toplam üstyapı
						TMA	Binder	Bitümlü temel	PMT	Alttemel	Koruyucu tabaka			
İl yolu - R% = %70	469.450.073	1	1800	29,90	30,12	4	16	23	20	20	85		43	83
		2	3100	25,80	26,66	4	16	20	20	20	60		40	80
		4	4750	22,93	23,03	4	16	17	20	15	40		37	72
		6	6750	20,78	20,81	4	14	17	20	15	25		35	70
		8	8300	19,59	20,05	4	13	16	20	15	25		33	68
		15	12600	17,35	17,67	4	13	16	20	15	-		33	68
		50	28000	13,59	16,55	4	12	14	20	15	-		30	65
	130.034.838	1	1800	26,73	27,27	4	15	18	20	15	85		36	71
		2	3100	22,13	22,65	4	13	14	20	15	60		30	65
		4	4750	19,61	20,35	4	12	14	20	15	40		29	64
		6	6750	17,72	18,53	4	11	14	20	15	25		28	63
		8	8300	16,67	17,41	4	10	12	20	15	25		25	60
		15	12600	14,68	15,03	4	10	12	20	15	-		26	61
		50	28000	11,29	14,67	4	10	11	20	15	-		25	60
	11.655.197	1	1800	19,25	19,48	4	6	9	20	15	75		19	54
		2	3100	16,42	16,70	4	5	9	20	15	50		18	53
		4	4750	14,41	14,92	4	5	8	20	15	35		17	52
		6	6750	12,87	13,49	4	5	8	20	15	20		17	52
		8	8300	12,01	12,24	4	5	8	20	20	0		17	57
		15	12600	10,37	11,59	4	5	8	20	15	-		17	52
		50	28000	7,67	11,59	4	5	8	20	15	-		17	52

EK-1. (devam) BSK ve SSB Tasarım Parametre ve Kalınlıkları

Çizelge 1.4 BSK üstyapı sayısı (SN) değerleri ve kontrolü-30 yıl proje süresi için

BSK üstyapı sayısı (SN) değerleri ve kontrolü (30 yıl proje süresi için)										
Yol sınıfı ve Güvenilirlik	$T_{8.2}$	Gerekli SN	Mevcut SN	SN1	SN2	SN1*	SN2*	D1* ≥ SN1/a1	SN1* ≥ SN1	D2* ≥ (SN2 - SN1*)/(a2)	SN1* + SN2* ≥ SN2
İl yolu - R% = %70	469.450.073	29,90	30,12	11,60	14,09	16,44	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		25,80	26,66	11,60	14,09	15,36	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		22,93	23,03	11,60	14,09	14,28	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		20,78	20,81	11,60	14,09	13,48	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		19,59	20,05	11,60	14,09	12,72	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		17,35	17,67	11,60	14,09	12,72	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		13,59	16,55	11,60	14,09	11,60	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
	130.034.838	26,73	27,27	9,50	11,74	14,24	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		22,13	22,65	9,50	11,74	12,00	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		19,61	20,35	9,50	11,74	11,60	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		17,72	18,53	9,50	11,74	11,20	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		16,67	17,41	9,50	11,74	10,08	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		14,68	15,03	9,50	11,74	10,08	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		11,29	14,67	9,50	11,74	9,72	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
	11.655.197	19,25	19,48	6,39	8,01	7,40	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		16,42	16,70	6,39	8,01	7,00	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		14,41	14,92	6,39	8,01	6,64	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		12,87	13,49	6,39	8,01	6,64	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		12,01	12,24	6,39	8,01	6,64	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		10,37	11,59	6,39	8,01	6,64	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun
		7,67	11,59	6,39	8,01	6,64	3,00	Uygun	Uygun	Uygun	Uygun

EK-1. (devam) BSK ve SSB Tasarım Parametre ve Kalınlıkları

Çizelge 1.5 SSB üstyapı tasarım parametre ve kalınlıkları-20 yıl proje süresi için

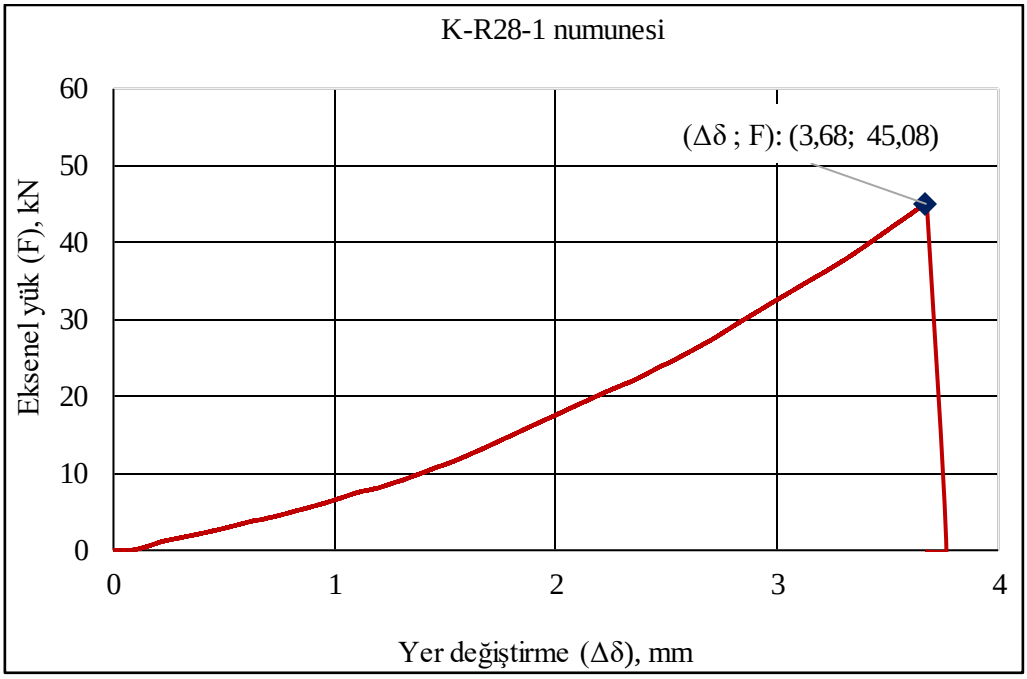
SSB üstyapı tasarım parametreleri ve tabaka kalınlıkları (20 yıl proje süresi için)								
Yol sınıfı ve Güvenilirlik	$T_{8.2}$	CBR%	k-Katsayısı [psi]	Tabaka kalınlıkları, cm				
				SSB	PMT	Alttemel	Koruyucu tabaka	Toplam üstyapı
II yolu - R% = %85	245.013.820	1	48	23,14	15,00	15,00	60,00	53,14
		2	76	23,14	15,00	15,00	40,00	53,14
		4	120	23,14	15,00	15,00	30,00	53,14
		6	154	23,14	15,00	15,00	20,00	53,14
		8	180	23,39	15,00	15,00	-	53,39
		15	234	22,73	15,00	15,00	-	52,73
		50	501	21,36	15,00	15,00	-	51,36
	67.500.000	1	48	20,78	15,00	15,00	55,00	50,78
		2	76	20,78	15,00	15,00	35,00	50,78
		4	120	20,78	15,00	15,00	25,00	50,78
		6	154	20,78	15,00	15,00	20,00	50,78
		8	180	20,96	15,00	15,00	-	50,96
		15	234	20,47	15,00	15,00	-	50,47
		50	501	19,28	15,00	15,00	-	49,28
	6.000.616	1	48	16,87	15,00	15,00	55,00	46,87
		2	76	16,87	15,00	15,00	35,00	46,87
		4	120	16,87	15,00	15,00	25,00	46,87
		6	154	16,87	15,00	15,00	20,00	46,87
		8	180	16,99	15,00	15,00	-	46,99
		15	234	16,64	15,00	15,00	-	46,64
		50	501	15,62	15,00	15,00	-	45,62

EK-1. (devam) BSK ve SSB Tasarım Parametre ve Kalınlıkları

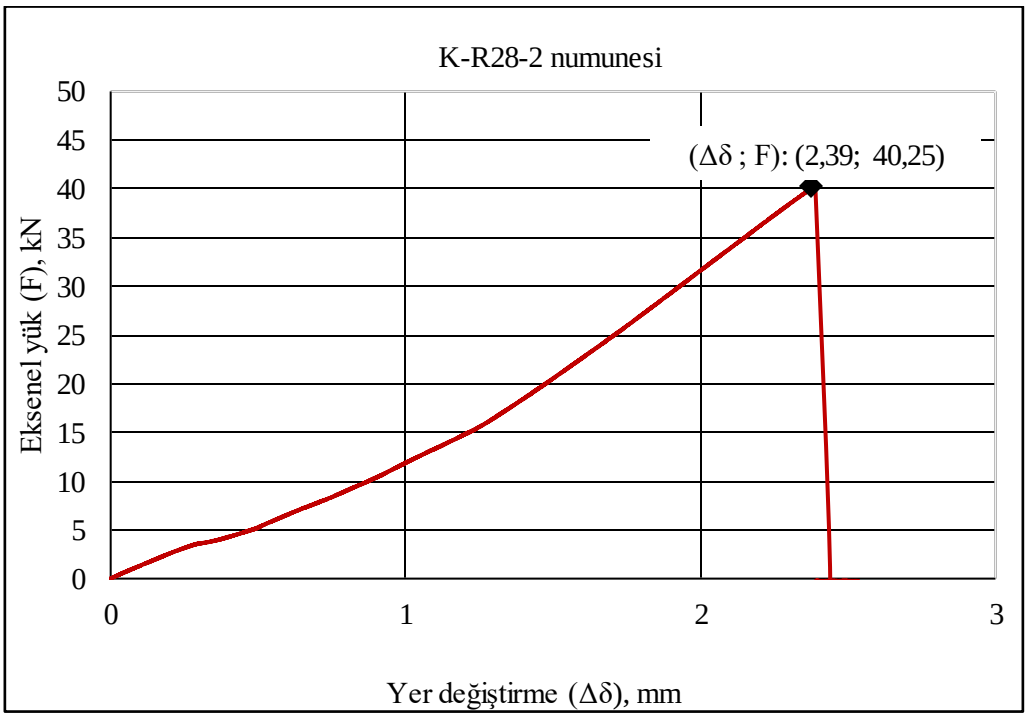
Çizelge 1.6 SSB üstyapı tasarım parametre ve kalınlıkları-30 yıl proje süresi için

SSB üstyapı tasarım parametreleri ve tabaka kalınlıkları (30 yıl proje süresi için)								
Yol sınıfı ve güvenilirlik	T8.2	CBR%	k-Katsayısı [psi]	Tabaka kalınlıkları, cm				
				SSB	PMT	Alttemel	Koruyucu tabaka	Toplam üstyapı
İl yolu - R% = %85	469.450.073	1	48	24,33	15,00	15,00	60,00	54,33
		2	76	24,33	15,00	15,00	40,00	54,33
		4	120	24,33	15,00	15,00	30,00	54,33
		6	154	24,33	15,00	15,00	20,00	54,33
		8	180	24,61	15,00	15,00	-	54,61
		15	234	23,88	15,00	15,00	-	53,88
		50	501	22,38	15,00	15,00	-	52,38
	130.034.838	1	48	21,95	15,00	15,00	60,00	51,95
		2	76	21,95	15,00	15,00	40,00	51,95
		4	120	21,95	15,00	15,00	30,00	51,95
		6	154	21,95	15,00	15,00	20,00	51,95
		8	180	22,17	15,00	15,00	-	52,17
		15	234	21,59	15,00	15,00	-	51,59
		50	501	20,32	15,00	15,00	-	50,32
	11.655.197	1	48	17,91	15,00	15,00	55,00	47,91
		2	76	17,91	15,00	15,00	35,00	47,91
		4	120	17,91	15,00	15,00	25,00	47,91
		6	154	17,91	15,00	15,00	20,00	47,91
		8	180	18,06	15,00	15,00	-	48,06
		15	234	17,68	15,00	15,00	-	47,68
		50	501	16,64	15,00	15,00	-	46,64

EK-2. Dört nokta kiriş eğilme deneyi sonucu elde edilen eksenel kuvvet-deplasman ilişkileri

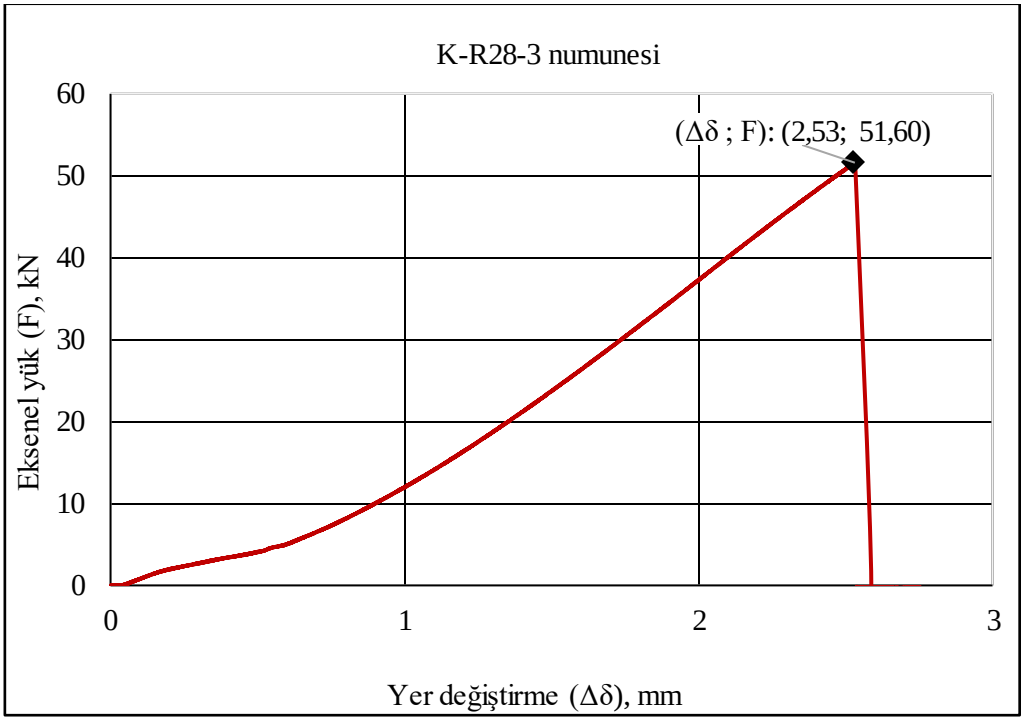


Şekil 1.1. K-R8-1 kiriş numunesi 28 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

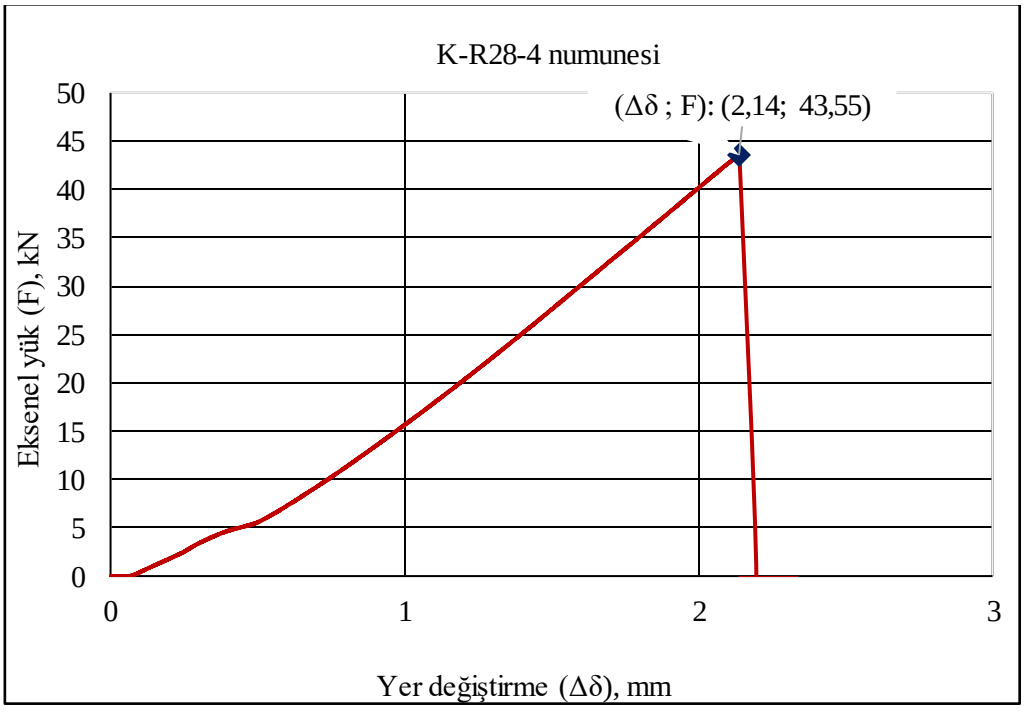


Şekil 1.2. K-R28-2 kiriş numunesi 28 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

EK-2. (devam) Dört nokta kiriş eğilme deneyi sonucu elde edilen eksenel kuvvet-deplasman ilişkileri

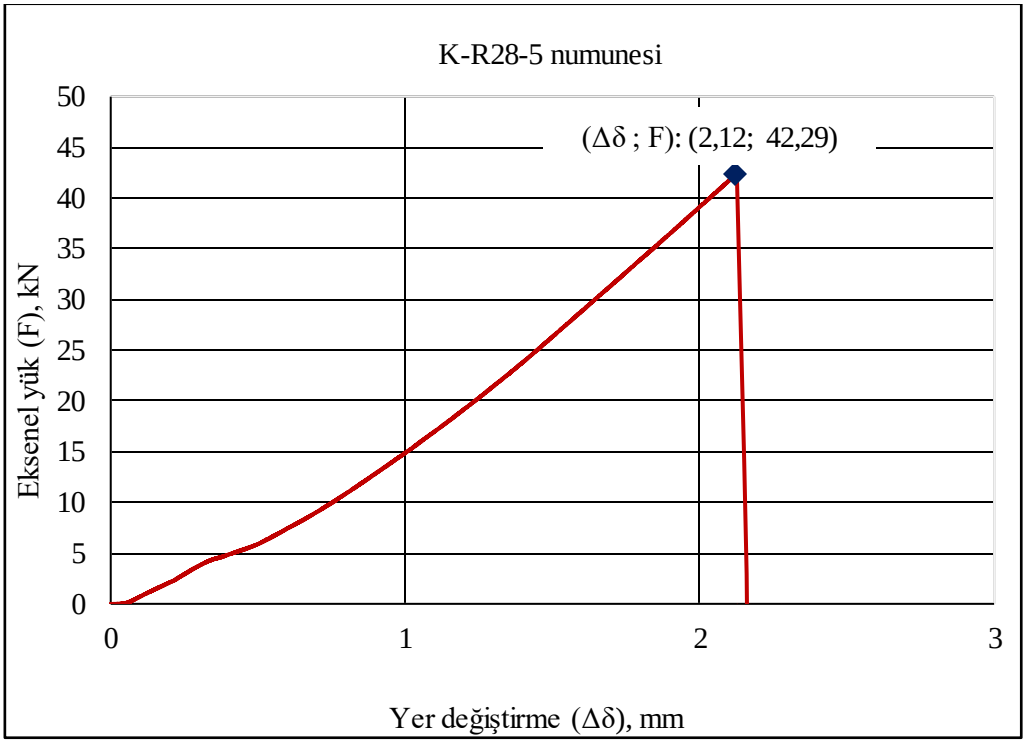


Şekil 1.3. K-R28-3 kiriş numunesi 28 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

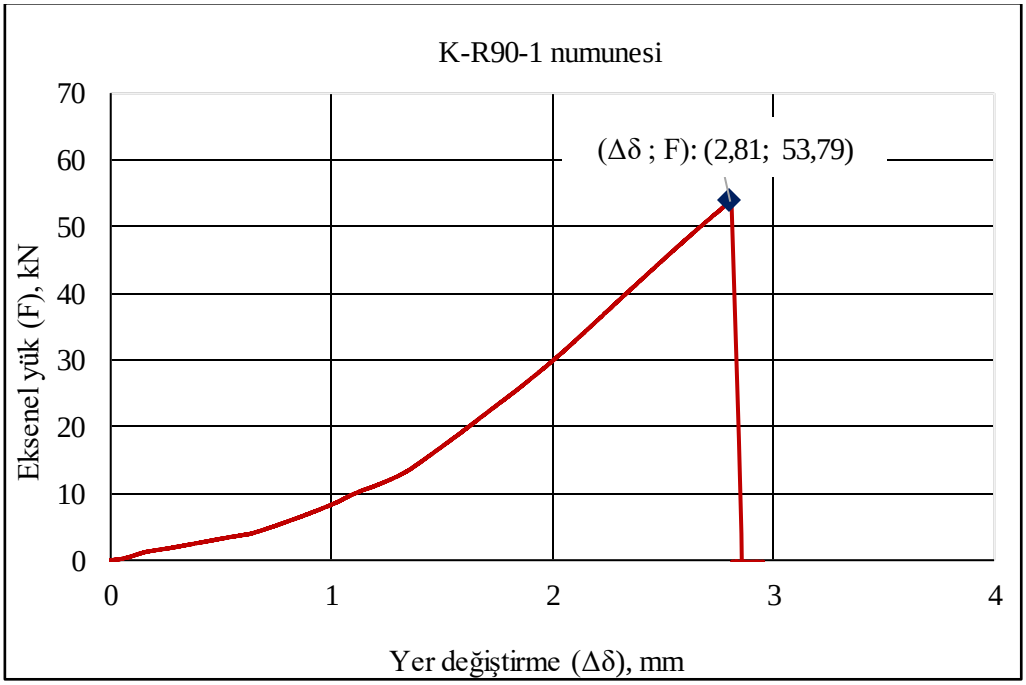


Şekil 1.4. K-R28-4 kiriş numunesi 28 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

EK-2. (devam) Dört nokta kiriş eğilme deneyi sonucu elde edilen eksenel kuvvet-deplasman ilişkileri

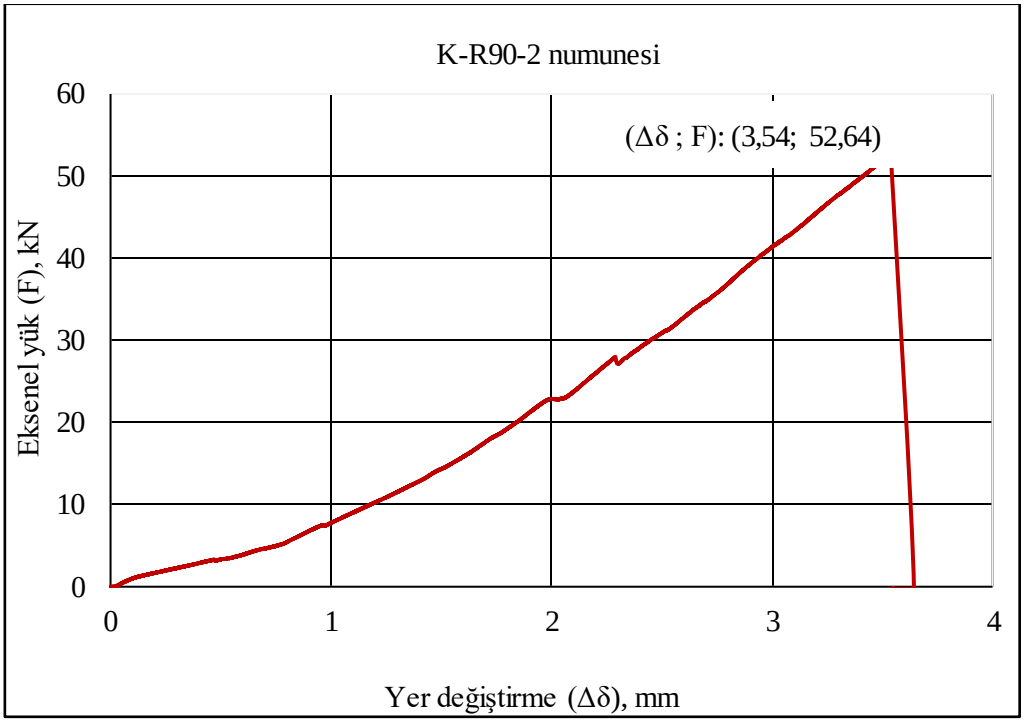


Şekil 1.5. K-R8-5 kiriş numunesi 28 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

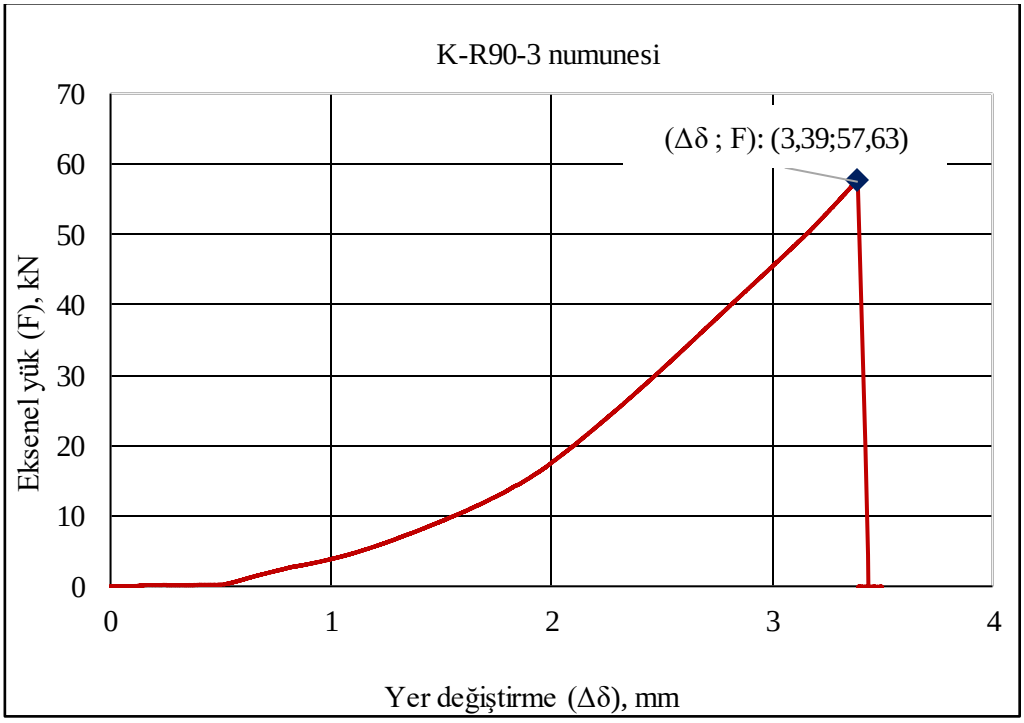


Şekil 1.6. K-R90-1 kiriş numunesi 90 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

EK-2. (devam) Dört nokta kiriş eğilme deneyi sonucu elde edilen eksenel kuvvet-deplasman ilişkileri

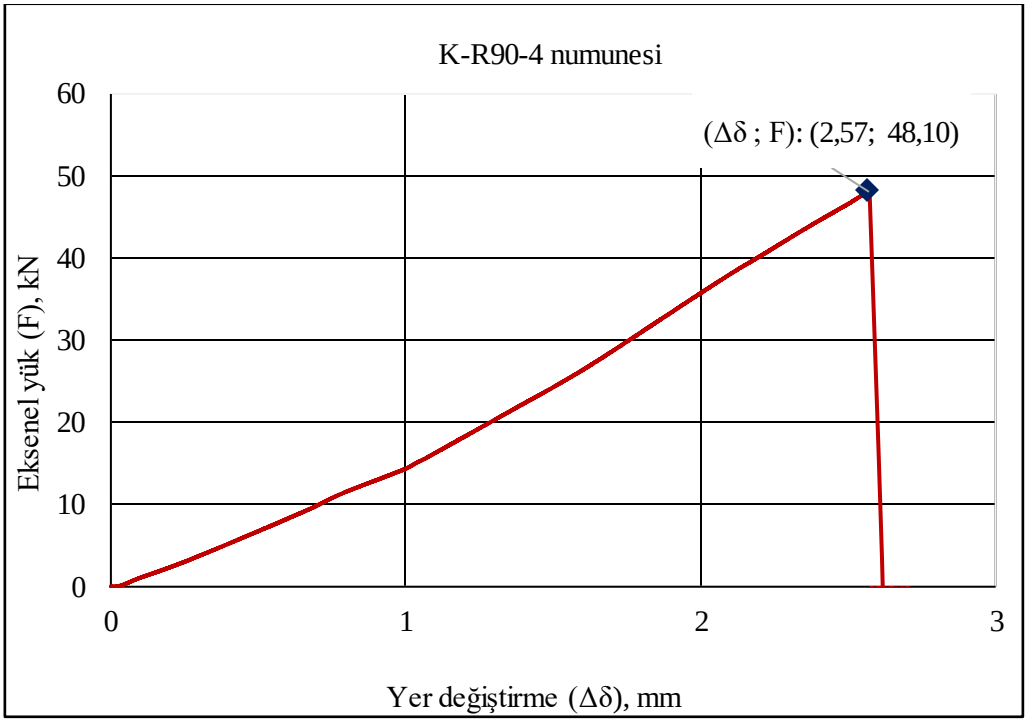


Şekil 1.7. K-R90-2 kiriş numunesi 90 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

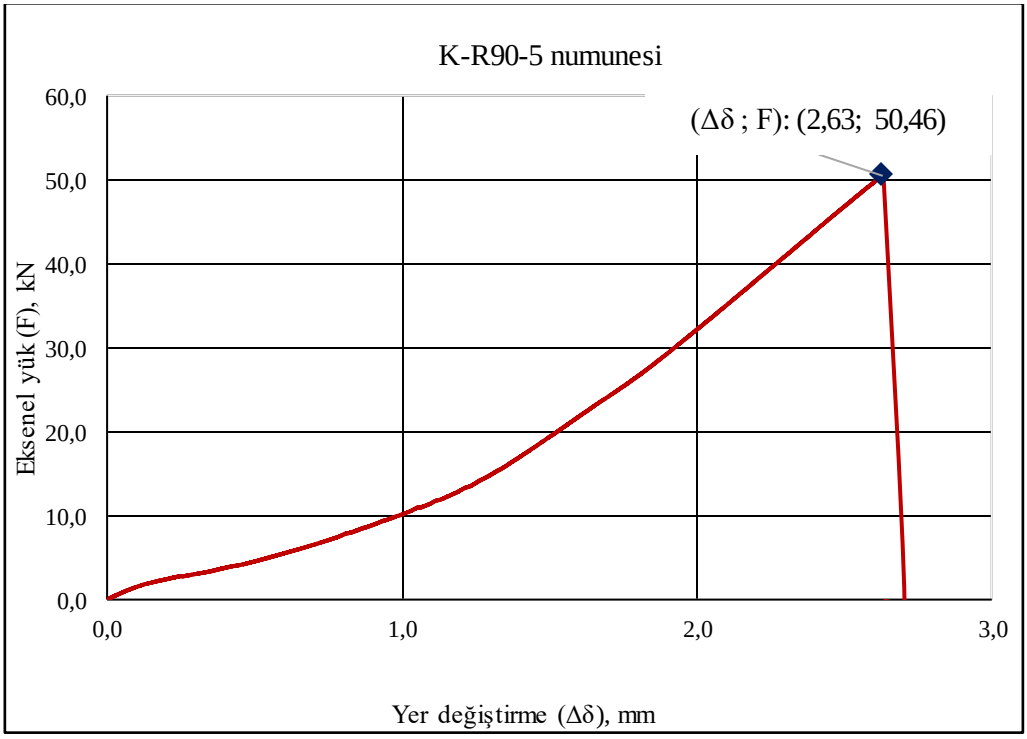


Şekil 1.8. K-R90-3 kiriş numunesi 90 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

EK-2. (devam) Dört nokta kiriş eğilme deneyi sonucu elde edilen eksenel kuvvet-deplasman ilişkileri

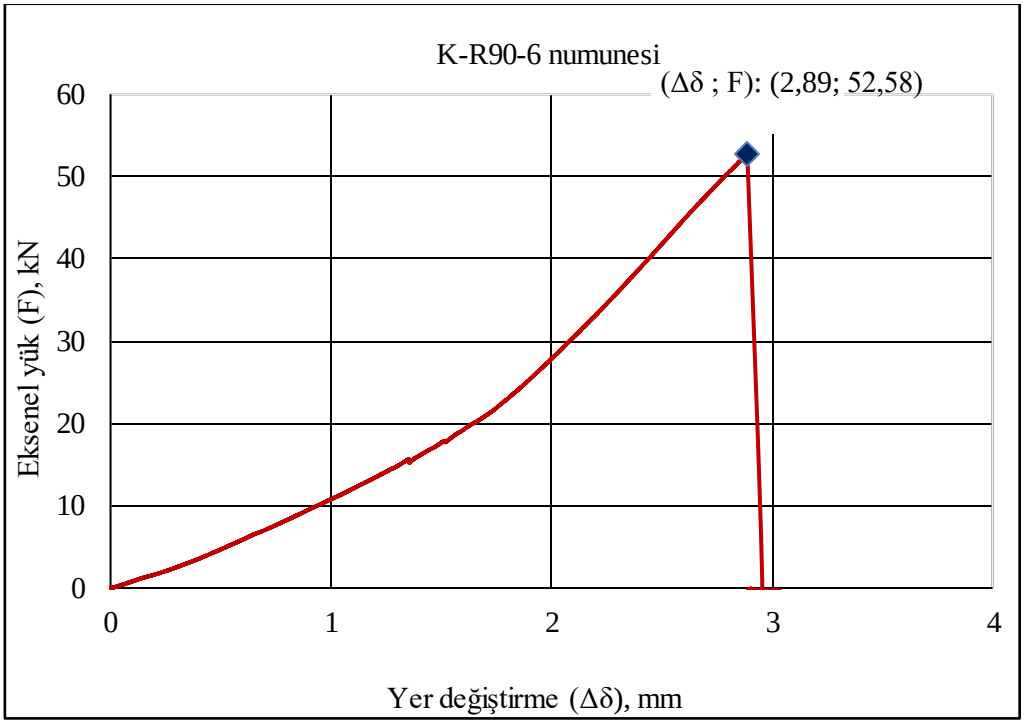


Şekil 1.9. K-R90-4 kiriş numunesi 90 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

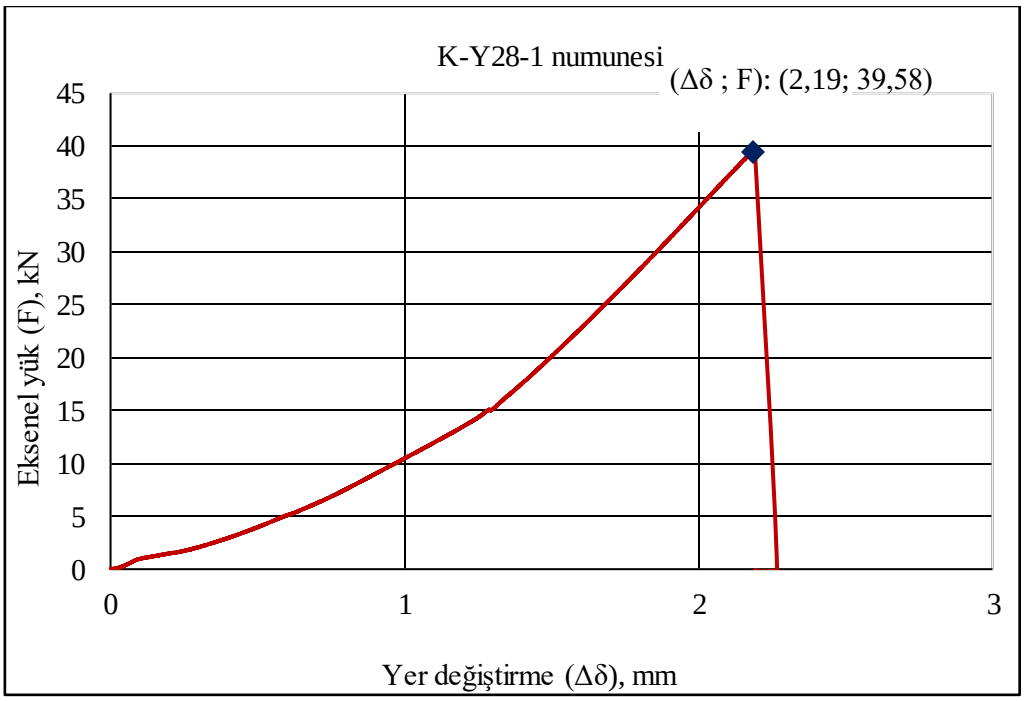


Şekil 1.10. K-R90-5 kiriş numunesi 90 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

EK-2. (devam) Dört nokta kiriş eğilme deneyi sonucu elde edilen eksenel kuvvet-deplasman ilişkileri

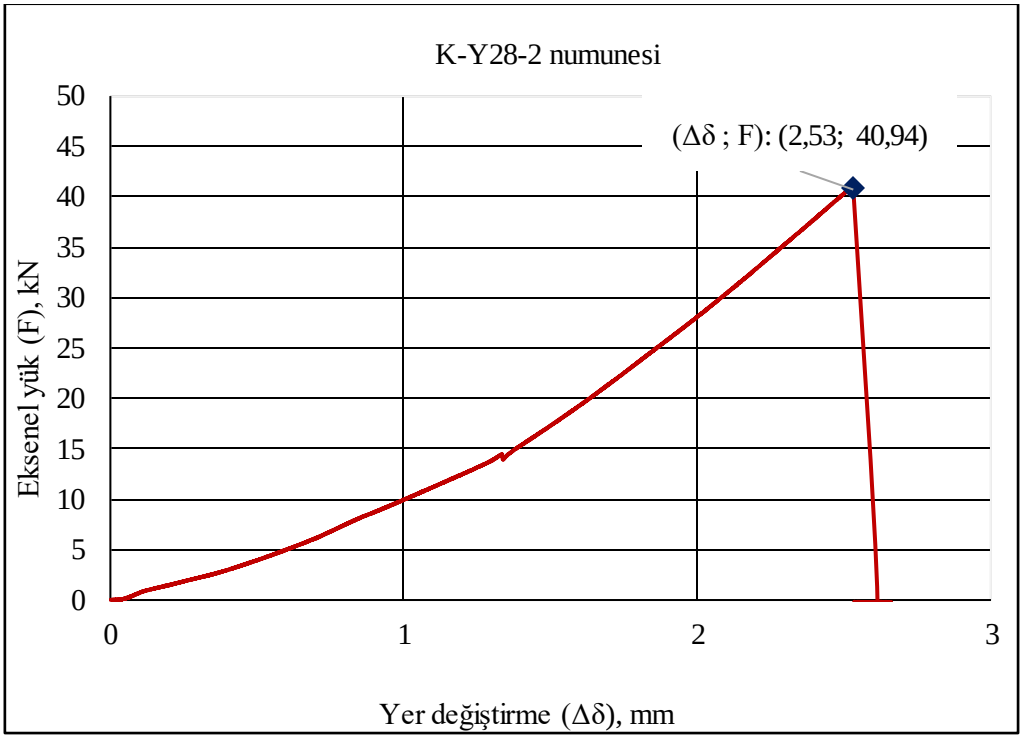


Şekil 1.11. K-R90-6 kiriş numunesi 90 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

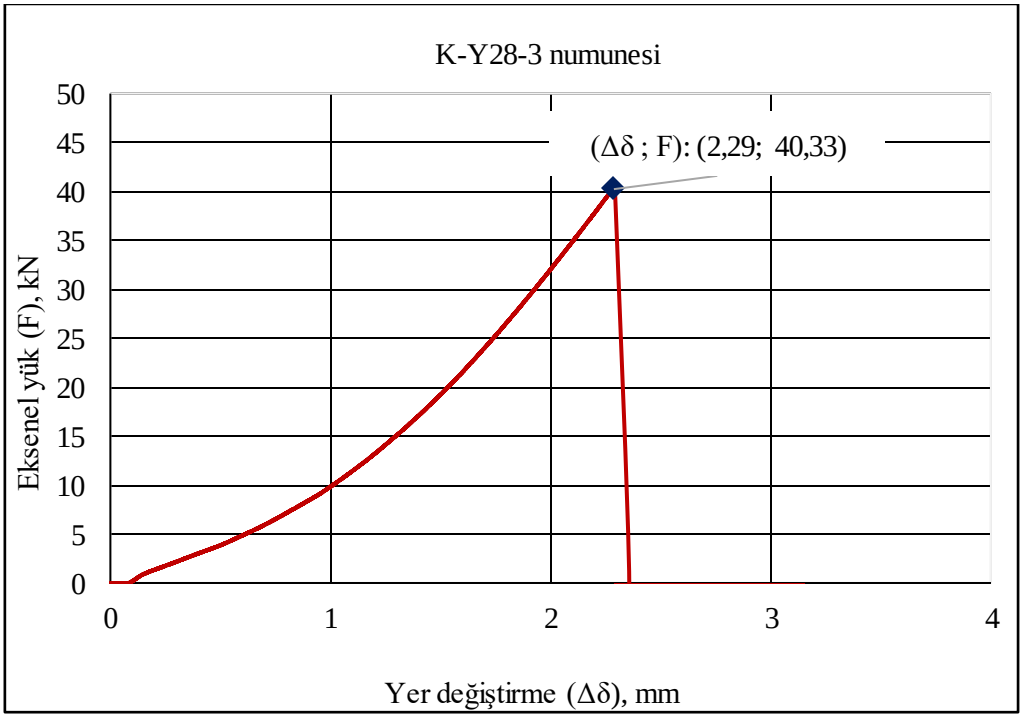


Şekil 1.12. K-Y28-1 kiriş numunesi 28 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

EK-2. (devam) Dört nokta kiriş eğilme deneyi sonucu elde edilen eksenel kuvvet-deplasman ilişkileri

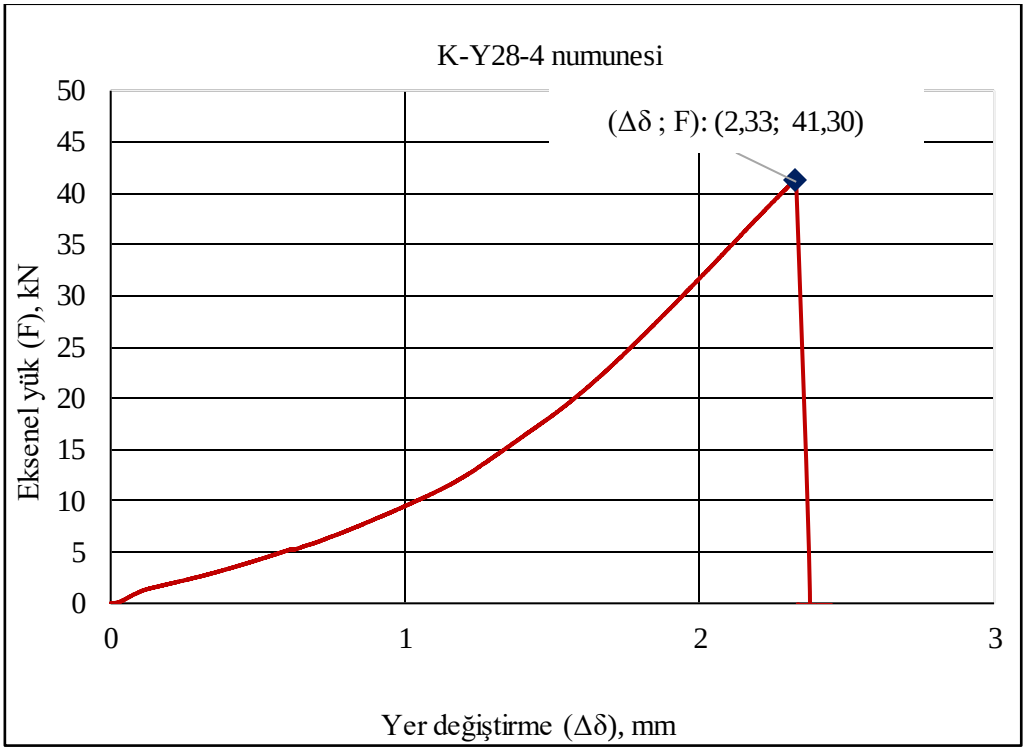


Şekil 1.13. K-Y28-2 kiriş numunesi 28 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

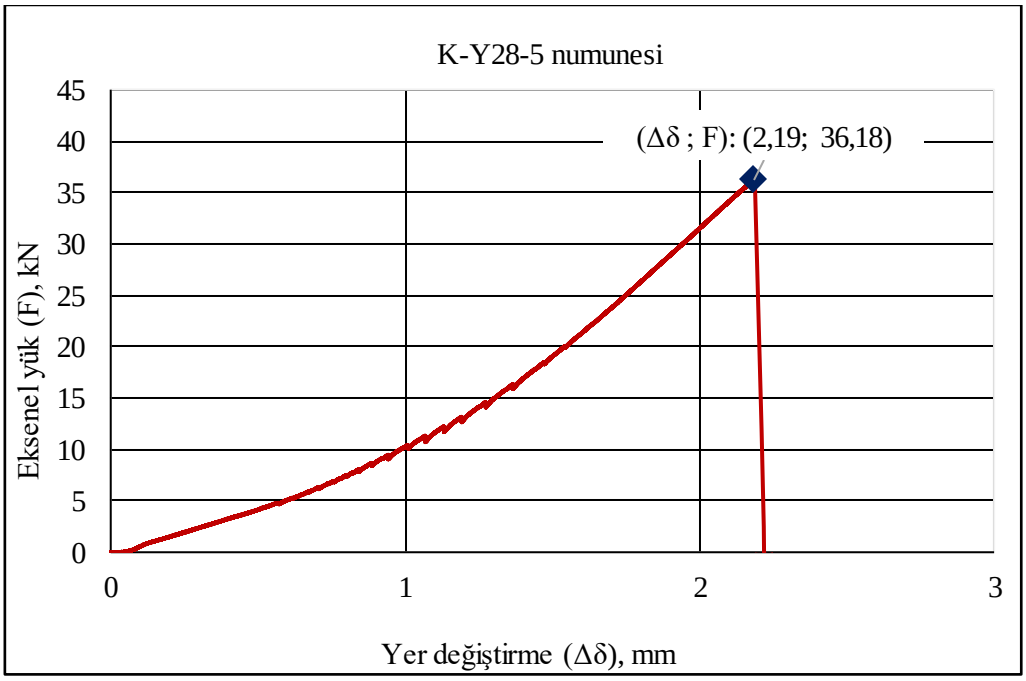


Şekil 1.14. K-Y28-3 kiriş numunesi 28 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

EK-2. (devam) Dört nokta kiriş eğilme deneyi sonucu elde edilen eksenel kuvvet-deplasman ilişkileri

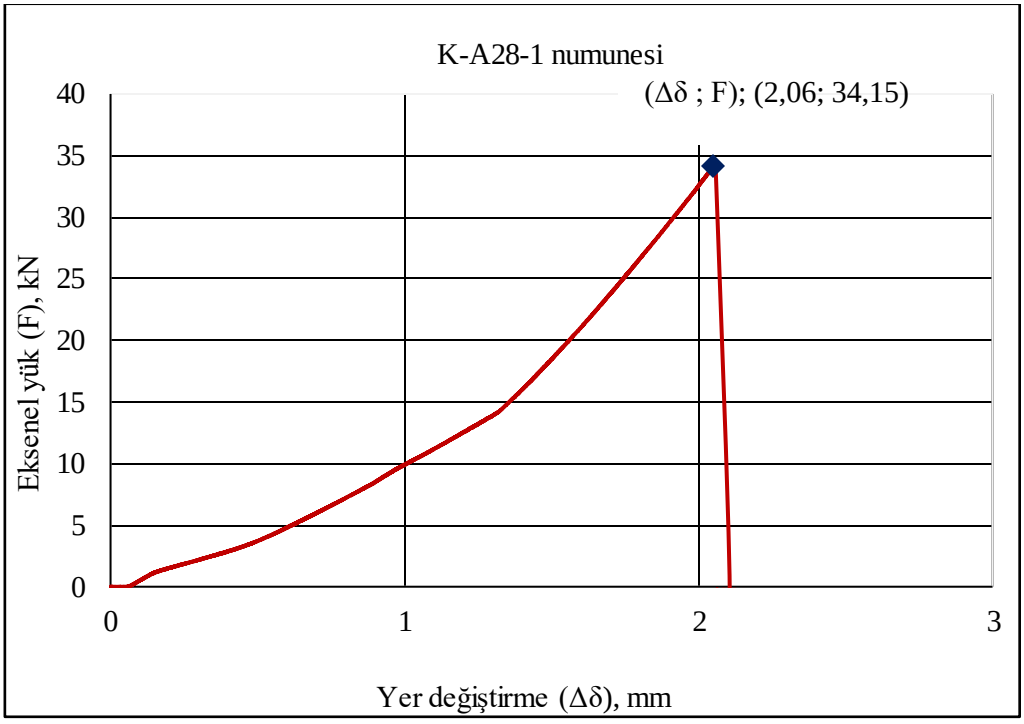


Şekil 1.15. K-Y28-4 kiriş numunesi 28 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

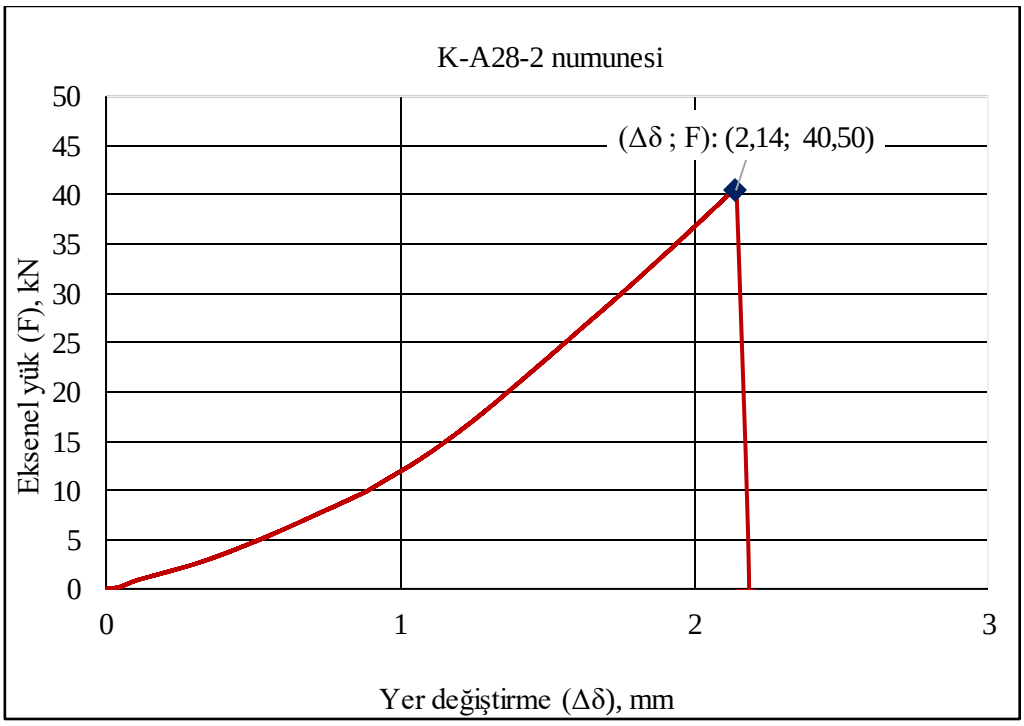


Şekil 1.16. Y-5 kiriş numunesi 28 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

EK-2. (devam) Dört nokta kiriş eğilme deneyi sonucu elde edilen eksenel kuvvet-deplasman ilişkileri

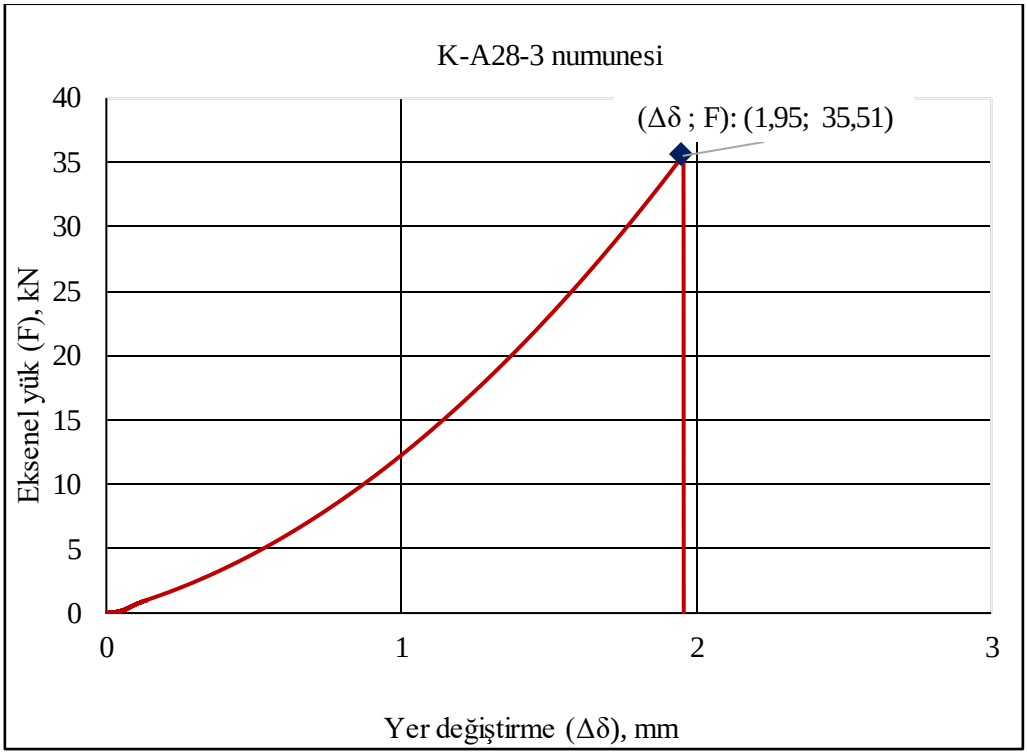


Şekil 1.17. K-A28-1 kiriş numunesi 28 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

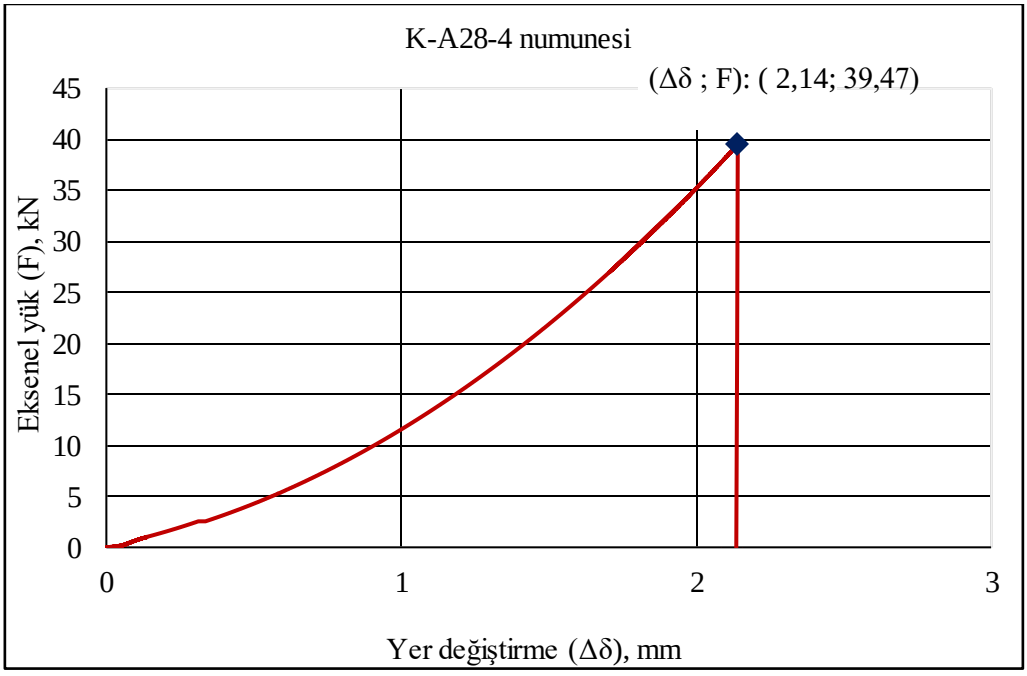


Şekil 1.18. K-A28-2 kiriş numunesi 28 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

EK-2. (devam) Dört nokta kiriş eğilme deneyi sonucu elde edilen eksenel kuvvet-deplasman ilişkileri

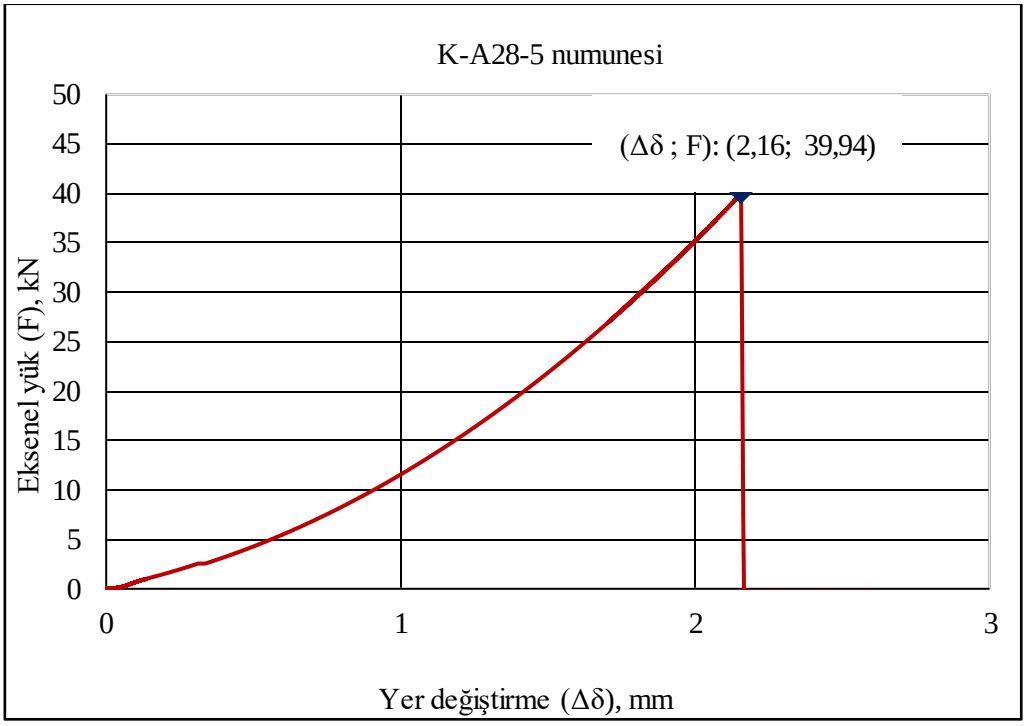


Şekil 1.19. K-A28-3 kiriş numunesi 28 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

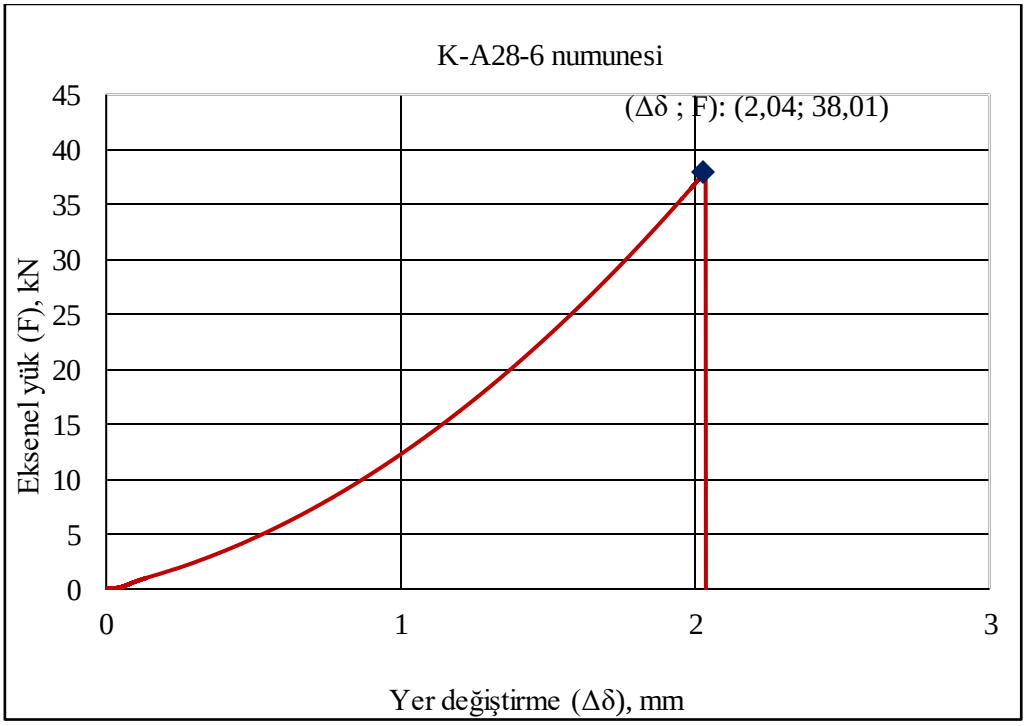


Şekil 1.20. K-A28-4 kiriş numunesi 28 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

EK-2. (devam) Dört nokta kiriş eğilme deneyi sonucu elde edilen eksenel kuvvet-deplasman ilişkileri

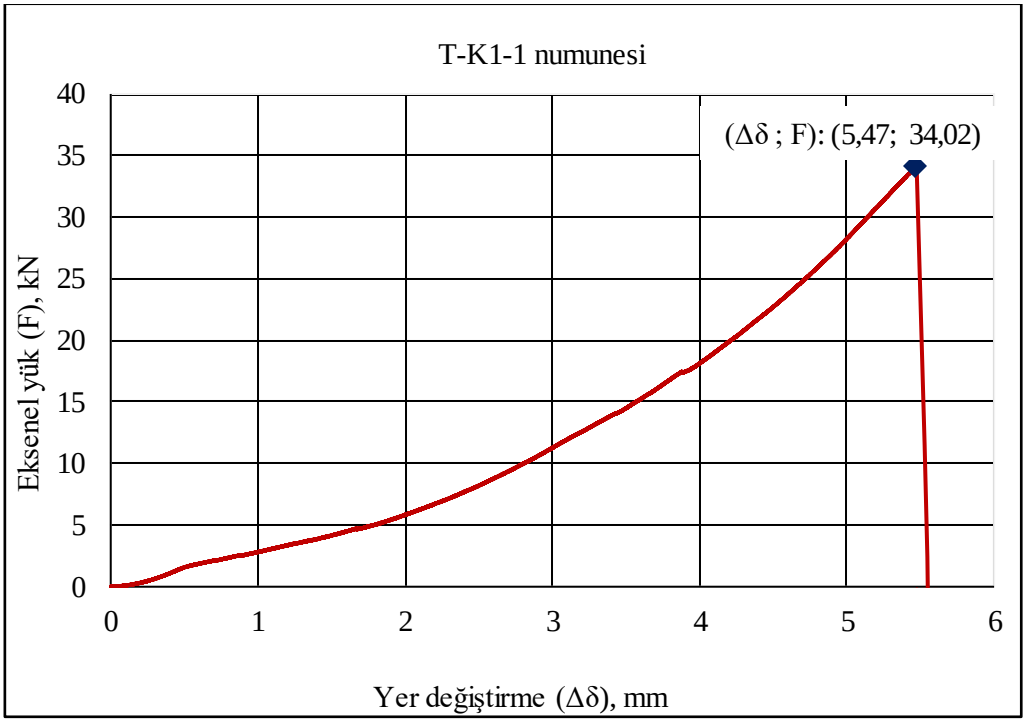


Şekil 1.21. K-A28-5 kiriş numunesi 28 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

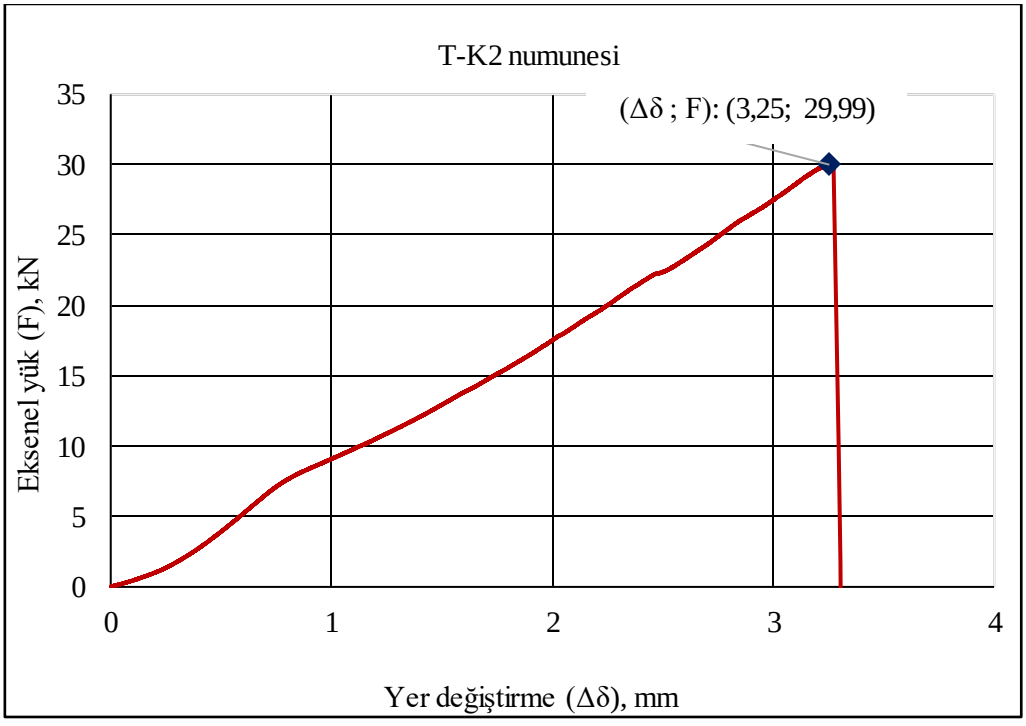


Şekil 1.22. K-A28-6 kiriş numunesi 28 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

EK-2. (devam) Dört nokta kiriş eğilme deneyi sonucu elde edilen eksenel kuvvet-deplasman ilişkileri

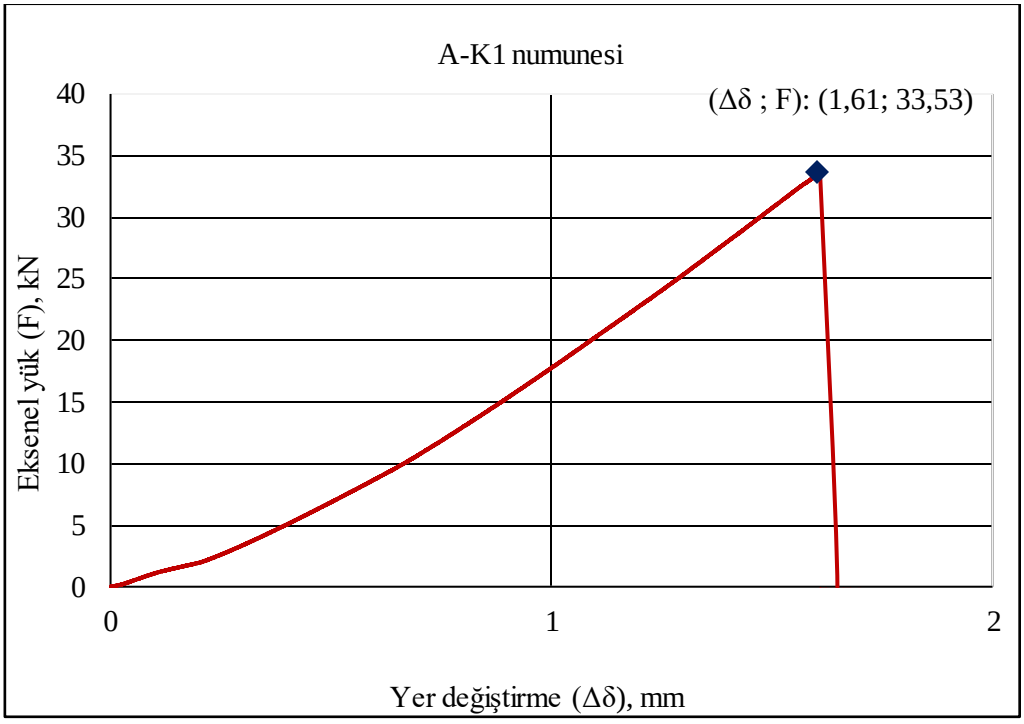


Şekil 1.23. T-K1 kiriş numunesi 313 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

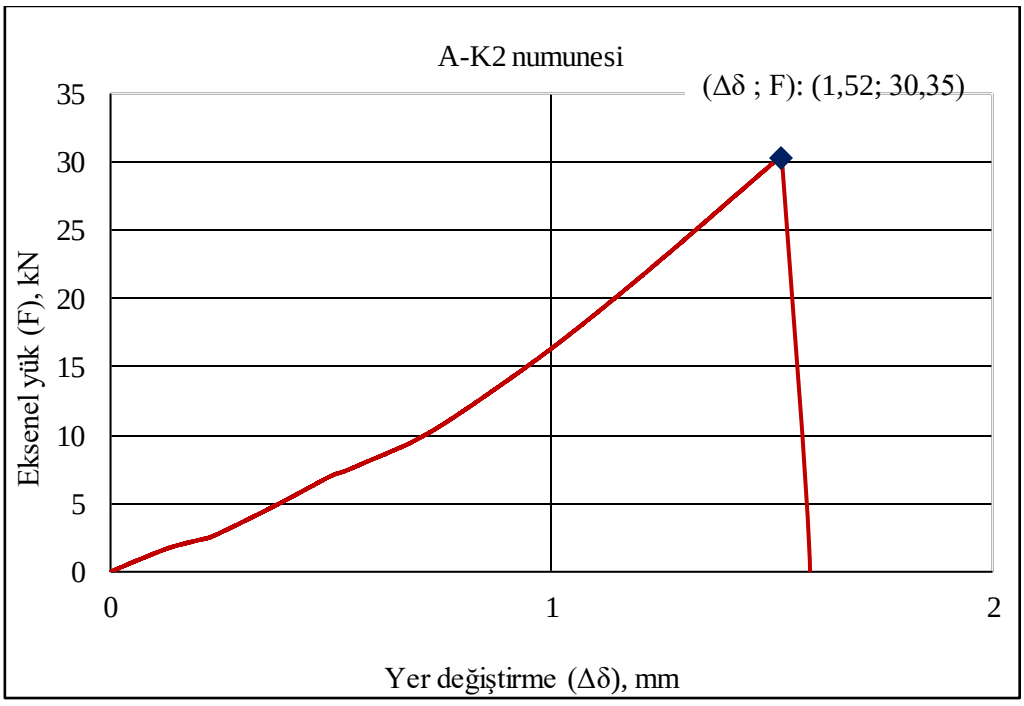


Şekil 1.24. T-K2 kiriş numunesi 313 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

EK-2. (devam) Dört nokta kiriş eğilme deneyi sonucu elde edilen eksenel kuvvet-deplasman ilişkileri

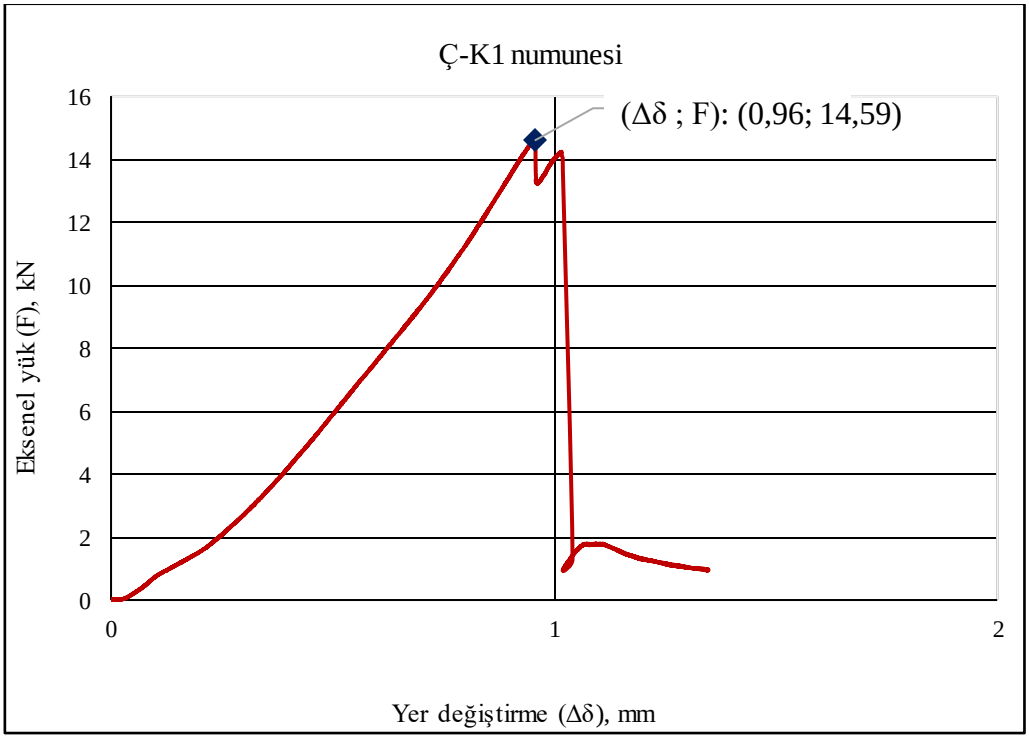


Şekil 1.25. A-K1 kiriş numunesi 313 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

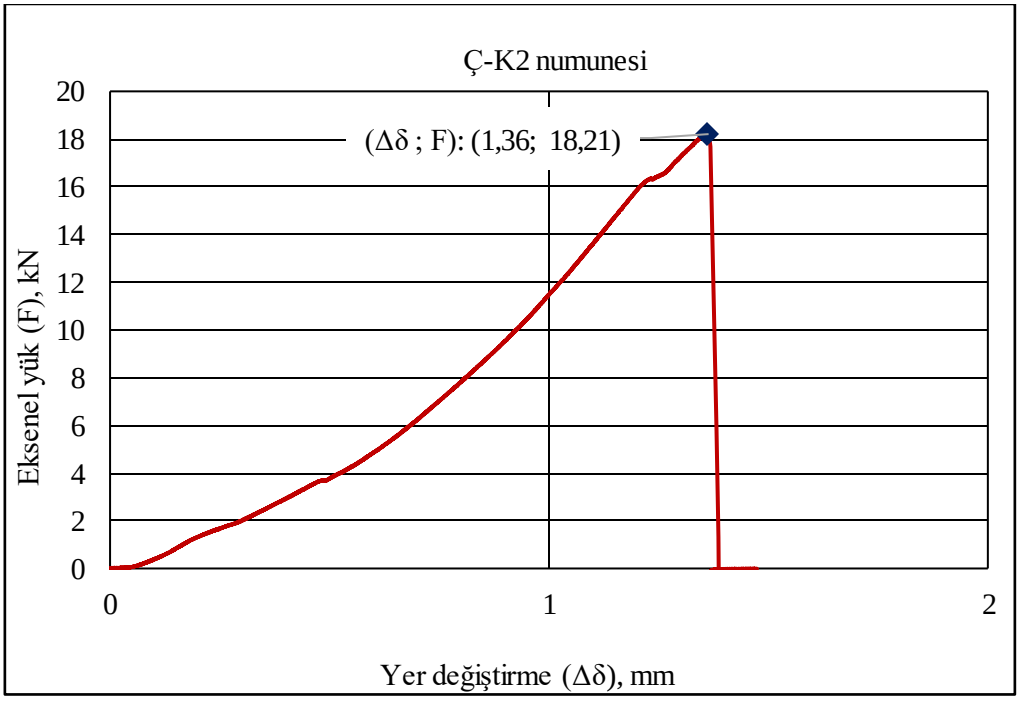


Şekil 1.26. Ç-A-2 kiriş numunesi 313 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

EK-2. (devam) Dört nokta kiriş eğilme deneyi sonucu elde edilen eksenel kuvvet-deplasman ilişkileri



Şekil 1.27. Ç-Y-1 kiriş numunesi 313 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi



Şekil 1.28. Ç-Y-2 kiriş numunesi 313 günlük eksenel kuvvet-deplasman ilişkisi

Yayınlar

Ozturk H. I., Saglik A., Demir B., and Gungor A.G. (2016). An Artificial Neural Network Base Prediction Model And Sensitivity Analysis For Marshall Mix Design. *6th Eurasphalt & Eurobitume Congress,* 1-3 June 2016, Prag, 224.

Sarici T., Demir A., Tutumluer, E., Gungor A.G., Demir, B., Epsileli, S.E., Comez S., and Ok, B. (2016). Evaluation of Geogrid Reinforced Unpaved Roads Using Large Scale Tests. *European Geosynthetics Congress (EuroGeo 6),* 25-28 September, Ljubljana, 1181-1193.

Saglik, A., Demir B., Oral H., Ozturk T., and Gungor A.G. (2016). Development and Performance of New Additives for Warm Mix Asphalt Technologies. *6th Eurasphalt & Eurobitume Congress,* 1-3 June 2016, Prag, 267.

Gungor A.G., Saglik A., and Demir B. (2016). A Proposed New Design Method for Bituminous Surface Treatments. *6th Eurasphalt & Eurobitume Congress,* 1-3 June 2016, Prag, 268.

Satici O., Gungor A.G. (2015). Effects of Paleo-Rock Landslide and Heavy Rainfalls to Tunnel Excavation. *ITA WTC 2015 Congress and 41st General Assembly,* 22-28 May, Croatia, 6161.

Karasahin, M., Aktas, B., Gungor, A.G., Orhan F., and Gurer, C. (2014). Laboratory And In-Situ Investigation Of Chip Seal Surface Condition Improvement. *Journal of Performance of Constructed Facilities,* 29 (2), 04014047.

Özay, O., Orhan F., Güngör A.G., ve Öztürk E.A. (2013). Poroz Asfalt Karışımların Performansı. *6. Ulusal Asfalt Sempozyumu,* 27-28 Kasım, Ankara, 76-88.

Karaşahin, M., Gürer C., Güngör, A.G., Saltan M., Orhan F., Aktaş B., Taciroğlu, M.V., Çetin S., ve Uz E.U. (2013). İmalat Parametrelerinin Sathi Kaplama Performansı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. *6. Ulusal Asfalt Sempozyumu,* 27-28 Kasım, Ankara, 95-108.

Sağlık A., Demir B., ve Güngör A.G. (2013). Kazılmış Asfalt Kaplamaların Yerinde Soğuk Geri Dönüşüm Olarak Kullanımı KGM Uygulamaları. *6. Ulusal Asfalt Sempozyumu,* 27-28 Kasım, Ankara, 32-41.

Güngör, A.G., Sağlık, ve A., Ünal, N. (2013). Karayolları Genel Müdürlüğü Beton Yol Deneme Kesimleri Performans Değerlendirmesi. *Beton 2013-Hazır Beton Kongresi Çağrılı Bildiriler Kitapçığı,* 21-23 Şubat, İstanbul, 96-111.

Gurer C., Karasahin M., Aktas, B., Cetin S., Uz V.E., Gungor A.G., and Orhan F. (2012). Investigation Surface Characteristics Of Chip Seals Under Hot Clmate With Nondeststuctive Tests. *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress,* 13-15 June, Istanbul, A5EE-334.

Gungor, A.G., and Saglik A. (2012). Resilient Modulus Of Unbound And Bituminous Bound Road Materials. *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress,* 13-15 June, Istanbul, A5EE-455.

Gungor, A.G., and Saglik A. (2012). Evaluation of Rutting Performance of Neat and Modified Binders Using Zero Shear Viscosity. *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress*, 13-15 June, Istanbul, A5EE-456.

Saglik, A., Gungor, A.G., Orhan F., Ozay, O., and Ozturk E.A. (2012). Evaluation Of Performance Grades And Polymer Dispersion Of Polymer Modified Binders. *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress,* 13-15 June, Istanbul, A5EE-457.

Gungor A.G., Orhan F., and Kasak S. (2012). The Determination Of Performance Of Wearing Course Mixtures Using Advanced Asphalt Tests. *5th Eurasphalt & Eurobitume Congress,* 13-15 June, Istanbul, A5EE-452.

Karasahin, M., Gungor A.G., Aktas B., Uz V.E., and Cetin S. (2010). Seal Coat Practices in Turkey. *6th ARCHENG International Architecture and Engineering Symposiums.* European University of Lefke, Gemikonagi, Lefke, 40-44.

Mollamahmutoglu, M., Yılmaz, Y., and Gungor, A.G. (2009). Effect of a Class C Fly Ash on the Geotechnical Properties of an Expansive Soil. *International Journal of Engineering Research & Development*, 1, (1).

Yilmaz, Y., Gungor A.G., and Avşar C. (2009). Stabilization of Clays Using Liquid Enzymes. *8. Bearing Capacity of Roads, Railways and Airfields Congress,* 29 June-02 July, Illinois, USA, 65.

Colerii, E., Guler, M., Gungor A.G., and Harvey, J.T. (2009). Prediction of Subgrade Resilient Modulus Using Genetic Algorithm and Curve Shifting Methodology as An Alternative to Nonlinear Constitutive Models. *Transportation Research Board 88th Annual Meeting*, 11-15 January, Washington DC, USA, 64-73.

Kavak A., Güngör A.G., Avşar C., Yönter G., Tokgöz M., ve Akyarlı A. (2009). Kil Oranı Yüksek Bir Dolgu Malzemesinin Kireç İle Stabilizasyonu. *14. Ulusal Kil Sempozyumu,* 1-3 Ekim, Trabzon, 401-410.

Güngör, A.G., ve Sağlık A. (2009). Normal ve Modifiye Bitümlerin Kalıcı Deformasyonlara Karşı Direncinin Sıfır Kesme Viskozitesi İle Belirlenmesi. *5. Ulusal Asfalt Sempozyumu,* 18-19 Kasım, Ankara, 24-32.

Güngör A.G., Orhan F., Kaşak S., ve Çubuk M.K. (2009). Diatomit'in Taş Mastik Asfalt Karışımında Kullanılması. *5. Ulusal Asfalt Sempozyumu,* 18-19 Kasım, Ankara, 97-112.

Güngör A.G., Orhan F., Kaşak S., Çalışkol A., ve Yönter G. (2009). Kazılmış Asfalt Kaplamaların Yeniden Kullanımı KGM Uygulamaları. *5. Ulusal Asfalt Sempozyumu,* 18-19 Kasım, Ankara,74-89.

Güngör, A.G., Sağlık A., Orhan F., ve Öztürk E.A. (2009). Polimer Modifiye Bitümlerin Superpave Performans Sınıflarının Belirlenmesi. *5. Ulusal Asfalt Sempozyumu,* 18-19 Kasım, Ankara, 33-45.

Güngör, A.G., Sağlık A., ve Çalışkol A. (2009). Yansıma Çatlaklarının Önlenmesinde Ara Tabakaların Kullanımı. *5. Ulusal Asfalt Sempozyumu,* 18-19 Kasım, Ankara, 211-219.

Güngör A.G., ve Sağlık A. (2009). Mekanistik Ampirik Üstyapı Tasarımında Esneklik Modülünün Şartnamelere Uyarlanması. *5. Ulusal Asfalt Sempozyumu,* 18-19 Kasım, Ankara,171-185.

Orhan F., ve Güngör A.G. (2009). Bitümlü Kaplama Agregaları ve Karışımları İle İlgili Avrupa Standartları. *5. Ulusal Asfalt Sempozyumu,* 18-19 Kasım, Ankara, 195-207.

Güngör A.G., Orhan F., ve Kaşak S. (2009). Bitümlü Sıcak Karışım Aşınma Tabakalarının Performanslarının İleri Deneyler İle Belirlenmesi. *5. Ulusal Asfalt Sempozyumu,* 18-19 Kasım, Ankara, 240-249.

Gürer C., Karaşahin M., ve Güngör A.G. (2008). Bitümlü Sıcak Karışım Kaplamaların İyileştirilmesinde Sathi Kaplama Uygulamaları. *Karayolları 1. Ulusal Kongresi,* 1-3 Nisan, Ankara, 43-55.

Güngör A.G., Orhan F., Kaşak S., ve Dost Y. (2008). Kazılmış Asfalt Kaplamaların Yeniden Kullanılması. Karayolları 1. Ulusal Kongresi, 1-3 Nisan, Ankara, 112-125.

Güngör A.G., ve Sağlık A. (2008). Türkiye Bitümlerinin Performans Sınıflarının Belirlenmesi. *Karayolları 1. Ulusal Kongresi,* 1-3 Nisan, Ankara, 178-192.

Kavak A., Güngör A.G., Avşar C., ve Atbaş B. (2008). Kireç İle Zemin Stabilizasyonu, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi,* 16-17 Ekim, Konya, 204-209.

Kavak A., Güngör A.G., Avşar C., Atbaş B., ve Akyarlı A. (2008). Bölünmüş Yol Çalışmalarında Bir Kireç Stabilizasyonu Uygulaması. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi,* 16-17 Ekim, Konya, 177-186.

Coleri, E., Guler M., Avsar, C., Gungor A.G., and Ozay O. (2008). Correlation Between Light Falling Weight Deflectometer Results and Laboratory Measured Elastic Response of Unbound Materials. *Fourth International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials,* 21-25 September, Atlanta, 831-837.

Atasaral M., Gungor A.G., Orhan F., Kasak S., and Cubuk, M.K. (2008). The Use Of Diatomite in the Stone Mastic Asphalt Mixture. *4th Eurasphalt & Eurobitume Congress,* 21-23 May, Copenhagen, 500-034, 1-10.

Mollamahmutoglu, M., Yilmaz Y., and Gungor A.G. (2005). Stabilization of Expansive Soils of Bursa (Turkey) Region Highway Fills Using Fly Ash. *International Conference on Problematic Soils,* Eastern Mediterranean University, Famagusta, North Cyprus, 25-27 May, (3), 250-259.

Birand A.A., Ünver A.M., Akçelik N., Güngör A.G., ve Düzgün T. (2002). Kohezyonlu Zeminde Taban Kayalarına Oturan Kısa Bir Fore Kazığın Yatay Yükleme Deneyi Altındaki Davranışı. *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi,* 21-22 Ekim, Eskişehir, 694-603.

Akçelik N., Etkesen Z., Güngör A.G., Akyüzoğlu M., Bozkurt Ş., Mısırlı E., ve Timur İ. (2002). Karayollarında Heyelanlar ve Çözüm Örnekleri, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi,* 21-22 Ekim, Eskişehir, 584-593.

Hobiler

Kitap okumak, balık tutmak, müzik, sinema, tiyatro.



GAZİ GELECEKTİR...