



**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**POLİÜRETAN REÇİNE BAĞLAYICISININ YOL KAPLAMA
İNŞASINDA KULLANILABİLİRLİĞİ**

Furkan KINAY

**Ocak-2026
BATMAN**

**T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

DOKTORA TEZİ

**POLİÜRETAN REÇİNE BAĞLAYICISININ YOL KAPLAMA
İNŞASINDA KULLANILABİLİRLİĞİ**

Furkan KINAY

**Danışman
Doç. Dr. Abdulrezzak BAKIŞ**

Diğer Jüri Üyeleri

Prof.Dr. Hakan ÇOBAN

Prof. Dr. Murat KARACASU

Prof. Dr. Turan ARSLAN

Dr. Öğr. Üyesi Murat BATAN

**Ocak-2026
BATMAN**

TEZ KABUL VE ONAYI

Furkan KINAY tarafından hazırlanan “Poliüretan Reçine Bağlayıcısının Yol Kaplama İnşasında Kullanılabilirliği” adlı tez çalışması 19/01/2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı’nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

İmza

Başkan

Prof. Dr. Hakan ÇOBAN

.....

Danışman

Doç. Dr. Abdulrezzak BAKIŞ

.....

Üye

Prof. Dr. Murat KARACASU

.....

Üye

Prof. Dr. Turan ARSLAN

.....

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Murat BATAN

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYANI

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını beyan eder, aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabullendiğimi bildiririm.

ETHICAL DECLARATION

I declare that all the information in this thesis has been obtained within the framework of ethical behavior and academic rules, and that the source of any statements and information that do not belong to me in this study prepared in accordance with the thesis writing rules has been fully cited, and I declare that I accept all kinds of legal responsibility in case of any contrary situation.

Furkan KINAY
Tarih:19/01/2026

ÖZET

DOKTORA TEZİ

POLİÜRETAN REÇİNE BAĞLAYICISININ YOL KAPLAMA İNŞASINDA KULLANILABİLİRLİĞİ

Furkan KINAY

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Abdulrezzak BAKIŞ

2026, 83 Sayfa

Deprem sonrası yıkılan veya ağır hasar gören karayolunun yeniden inşası için şu anda geleneksel olarak bitüm veya çimento bağlayıcılı yol kaplamaları kullanılmaktadır. Her iki bağlayıcı ile yapılan yol kaplamaları 3–24 saat arası trafiğe açılmaktadır. Bu tez çalışmasında poliüretan reçine bağlayıcısı ve agrega kullanarak yeni bir yol kaplaması inşa edildi. Çalışmanın diğer bir önemi ise, yol kaplama inşasında, kaplama üretimi için karışımda su kullanılmamasıdır. Bitüm bağlayıcılı yol kaplamasında ana madde bitümdür. Çimento bağlayıcılı beton yollarda ise karışımda su kullanılmaktadır. Günümüzde iklimsel değişimlerden dolayı kuraklık sorununun ortaya çıktığı ve su kaynaklarının hızla tükendiği bilinmektedir. Beton üretimlerinde önemli miktarlarda su kullanılmakta ve bu durum su kaynaklarının daha da azalmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada oluşturulan poliüretan reçine bağlayıcılı yol kaplamasında, bağlayıcı olarak çimento veya bitüm içermeyen, karışımında su bulunmayan yeni bir kaplama türü ortaya çıkarıldı. Yol kaplamaları asfalt ve beton kaplama olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tez çalışmasında, poliüretan reçine bağlayıcılı yeni bir yol kaplaması oluşturuldu. Poliüretan reçine bağlayıcılı yol kaplaması, bağlayıcı olarak çimento veya bitüm içermeyen, karışımında su bulunmayan yeni bir kaplama türüdür. Karışımda kullanılan bağlayıcı malzeme, iki bileşenli poliüretan reçinedir. Poliüretan reçine bağlayıcılı yol kaplama üretiminde karışım, poliüretan reçine ve agrega olmak üzere iki materyalden oluşturuldu. Agrega ve bağlayıcı karışım oranları belirlendikten sonra oluşturulan numunelere dört farklı kür uygulandı. Kür sonrası numunelere basınç deneyi, eğilme deneyi, Böhme aşınma deneyi, donma-çözülme deneyi, yangın deneyi, yapışma dayanım deneyi, ultrasonik darbe hızı (UPV) deneyi, SEM-EDX analizi, XRD analizi, FT-IR analizi yapıldı. Ayrıca tez çalışmasında oluşturulan yeni kaplama türünün asfalt ve beton kaplamalarla maliyet karşılaştırması yapıldı. Tez çalışması kapsamında oluşturulan yeni tip kaplamanın basınç dayanımı 41,22 MPa, eğilme dayanımı 25,32 MPa, Böhme aşınma değeri 0,99 cm³/50 cm², donma-çözülme deneyi birim alan başına kütle kaybı 0,77 kg/m² olarak elde edildi. Bu değerlerin şartname limitlerini karşıladığı görüldü.

Anahtar Kelimeler: Poliüretan reçine yol kaplaması, Basınç ve eğilme deneyi, Böhme aşınma deneyi, Donma-çözülme deneyi, Ultrasonik darbe hızı (UPV) deneyi, Yapışma dayanım deneyi, SEM-EDX ve XRD analizi, FT-IR analizi.

ABSTRACT
DOCTORAL THESIS
USABILITY OF POLYURETHANE RESIN BINDER IN ROAD PAVEMENT
CONSTRUCTION

Furkan KINAY

Batman University Graduate Education Institute

Department of Civil Engineering

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Abdulrezzak BAKIŞ

2026, 83 Pages

For the reconstruction of the highway that was destroyed or severely damaged after the earthquake, bitumen or cement-bound road coatings are currently used traditionally. Road coatings made with both binders are opened to traffic between 3-24 hours. In this thesis study, a new road coating was constructed using polyurethane resin binder and aggregate. Another importance of the study is that water is not used in the mixture for coating production in the construction of the road coating. The main substance in bitumen-bound road coating is bitumen. Water is used in the mixture in cement-bound concrete roads. It is known that drought problems have emerged due to climatic changes today and water resources are rapidly depleting. Significant amounts of water are used in concrete production and this situation causes water resources to decrease even more. In the polyurethane resin-bound road coating created in this study, a new coating type that does not contain cement or bitumen as binders and does not contain water in its mixture was revealed. Road pavements are divided into two as asphalt and concrete pavement. In the thesis study, a new road pavement with polyurethane resin binder was created. Polyurethane resin binder road pavement is a new type of pavement that does not contain cement or bitumen as binders and does not contain water in its mixture. The binder material used in the mixture is two-component polyurethane resin. In the production of polyurethane resin binder road pavement, the mixture is formed from two materials: polyurethane resin and aggregate. After determining the aggregate and binder mixture ratios, four different curing were applied to the samples. After the curing, the samples were subjected to compression test, bending test, Bohme abrasion test, freeze-thaw test, fire test, adhesion strength test, ultrasonic pulse velocity (UPV) test, SEM-EDX analysis, XRD analysis, FT-IR analysis. In addition, a cost comparison was made between the new coating type created in the thesis study and asphalt and concrete pavements. The new type of pavement created within the scope of the thesis study was obtained as compression strength 41.22 MPa, bending strength 25.32 MPa, Bohme abrasion value 0.99 cm³/50 cm², freeze-thaw test mass loss per unit area 0.77 kg/m². It was seen that these values meet the specification limits.

Keywords: Polyurethane resin road pavement, Compression and bending test, Bohme abrasion test, Freeze-thaw test, Ultrasonic pulse velocity (UPV) test, Adhesion strength test, SEM-EDX and XRD analysis, FT-IR analysis.

ÖN SÖZ

Deprem gibi doğal afetler, savaş ve saldırılar sonrası yıkılan veya ağır hasar gören karayolunun yeniden inşası için şu anda geleneksel olarak bitüm veya çimento bağlayıcılı yol kaplamaları kullanılmaktadır. Her iki bağlayıcı ile yapılan yol kaplamaları 3–24 saat arası trafiğe açılmaktadır. Bu tez çalışmasında poliüretan reçine bağlayıcısı ve agregası kullanarak yeni bir yol kaplama inşası yapılmıştır. Kaplama inşasından sonra yol 3–15 dakika sonra hizmete açılabilir. Özellikle deprem sonrası yıkılan veya ağır hasar gören yolların yeniden inşasında yol inşası süresinin kısılması, insan yaşamı açısından da hayati öneme sahiptir.

Günümüzde iklimsel değişimlerden dolayı kuraklık sorununun ortaya çıktığı ve su kaynaklarının hızla tükendiği bilinmektedir. Beton üretimlerinde önemli miktarlarda su kullanılmakta ve su kaynaklarının daha da azalmasına sebep olmaktadır. Bu çalışmada oluşturulacak poliüretan reçine bağlayıcılı yol kaplamasında, bağlayıcı olarak çimento veya bitüm içermeyen, karışımında su bulunmayan yeni bir kaplama türü ortaya çıkarılmıştır. Literatürde poliüretan bağlayıcı ile yol kaplama inşasıyla ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu özgün çalışmanın literatüre katkı sağlaması beklenmektedir.

Akademik çalışmam boyunca bana paha biçilmez bir destek sağlayan, geniş bilgi birikiminden ve zengin deneyiminden yararlanarak bana etkili bir şekilde rehberlik eden değerli danışmanım Doç. Dr. Abdulrezzak BAKIŞ'a en içten şükranlarımı sunarım. Son olarak, tez çalışmamda bana destek olarak, yüksek hoşgörü ve fedakârlık gösteren sevgili eşime en derin sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Furkan KINAY
BATMAN-2026

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖN SÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELER LİSTESİ	ix
ŞEKİLLER LİSTESİ	x
KISALTMALAR	xii
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	4
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	6
3.1. Materyal	6
3.1.1. Agrega.....	6
3.1.2. Poliüretan reçine	7
3.2. Yöntem.....	9
3.2.1. Basınç deneyi.....	10
3.2.2. Eğilme deneyi	11
3.2.3. Donma-çözülme deneyi	12
3.2.4. Böhme aşınma deneyi	14
3.2.5. Yangın deneyi	16
3.2.6. Ultrasonik darbe hızı (ultrasonic pulse velocity-UPV) deneyi.....	18
3.2.7. SEM-EDX analizi	20
3.2.8. X-ışını kırınım (XRD) analizi.....	20
3.2.9. FT-IR analizi (Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi)	20
3.2.10. Yapışma dayanım deneyi.....	21
3.2.10.1. Beton yol kaplaması üzerine termoset beton yol kaplaması.....	23
3.2.10.2. Termoset yol kaplaması üzerine termoset beton yol kaplaması	27
3.2.10.3. Asfalt yol kaplaması üzerine termoset beton yol kaplaması.....	29
3.2.11. Maliyet karşılaştırmaları	30
3.2.11.1. Esnek üstyapı kalınlık ve maliyet hesaplaması.....	30
3.2.11.2. Rijit üstyapı kalınlık ve maliyet hesaplaması	35
3.2.11.3. Termoset beton kaplama kalınlık ve maliyet hesaplaması	39
3.2.12. Termoset beton kaplamanın diğer yapılarda uygulanabilirliği	41
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	43
4.1. Optimum Bağlayıcı Kıvam Oranının Belirlenmesi	43
4.1.1. Bağlayıcı kıvam oranı 1. durum ($V_p=\%20$, $V_i=\%80$).....	43
4.1.2. Bağlayıcı kıvam oranı 2. durum ($V_p=\%30$, $V_i=\%70$).....	43
4.1.3. Bağlayıcı kıvam oranı 3. durum ($V_p=\%50$, $V_i=\%50$).....	44
4.1.4. Bağlayıcı kıvam oranı 4. durum ($V_p=\%70$, $V_i=\%30$).....	44

4.1.5. Bağlayıcı kıvam oranı 5. durum ($V_p=\%80$, $V_i=\%20$).....	44
4.2. Agrega ve Bağlayıcı Karışım Oranlarının Belirlenmesi.....	45
4.3. Agrega Elek Analizinin Yapılması	46
4.4. Basınç Deneyleri.....	46
4.5. Eğilme Deneyleri	50
4.6. Ultrasonik Darbe Hızı (Ultrasonic Pulse Velocity-UPV) Deneyleri	52
4.7. Böhme Yüzey Aşınma Deneyleri	54
4.8. Donma-Çözülme Deneyleri	55
4.9. SEM-EDX Analizleri.....	57
4.10. XRD (X Işınları Analizi)	59
4.11. FT-IR Analizi (Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi)	60
4.12. Yol Üstyapısı Maliyet Hesaplamaları.....	61
4.12.1. Esnek üstyapı maliyet hesaplaması.....	61
4.12.2. Rijit üstyapı maliyet hesaplaması (C30/37 beton kaplama)	62
4.12.3. Rijit üstyapı maliyet hesaplaması (termoset beton kaplama)	63
4.13. Yangın Deneyleri	64
4.14. Yapışma Dayanım Deneyleri	67
4.14.1. Beton yol kaplaması üzerine termoset beton yol kaplaması.....	67
4.14.2. Termoset beton yol kaplaması üzerine Termoset beton yol kaplaması.....	70
4.14.3. Eski asfalt yol kaplaması üzerine yeni termoset beton yol kaplaması.....	72
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	75
KAYNAKLAR	79
EKLER	84

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge 3.1. Donma-çözülme deneyi için sıcaklık ve zaman döngüleri (TS 2824 EN 1338, 2005)	13
Çizelge 3.2. Yapışma dayanım deney cihazı teknik özellikleri	21
Çizelge 3.3. Tavsiye edilen güvenilirlik değerleri	31
Çizelge 3.4. Esnek üstyapı SN kontrolü	33
Çizelge 3.5. Esnek üstyapı tabaka cinslerine göre birim fiyatlar	34
Çizelge 3.6. Tavsiye edilen yük transfer katsayıları (AASHTO, 1993)	36
Çizelge 3.7. Tavsiye edilen drenaj katsayıları (AASHTO, 1993)	37
Çizelge 3.8. C30/37 tabaka cinslerine göre birim fiyatlar (KGM, 2024; ÇŞB, 2024) ...	38
Çizelge 3.9. 1 km uzunluktaki C30/37 beton kaplamalı rijit üstyapı toplam maliyeti ...	38
Çizelge 3.10. Termoset beton tabaka cinslerine göre birim fiyatlar (KGM, 2024)	40
Çizelge 3.11. 1 km uzunluktaki termoset beton kaplamalı üstyapı toplam maliyeti	40
Çizelge 4.1. Malzeme karışım oranları	45
Çizelge 4.2. Elek analizi	46
Çizelge 4.3. Basınç dayanım sonuçları	47
Çizelge 4.4. Şahit numune basınç dayanım sonucu	50
Çizelge 4.5. Şahit numune eğilme dayanım sonucu	52
Çizelge 4.6. İdeal numune eğilme dayanım sonucu	52
Çizelge 4.7. Şahit numune UPV deney sonuçları	53
Çizelge 4.8. İdeal numune UPV deney sonuçları	53
Çizelge 4.9. Böhme aşınma deney sonuçları	55
Çizelge 4.10. Donma-çözülme testi için sıcaklık ve zaman döngüleri	55
Çizelge 4.11. Donma-çözülme deneyi sonrası numunelerin basınç deney sonuçları	56
Çizelge 4.12. 1 km uzunluktaki esnek üstyapı toplam maliyeti	62
Çizelge 4.13. 1 km uzunluktaki C30/37 beton kaplamalı rijit üstyapı toplam maliyeti .	62
Çizelge 4.14. 1 km uzunluktaki termoset beton kaplamalı üstyapı toplam maliyeti	63
Çizelge 4.15. $W_{8,2}$ değerine göre kaplama kalınlıkları (cm)	63
Çizelge 4.16. $W_{8,2}$ değerlerine göre üstyapı toplam maliyetleri (TL)	63
Çizelge 4.17. Beton kaplama yüzeyine termoset beton kaplama uygulamasında yapışma dayanım deney sonuçları	69
Çizelge 4.18. Termoset beton yüzeyine termoset beton kaplama uygulamasında yapışma dayanım deney sonuçları	72
Çizelge 4.19. Asfalt kaplama yüzeyine termoset beton kaplama uygulamasında yapışma dayanım deney sonuçları	74
Çizelge 5.1. Temoset beton deney sonuçları	76

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 3.1. Kuvars agrega görünümü (3–5 mm).....	6
Şekil 3.2. Kuvars agrega görünümü (1–3 mm).....	7
Şekil 3.3. Kuvars agrega görünümü (0–1 mm).....	7
Şekil 3.4. Poliüretan reçine bileşeninden polyol görünümü	8
Şekil 3.5. Poliüretan reçine bileşeninden izosiyanat görünümü	9
Şekil 3.6. Basınç dayanımı deney cihazı	10
Şekil 3.7. Eğilme dayanımı deney cihazı.....	11
Şekil 3.1. Eğilme deneyinden bir görüntü	12
Şekil 3.8. Eğilme deneyi temsili görünümü.....	12
Şekil 3.9. Donma-çözülme sıcaklık ve zaman döngüleri.....	13
Şekil 3.10. Donma-çözülme sıcaklık ve zaman döngüleri.....	14
Şekil 3.11. Yoğunluk tespiti için Arşimet terazi görünümü	15
Şekil 3.12. Zımpara tozu tartım görüntüsü	15
Şekil 3.13. UPV deney cihazı	19
Şekil 3.14. Beton kaplama üzerine termoset kaplama uygulama enkesiti.....	23
Şekil 3.15. Beton yol kaplaması üzerine termoset beton yama uygulama enkesiti.....	23
Şekil 3.16. Yapışma deneyi hazırlık aşaması	24
Şekil 3.17. Beton yüzeyine termoset beton için kalıp konulması.....	24
Şekil 3.18. Kalıp içerisine termoset beton döküm aşaması	25
Şekil 3.19. Termoset betonun sertleşme aşaması: (a) Başlangıç (b) 1,5 dakika sonra ...	25
(c) 3 dakika sonra.....	25
Şekil 3.20. Termoset betonun normal dayanımlı beton yüzeyinde sertleşme aşaması	
sonrası görünümü.....	26
Şekil 3.21. Termoset betonun sertleştikten sonra, üzerine yapıştırıcı sürülmesi	26
Şekil 3.22. Yapışma deneyi çekme diskinin kurumaya bırakılması	27
Şekil 3.23. Termoset beton yol kaplaması üzerine termoset beton yol kaplama uygulama	
enkesiti	27
Şekil 3.24. Termoset beton yol kaplaması üzerine termoset beton yama uygulama	
enkesiti	28
Şekil 3.25. Termoset betonun termoset beton yüzeyinde sertleşme aşaması sonrası	
görünümü	28
Şekil 3.26. Yapışma deneyi çekme diskinin kurumaya hazır hale getirilmesi	29
Şekil 3.27. Asfalt kaplama üzerine termoset kaplama uygulama enkesiti.....	29
Şekil 3.28. Asfalt yol kaplaması üzerine termoset beton yama uygulama enkesiti.....	30
Şekil 3.29. Asfalt yüzeye termoset beton kaplama dökümü.....	30
Şekil 3.30. Beton tünel kaplaması üzerine kalıp veya enjeksiyon yoluyla termoset beton	
uygulama enkesiti	42
Şekil 3.31. Beton kanal kaplaması üzerine kalıp veya enjeksiyon yoluyla termoset beton	
uygulama enkesiti	42
Şekil 4.1. Poliüretan reçine ve agregadan oluşan numuneler	47
Şekil 4.2. Şahit numune görünümü.....	48
Şekil 4.3. Şahit numune basınç dayanım deney görüntüsü.....	49
Şekil 4.4. İdeal numune basınç dayanım deney görüntüsü.....	49
Şekil 4.5. Şahit numune eğilme dayanım deney sonuç görüntüsü.....	51
Şekil 4.6. İdeal numune eğilme dayanım deney sonuç görüntüsü.....	51
Şekil 4.7. UPV testinin yapılışı.....	53
Şekil 4.8. Böhme testi görünümü.....	54

Şekil 4.9. Poliüretan kaplama malzemesinin (a) SEM İmage 1.5k SE (b) SEM İmage 100 SE büyütmelelerdeki morfolojisi (c) EDX	57
Şekil 4.10. Poliüretan Kuvars karışıklı kaplama partiküllerinin (a) 1,00 k ve (b) 100 SE büyütmelelerdeki morfolojisi (c) EDX	58
Şekil 4.11. (a) Kuvars+ poliüretan, () Kuvars, Silis (), kaolin() (b) Poliüretan Kaplama XRD faz analizleri	59
Şekil 4.12. Poliüretan kaplama ve kuvars+poliüretan karışımının FT-IR sonucu.....	60
Şekil 4.13. Numune ortasından yanma durumu.....	66
Şekil 4.14. Numunenin 70 saniye aleve maruz kaldıktan sonraki durumu.....	66
Şekil 4.15. Numunenin etüvde 4 saat 223°C ısı sonrası görünümü.....	67
Şekil 4.16. Yapışma deneyi çekme diskinin cihaza tespit edilmesi.....	67
Şekil 4.17. Beton üzeri termoset kaplamada yapışma deney cihazı ve otomatik kaydedilen yapışma dayanım değeri.....	68
Şekil 4.18. Beton kaplama yüzeyine termoset beton kaplama uygulamasında numunede kopma şekli	69
Şekil 4.19. Yapışma deneyi çekme diskinin cihaza montesi ve deneyin uygulanması ..	70
Şekil 4.20. Termoset üzeri termoset kaplamada otomatik kaydedilen yapışma dayanım değeri	71
Şekil 4.21. Termoset beton kaplama yüzeyine termoset beton kaplama uygulamasında numunede kopma şekli	71
Şekil 4.22. Asfalt kaplama üzeri termoset kaplamada otomatik kaydedilen yapışma dayanım değeri.....	73
Şekil 4.23. Asfalt kaplama yüzeyine termoset beton kaplama uygulamasında numunede kopma şekli.....	73
Şekil 0.1. Poliüretan bileşeninden polyol görünümü.....	84
Şekil 0.2. Poliüretan bileşeninden izosiyanat görünümü.....	84
Şekil 0.3. Agregasız şahit termoset betonun eğilme deneyi kırılma görünümü	85
Şekil 0.4. Agregasız şahit termoset betonun eğilme deneyi kırılma sonrası görünümü .	85
Şekil 0.5. Agregalı ideal termoset betonun eğilme deneyi kırılma görünümü	86
Şekil 0.6. Agregalı ideal termoset betonun eğilme deneyi kırılma sonrası görünümü ...	86
Şekil 0.7. Termoset beton basınç deneyi numuneleri	87
Şekil 0.8. Şahit termoset beton numunesinin basınç deneyine alınması	87
Şekil 0.9. İdeal termoset beton numunesinin basınç deneyine alınması.....	88
Şekil 0.10. Böhme aşınma deneyi öncesi numune görünümü	88
Şekil 0.11. Böhme aşınma deney görünümü	89

KISALTMALAR

AASHTO	: Amerikan Devlet Karayolu ve Ulaştırma Yetkilileri Birliği
AC	: Asfalt Çimentosu
ÇŞB	: Çevre Şehircilik Bakanlığı
EC	: Avrupa Komisyonu
EDX	: Enerji Dağılımlı X-Işını
FT-IR	: Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi
KGM	: Karayolları Genel Müdürlüğü
PUR	: Poliüretan
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
UL	: Underwriters Laboratuvarları
UPV	: Ultrasonik Darbe Hızı
XRD	: X-Işını Kırınımı

1. GİRİŞ

Deprem, sel gibi doğal afetler, savaş ve benzeri saldırılar sonucunda birçok ulaşım yapısı yıkılmakta veya ağır hasar almaktadır. Yıkılan veya ağır hasar gören bu yapılardan bazıları şunlardır:

- Karayolları
- Demiryolları
- Tüneller
- Köprüler
- Petrol boru hatları
- Diğer ulaşım yapıları

Yıkılan veya ağır hasar gören bu yapıların en kısa sürede yeniden inşa edilerek hizmete sunulması gerekmektedir. Son yaşanan depremler sonrası deprem bölgesindeki bazı karayolları yıkılmış veya ağır hasar alarak kullanılamayacak duruma gelmiştir. Deprem sonrası karayollarının ağır hasar görerek hizmet dışı kalması sonucu, ulaşım problemleri baş göstermiştir. Bu yolların yıkılması veya ağır hasar görmesi sonucu afet sonrası deprem bölgelerine ulaşımında sorunlarla karşı karşıya kalınmıştır. Yolların tamamen yıkılması veya ağır hasar alması sonucu ambulans ve sağlık hizmetlerinde sıkıntıların ortaya çıkabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Bir yaralının karayolu ambulansıyla en kısa zamanda sağlık merkezine ulaştırılabilmesi için yıkılan veya ağır hasar gören yolun en kısa sürede hizmete sunulması gerekmektedir. Göçük altından can kurtarma faaliyetleri ve yaralıların karayolu ambulansıyla hastaneye yetiştirilmesinde hızlı ulaşım hayati bir öneme sahiptir. Bir deprem can kurtarma ekibinin olay yerine karayoluyla 1 saatte ulaşmasıyla 24 saatte ulaşması arasında çok büyük bir farkın olduğu açıktır. Bunun yanında bir yaralının da aynı şekilde en kısa zamanda hastaneye ulaştırılması hayati öneme sahiptir.

Deprem sonrası yıkılan veya ağır hasar gören karayolunun yeniden inşası için şu anda geleneksel olarak bitüm veya çimento bağlayıcılı yol kaplamaları kullanılmaktadır. Her iki bağlayıcı ile yapılan yol kaplamaları 3–24 saat arası trafiğe açılmaktadır.

Bu tez çalışmasında poliüretan reçine bağlayıcısı ve agrega kullanarak yeni bir yol kaplaması oluşturuldu. Literatürde poliüretan bağlayıcı ile yol kaplama inşasıyla ilgili

herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu özgün çalışmanın literatüre katkı sağlaması beklenmektedir.

Çalışmanın diğer bir önemi ise, yol kaplama inşasında, kaplama üretimi için karışımda su kullanılmamasıdır. Bitüm bağlayıcılı yol kaplamasında ana madde bitümdür. Bitüm ithal bir malzeme olduğundan pahalı bir üründür. Ayrıca bitümlü kaplamalar ağır trafik yüklerine ve iklimsel etkilere karşı dayanıksız olduğundan beş yılda bir bakım isterler ve bakım maliyetleri yeni bir yol yapımı kadar masraflıdır. Petrol kaynakları her geçen gün azalmakta ve bu durum bitümün giderek daha pahalı olmasına yol açmaktadır. Çimento bağlayıcılı beton yollarda ise karışımda su kullanılmaktadır. Günümüzde iklimsel değişimlerden dolayı kuraklık sorununun ortaya çıktığı ve su kaynaklarının hızla tükendiği bilinmektedir. Beton üretimlerinde önemli miktarlarda su kullanılmakta ve bu durum su kaynaklarının daha da azalmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada oluşturulan poliüretan reçine bağlayıcılı yol kaplamasında, bağlayıcı olarak çimento veya bitüm içermeyen, karışımında su bulunmayan yeni bir kaplama türü ortaya çıkarıldı. Sonuç olarak tez çalışmasının en önemli iki amacı aşağıda belirtilmiştir:

- Doğal afetler sonrası yıkılan veya ağır hasar gören yol kaplamasında, kaplamanın 5–15 dakikada kürünü tamamlayarak trafiğe açılması,
- Su kaynaklarının hızla azaldığı günümüzde, yol kaplama inşası için kaplama üretiminde su kullanılmaması.

Yol kaplamaları genel olarak asfalt ve beton kaplama olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tez çalışmasında, üçüncü bir yol kaplaması sınıflandırmasına dâhil olabilecek poliüretan reçine bağlayıcılı yol kaplaması oluşturulacaktır. Poliüretan reçine bağlayıcılı yol kaplaması, bağlayıcı olarak çimento veya bitüm içermeyen, karışımında su bulunmayan yeni bir kaplama türüdür. Karışımda kullanılan bağlayıcı malzeme, iki bileşenli poliüretan reçinedir. Poliüretan reçine bağlayıcılı yol kaplama üretiminde, karışım poliüretan reçine ve agrega olmak üzere iki materyalden oluşturuldu.

Plastikler temel olarak 3 ana grup altında toplanmaktadır. Bunlar;

- Termoplastik
- Termoset
- Elastomer

Poliüretan reçineler, plastiklerin termosetler gurubu içerisine girmektedir. Termosetlerin rijitlik özelliklerinden dolayı, elastik modülü ve dayanımları diğer polimer çeşitlerine (termoplastik ve elastomerler) göre daha yüksektir. Termoset malzemeler

kürleşme süreçlerini tamamladıktan sonra güçlü bir yapı oluşturmaktadır. Poliüretanların ısıya ve korozyona dayanımları yüksektir. Poliüretanlar ilk kez Alman bilim insanı Otto Bayer tarafından 1937 yılında elde edilmiştir. İkinci Dünya Savaşı'nın hemen sonrasında, İngiltere ve Amerika Birleşik Devletleri, Almanya'dan poliüretan sentez yöntemini kullanarak, endüstriyel üretimde uygulamaya geçmiştir. Maliyetlerde önemli bir ölçüde azalmanın meydana gelmesi, poliüretanların kullanımında önemli bir artışa neden olmuştur. 1950–1960 yılları arasında Amerika Birleşik Devletleri, Almanya ve İngiltere poliüretanların gelişimine katkı sağlayan önemli ülkeler olmuştur. 1960'ın sonlarına doğru poliüretan endüstrisi daha hızlı bir şekilde gelişme göstermiştir. 2000'li yıllarda poliüretanlar yüksek performanslı gözenekli ve suya dayanıklı elastik zemin geliştirilmesi ve benzeri alanlarda kullanılmıştır. Poliüretanlar dayanıklı, hafif ve işlenebilir yapıdadır. Poliüretanlar; metallerin dayanıklılık ve sertlik özellikleriyle kauçuğun esneklik özelliğini bir arada barındırdığından, mühendislikte kullanılan metal, plastik ve kauçuğun yerini almıştır. Poliüretan reçinenin iki ana bileşeni, reçine (polyol) ve sertleştiricidir (izosiyanat). Her ikisinin karışımıyla farklı kıvamlarda poliüretan reçine elde edilebilmektedir (Szycher 2012; Engels et al. 2013; Randall & Lee 2002; <https://tr.wikipedia.org> 2023). Tez çalışması sonrası bilimsel literatüre “Poliüretan Reçine Bağlayıcı Termoset Yol Kaplaması” olarak katkı sağlanmıştır. Tez çalışmasıyla poliüretan reçine bağlayıcı termoset yol kaplamaları isimli yeni bir kaplama türü oluşturulmuştur. Poliüretan reçine bağlayıcı yol kaplama inşası pratik bir şekilde uygulanabilmektedir. Reçine, kalıp içerisine kendiliğinden yerleşebilme özelliğine sahiptir. İnşa süresi beton ve asfalt kaplamalara nazaran çok kısadır. Kısa sürede priz almasından dolayı, kaplama inşası tamamlandıktan 5-15 dakika sonra yol trafiğe açılabilir. Hızlı kür olması tezin ana amaçlarına uygundur. Bu şekilde deprem ve benzeri nedenlerle hasar gören yapılar 5 ile 15 dakika arasında trafiğe tekrar açılabilir.

Tez çalışmasında, agrega ve bağlayıcı karışım oranları belirlendikten sonra oluşturulan numunelere dört farklı kür uygulandı. Kür sonrası numunelere basınç, eğilme, Bohme aşınma, donma-çözülme, yangın, yapışma dayanım, ultrasonik darbe hızı (UPV) deneyleri yapıldı. Ayrıca numunelerin SEM-EDX, XRD ve FT-IR analizleri yapıldı. Çalışma sonucunda oluşturulan yeni tip termoset yol kaplamasının basınç dayanımı 41,22 MPa, eğilme dayanımı 25,32 MPa, Bohme aşınma değeri 0,99 cm³/50 cm², donma-çözülme birim alan başına kütle kaybı 0,77 kg/m² olarak bulundu. Bulunan bu değerlerin yol şartname limitlerini karşıladığı görüldü.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Günümüzde poliüretanlar üzerinde çok yönlü araştırmalar yapılmaktadır. Leng vd. çalışmasında, mevcut yolların bakımı ve yeni yollar inşa etmek için yenilikçi poliüretan ince kaplama geliştirilmiştir. Çalışma sonucunda, geleneksel tünel kaplama malzemeleri ile karşılaştırıldığında, işlevsel özelliklerde ve çevresel performansta önemli iyileştirmeler gözlemlendiği belirtilmiştir. (Leng vd., 2019).

Hassan vd. çalışmasında, poliüretan malzemesiyle oluşturduğu kompozit yapıların ısı yalıtım özelliklerinin yüksek olduğu belirtilmiştir (Hassan vd., 2019).

Çağdaş ve Yıldırım (2019) çalışmasında, cam elyaf takviyeli poliüretan dış yüzölçümü sandviç kirişlerin eğilme dayanımları incelenmiştir. Çalışma sonucunda cam elyafın numunelerin eğilme dayanımlarını daha da arttırdığı ifade edilmiştir (Çağdaş ve Yıldırım, 2019).

Ding vd. çalışmasında, genleşme derzlerinin ankraj bölgesindeki betonun hızlı onarımı için poliüretan beton tasarımı optimize edilmiştir. Çalışma sonucunda yeni tip betonun olumlu sonuçlar verdiği belirtilmiştir (Ding vd., 2021).

Jia vd. çalışmasında, köprü kirişleri, genleşme düzenekleri ve yol yüzeylerinin yorulma hasarıyla ilgili sorunları çözmek amacıyla, poliüretan betonuna atık kauçuk parçacıkları eklenerek, bir tür yorulmaya dayanıklı elastik poliüretan beton elde edilmiştir (Jia vd., 2021).

Hodul vd. çalışmasında, beton ve metal alt tabakalar için tasarlanmış, yeni tipte yüksek kimyasal dirençli kaplama sistemleri tasarlanmıştır. Çalışma sonucunda, poliüretan ve epoksi reçinelere dayanan kaplamaların, kanalizasyon ve agresif kimyasal ortamların etki ettiği ortamlarda kullanılabileceği belirtilmiştir. Çalışmada geliştirilen kaplama sistemlerinin, karşılaştırılan referans kaplamalara nazaran daha iyi özellikler gösterdiği açıklanmıştır (Hodul vd., 2022).

Karaçoban (2023) çalışmasında, poliüretan reçinelerin sentezi ve karakterizasyonu incelenmiştir. Çalışmada poliüretan reçinelerin farklı karışım oranlarında esnek ve rijit yapılar oluşturulabileceği belirtilmiştir (Karaçoban, 2023).

Yapılan bir çalışmada, poliüretan kaplamaların korozyona dayanıklı olduğunu deneysel olarak kanıtlanmıştır (Schaaf vd., 2024).

Deneyssel bir çalışmada, poliüretanların temas ettiği yüzeylere yapışma özelliğinin yüksek olduğu sonucuna ulaşılmıştır (Chelmecki vd., 2024).

Garbowski vd. çalışmasında, ciddi şekilde bozulmuş bir beton rögar kapağının eski haline getirilmesi için, poliüretan kullanarak, rögar kapağının yük taşıma kapasitesini değerlendirmiştir. Çalışma sonucunda, onarım yönteminin rögar kapağının aşırı korozyona uğramış bölümlerde eğilme sertliğinin %76'sına kadarının geri kazandırıldığı belirtilmiştir (Garbowski vd., 2024).

Martha vd. çalışmasında, poliüretanın sert hava koşullarında temas ettiği malzemeyi koruduğunu belirtmiştir (Martha vd., 2024).

Zhang vd. çalışmasında, poliüretanın malzeme özelliklerine etkisi araştırmıştır. Araştırma sonucunda, poliüretan kaplı yüzeyin, malzemenin orijinal haline kıyasla, aşınma dayanımının 3 kat, çekme dayanımının ise 1,5 kattan fazla olduğu belirtilmiştir (Zhang vd., 2024).

Zhang vd. çalışmasında, derz dolgu malzemesi olarak Portland çimentosu, ultra ince çimento, poliüretan ve epoksi reçinesi malzemelerini ayrı ayrı kullanmıştır. Çalışmada, farklı derz dolgu malzemelerinin beton çatlak parametrelerine (çatlak açıklığı ve pürüzlülüğü) etkisi, geçirimsizlik testi yoluyla araştırılmıştır. Çalışma sonucunda en yüksek geçirimsizliği sağlayan dolgu malzemelerinin sırayla epoksi reçinesi, poliüretan, ultra ince çimento ve Portland çimentosu olduğu açıklanmıştır (Zhang vd., 2024).

Han vd. çalışmasında, modifiye poliüretan betonu çelik güverte döşemeleri için uygulamıştır. Çalışma sonucunda, döşeme sıcaklık değişimlerinden kaynaklanan aşırı çekme gerilimi nedeniyle meydana gelen çatlakların azaldığı, betonun çekme özelliklerinin iyileştiği, numunelerin kırılma yüzeyleri gözlenerek, farklı sıcaklıklarda bağlayıcı ve agrega arasındaki adezyonun yüksek olduğu belirtilmiştir (Han vd., 2024).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Poliüretan reçine bağlayıcılı yol kaplaması, bağlayıcı olarak çimento veya bitüm içermeyen, karışımında su bulunmayan yeni bir kaplama türüdür. Karışımında kullanılan bağlayıcı malzeme, iki bileşenli poliüretan reçinedir. Poliüretan reçine bağlayıcılı yol kaplama üretiminde, karışım iki materyalden oluşturulmuştur:

- Agregat
- Poliüretan reçine

3.1.1. Agregat

Tez çalışmasında agregat olarak 0,5–5 mm arası kırılmış kuvars agregası kullanıldı. Tüm deneylerde 0–1 mm, 1–3 mm ve 3–5 mm arası kuvars agregası kullanılmıştır. 3–5 mm kuvars agregat görünümü Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. Kuvars agregat görünümü (3–5 mm)

1–3 mm kuvars agregat görünümü Şekil 3.2’de görülmektedir.



Şekil 3.2. Kuvars agregası görünümü (1–3 mm)

0–1 mm kuvars agregası görünümü Şekil 3.3’de gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Kuvars agregası görünümü (0–1 mm)

3.1.2. Poliüretan reçine

Plastikler temel olarak 3 ana grup altında toplanmaktadır. Bunlar;

- Termoplastik

- Termoset
- Elastomer

Poliüretanlar, yapılarında üretan grubu ($-\text{NH}-\text{CO}-\text{O}-$) içeren polimerlerdir. Poliüretan zincirleri; karbon dışında hidrojen, oksijen ve azot elementlerini barındırır. Bu polimerler, üretan grubunun yanında ester, eter, üre ve amid gibi değişik fonksiyonel gruplardan bir veya birkaçını yapılarında barındırırlar. Poliüretanın kimyasal yapısı, sentezinde kullanılan monomerlere bağlı olarak farklılık göstermektedir. Poliüretanlar; sert ve yumuşak kısımlardan oluşan blok kopolimerlerdir. Polyollerden oluşan yumuşak kısımlar, poliüretana elastomerik özellik kazandırmaktadır. Diizosiyanatların oluşturduğu sert kısımlar ise poliüretanın mekanik özelliklerinde önemli rol oynar (Krol, 2007; Akgün, 2008).

Poliüretan reçineler, plastiklerin termosetler gurubu içerisine girmektedir. Poliüretan reçinenin iki ana bileşeni reçine (polyol) ve sertleştiricidir (izosiyanat). Her ikisinin karışımıyla farklı kıvamlarda poliüretan reçine elde edilebilmektedir (Szychver 2012; Engels et al. 2013; Randall & Lee 2002; <https://tr.wikipedia.org> 2023). Tez çalışmasında kullanılan bağlayıcı bileşenlerinden polyol birim hacim ağırlığı (γ_p) $0,92 \text{ g/cm}^3$ ve izosiyanat birim hacim ağırlığı (γ_i) $1,14 \text{ g/cm}^3$ dür. Şekil 3.4' de poliüretan reçine bileşenlerinden polyol görülmektedir.



Şekil 3.4. Poliüretan reçine bileşeninden polyol görünümü

Şekil 3.5'de poliüretan reçine bileşenlerinden izosiyanat görülmektedir.



Şekil 3.5. Poliüretan reçine bileşeninden izosiyanat görünümü

3.2. Yöntem

Agrega ve bağlayıcı karışım oranları belirlendikten sonra numunelere aşağıdaki kürler uygulanmıştır:

- 7 gün hava kürü
- 7 gün su kürü
- 28 gün hava kürü
- 28 gün su kürü

Kür sonrası numunelere aşağıdaki deney ve analizler uygulanmıştır:

- Basınç deneyi (TS EN 12390-3)
- Eğilme deneyi (TS EN 12390-5)
- Böhme aşınma deneyi (TS 2824 EN 1338)
- Donma-Çözülme deneyi (TS 2824 EN 1338)
- Yangın deneyi (UL94, 2000/147/EC, TS EN 2/A1)
- Ultrasonik darbe hızı (Ultrasonic pulse velocity-UPV) deneyi (TS EN 12504-4)
- Yapışma dayanım deneyi (TS EN 1542)
- SEM-EDX Analizi
- XRD Analizi
- FT-IR Analizi

Tez çalışması sonrası ayrıca yeni oluşturulan ürünün maliyet hesaplamaları da yapılarak asfalt ve beton yol kaplamalarla karşılaştırılmıştır.

3.2.1. Basınç deneyi

Basınç deneyleri TS EN 12390-3 (2010) standardına uygun olarak yapıldı. TS EN 12390-3:2010 standardına uygun olarak, basınç testi aparatının yükleme hızı 0,4 MPa/s olarak seçildi. Numuneler 150×150×150 mm boyutlarında hazırlandı ve kür sonrası deneye tabi tutuldu. Basınç deneyi Eşitlik 3.1’de verilen formül ile hesaplanabilmektedir. Deney sonrası numunelerin basınç dayanımı cihaz tarafından otomatik olarak hesaplandı.

$$F_n = P/D_n \quad (3.1)$$

Eşitlikteki değerler;

F_n : Basınç Dayanım Miktarı (MPa ya da N/mm²),

P : Numunenin basınç altındaki maksimum yükü (N),

D_c : Yükün uygulandığı yüzey alan (mm²)

Tüm basınç deneyleri Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında yapılmıştır. Basınç deney cihazı Şekil 3.6’da görülmektedir.



Şekil 3.6. Basınç dayanımı deney cihazı

3.2.2. Eğilme deneyi

TS EN 12390-5 (2010) standardına uygun olarak, cihaz deney hızı 0,50 N/s, Önyükleme 80,0 N olacak şekilde eğilme deney cihazı ayarlandı. Tüm eğilme deneyleri Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarında gerçekleştirildi. Deney numunelerinin eğilme dayanım değeri, TS EN 12390-5:2010’da belirtilen kriterlere göre Eşitlik 3.2 ile hesaplanmaktadır.

$$F_{eğ}=3.P.A/2.a_1.a_2^2 \quad (3.2)$$

Eşitlikte;

$F_{eğ}$: Eğilme dayanımı (MPa),

P : Maksimum yük (N),

A : İki mesnet arasındaki uzunluk (mm),

a_1 : Numune enkesit yatay uzunluğu (mm),

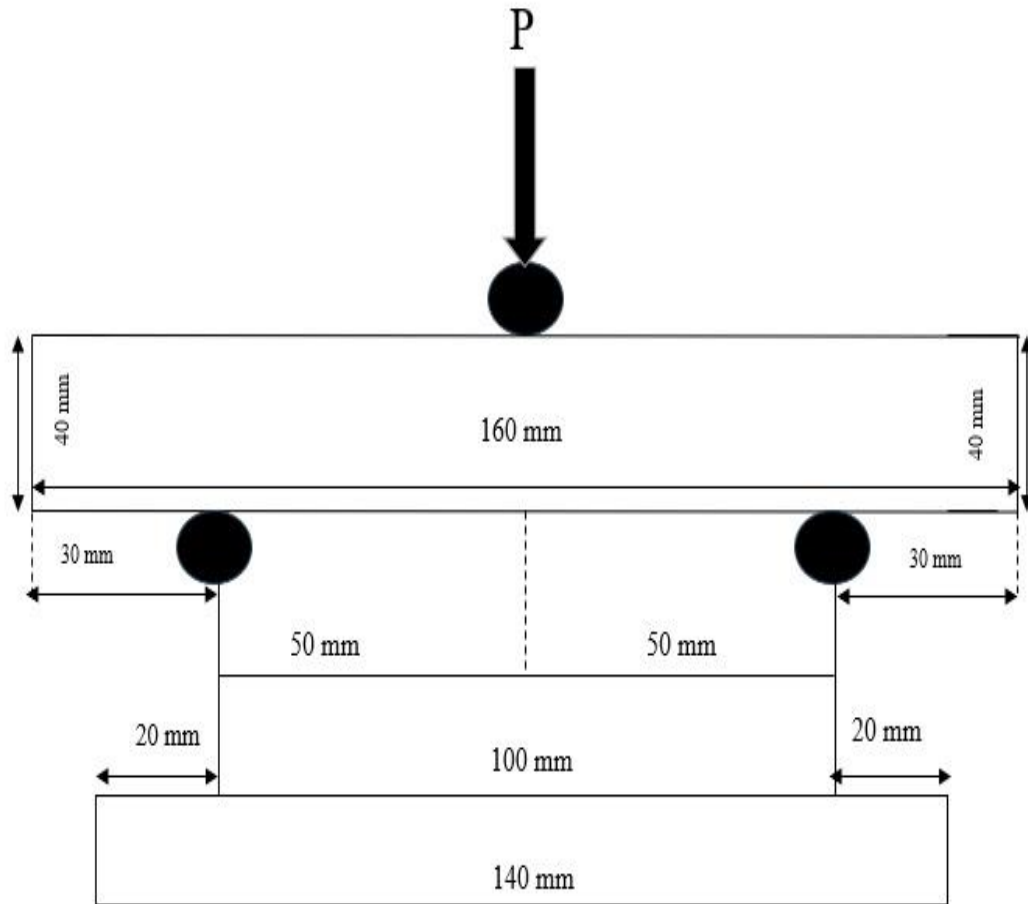
a_2 : Numune enkesit düşey uzunluğu (mm) olarak alınmıştır.

Eğilme dayanımı deney cihazı Şekil 3.7’de görülmektedir.



Şekil 3.7. Eğilme dayanımı deney cihazı

Eğilme deneyi izafi şekli Şekil 3.8’de görülmektedir.



Şekil 3.8. Eğilme deneyi temsili görünümü

Eğilme deneyi için numuneler 40×40×160 mm boyutlarında hazırlandı ve kür sonrası deneye tabi tutuldu.

3.2.3. Donma-çözülme deneyi

Malzemelerin dayanıklılığını ölçmek için donma-çözülme testi yapıldı. Donma-çözülme testleri TS 2824 EN 1338 standardına uygun olarak gerçekleştirildi. Donma-çözülme deneyi için numuneler 100×100×100 mm boyutlarında oluşturuldu. Donma-çözülme testi için uygulanan yüzey alanı 10000 mm²'dir. Numunenin birim alanı başına kütle kaybı (I), Eşitlik 3.3 kullanılarak hesaplandı:

$$I = M/A \quad (3.3)$$

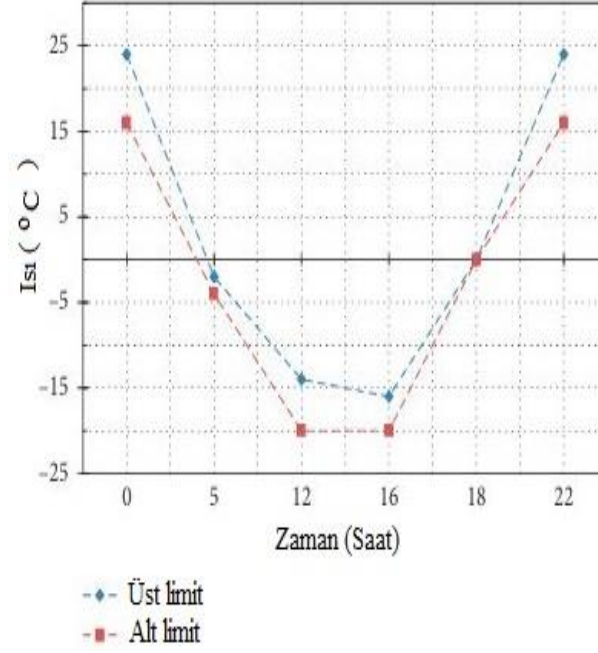
Burada;

I : Birim alan başına kütle kaybı (kg/m^2),

M : 28 günlük çevrimlerden sonra malzemenin toplam kütle kaybı (kg),

A : Donma-çözülme için uygulanan yüzey alanı (m^2) olarak ifade edilmiştir.

Şekil 3.9 TS 2824 EN 1338 standardına göre donma-çözülme testi için sıcaklık ve zaman döngülerini göstermektedir.



Şekil 3.9. Donma-çözülme sıcaklık ve zaman döngüleri

Donma-çözülme testi için sıcaklık ve zaman döngülerinin sınır değerleri Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Donma-çözülme deneyi için sıcaklık ve zaman döngüleri (TS 2824 EN 1338, 2005)

Üst Sınır		Alt Sınır	
Zaman (Saat)	Isı (C°)	Zaman (Saat)	Isı (C°)
0	24	0	16
5	-2	3	-4
12	-14	12	-20
16	-16	16	-20
18	0	20	0
22	24	24	16

3.2.4. Böhme aşınma deneyi

Aşınma testi, malzemelerin yüzey aşınmasına karşı direncini ölçmek için yapılır. Numunelere her biri 22 alt döngüden oluşan toplam 16 döngü uygulandı. Yoğunluk hesaplamaları için Arşimet terazisinde tartımlar yapıldı. 16 döngünün sonunda aşınma kaybı (ΔV), Eşitlik 3.4 ile hesaplandı:

$$\Delta V = \Delta m / \rho_r \quad (3.4)$$

Burada;

ΔV : Numunenin 16 döngüden sonraki hacim kaybı (cm^3),

Δm : Numunenin 16 döngüden sonraki kütle kaybı (g),

ρ_r : Numunenin yoğunluğu (g/cm^3) olarak ifade edilmektedir.

Böhme aşınma deney cihazı Şekil 3.10’da görülmektedir.



Şekil 3.10. Donma-çözülme sıcaklık ve zaman döngüleri

Yoğunluk hesaplamaları için Arşimet terazisinde tartımlar yapılmıştır. Arşimet terazi görünümü Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.11. Yoğunluk tespiti için Arşimet terazi görünümü

Deneylerde kullanılan zımpara tozları Şekil 3.12’de görüldüğü gibi 20 g olarak tartılmıştır.



Şekil 3.12. Zımpara tozu tartım görüntüsü

3.2.5. Yangın deneyi

Yanma, yanıcı maddelerin O₂ veya diğer oksitleyici maddelerle birlikte belirli şartlar altında kararlı bir ekzotermik zincirleme reaksiyona girme olayıdır. Kontrol ve istek dışında meydana gelen yanma reaksiyonlarına yangın denilmektedir. Yangın Sınıfları; TS EN 2/A1 (2013) standartlarına göre aşağıdaki şekilde tarif edilmiştir:

Sınıf A: Yanmanın, normal olarak parlak korların oluşumuyla devam ettiği, genellikle organik esaslı katı madde yangınlarını,

Sınıf B: Sıvı veya sıvılaştırılabilir katılarla ilgili yangınları,

Sınıf C: Gaz içerikli yangınları,

Sınıf D: Metal içerikli yangınları,

Sınıf F: Ateşte pişirme ile ilgili (bitkisel veya hayvansal sıvılar ve katı yağlar) yangınlarını ifade etmektedir.

A sınıfı yangınlar, organik katı madde yangınlarını ifade etmektedir. Bu malzemeler özellikle karbon içerikli organik malzemelerdir. Bu malzemelerin yanması sonucunda kül meydana gelmektedir. Kağıt, kömür, ahşap, kauçuk, selüloz, ot, tekstil malzemeleri, plastik ve benzeri A sınıfı yangınlar, soğutucu etki oluşturan maddeler ile müdahale edilmek sureti ile soğutularak söndürülmektedir. Bu yangınlar, sarı-kırmızı alev açığa çıkaran ağır duman görüntülü yangınlardır.

B sınıfı yangınlar, sıvı yanıcı madde (akaryakıt) yangınlarıdır. Su ile karışanlar ile karışmayanlar olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Su ile karışabilenler; benzin, benzol, mazot, fuel-oil, madeni yağlardır. Su ile karışmayanlar ise, vernik, boya, tiner, alkol, parafin, aseton, asfalt, tutkal ve benzeridir. B sınıfı yangınlar, yanan madde ile oksijen teması kesilerek (boğmak) sureti ile söndürülür. Siyah duman, sarı-beyaz alev açığa çıkaran ağır alev görüntülü yangınlardır.

C sınıfı yangınlar, gaz halindeki yanıcı madde yangınlarıdır. Yanıcı gaz ve basınç altında sıvılaştırılmış gaz haldeki maddelerin yangınlarıdır. Doğal ve üretilmiş gazlar, metan, hidrojen, asetilen, LPG ve propan gibi gaz halindeki maddelerin yanmasıyla oluşan C sınıfı yangınlar, genel kural olarak, gaz yangınlarında, yangın kaynağı kesilerek ve soğutma işlemi yapılarak söndürülür. Dumansız, sarı-beyaz alev açığa çıkaran ve ani alev parlaması görüntülü yangınlardır.

D sınıfı yangınlar, hafif metal (titanyum, magnezyum, alüminyum, uranyum, fosfor, sodyum ve benzeri) yangınlardır. D sınıfı yangınlar, özel amaçla üretilmiş D sınıfı kuru toz ile söndürülür.

F sınıfı yangınlar, yağ tava ve benzeri yangınlardır. F sınıfı yangınlar, bitkisel ve hayvansal pişirme yağlarının yangınlarını kapsar. Kimyasal söndürücüler ya da toz söndürücüler ile söndürülmektedir. Bu tür yangınlar doğrudan su ile söndürülmemektedir, aksi halde parlama ve patlama meydana gelebilmektedir. Bunun nedeni yüksek sıcaklık altında suyun genleşerek yangının parlamasını arttırmasıdır. 1 birim su 526°C de 3690 kat genleşmektedir (TS EN 2/A1, 2013).

Polimerlerin alevlenebilme özelliğini sınıflandıran birçok standart olmasına rağmen UL94 uluslararası kabul görmüş tutuşa bilirlilik standardıdır. UL 94, Plastik Malzemelerin Yanıcılık Güvenliği Standardı, ABD'deki UL (Underwriters Laboratories) tarafından yayınlanan bir plastik yanıcılık standardıdır. Standart, numunenin tutuşturulduktan sonra alevi söndürme veya yayma eğilimini belirler. Bu derecelendirmeler, aşağıda özetlendiği gibi kontrollü laboratuvar koşulları altında test parçalarının bir test alevine maruz bırakılmasından sonra bir malzemenin yanma özelliklerini ayırt etmek için kullanılır:

- 5VA: Yüzey yanması 60 saniye içinde durur. Test parçası alev altında tutuşmaz ve yanma deliği yoktur.
- 5VB: 60 saniye içinde yüzey yanması. Test parçası alev altında tutuşmaz ancak yanma deliği olabilir.
- V-0: Dikey yanma 10 saniye içinde durur ve test parçasından alev damlaması olmaz.
- V-1: Dikey yanma 60 saniye içinde durur ve test parçasından alev damlaması olmaz.
- V-2: Dikey yanma 60 saniye içinde durur ancak alevli damlamalar meydana gelebilir.
- HB: Dakikada 3 inçten daha az hızla yatay olarak yanan veya 5 inçten önce kendi kendine sönen yangın.

Avrupa Komisyonu tarafından, Yapı Malzemeleri Direktifi kapsamında ortaya konan temel gerekler doğrultusunda ortak Avrupa yangın sınıfları ve prosedürleri oluşturulmaktadır. Bu kapsamda Komisyonun, 2000/147/EC sayılı Kararı ile yapı

malzemelerinin yangına tepki performans sınıfları ortaya konmuştur (Commission Decision, 2000 ; Demirel ve Altıntaş, 2010).

2000/147/EC'ye göre yangına tepki sınıfları;

A1: Hiçbir şekilde yangına katkıda bulunmayan malzemeler,

A2: Yangına aşırı derecede sınırlı boyutlarda katkıda bulunan malzemeler,

B: Yangına çok sınırlı boyutlarda katkıda bulunan malzemeler,

C: Yangına sınırlı boyutlarda katkıda bulunan malzemeler,

D: Yangına makul boyutlarda katkıda bulunan malzemeler,

E: Yangına karşı tepki performansı kabul edilebilir olan malzemeler,

F: Yangına karşı tepki performansı belirlenemeyen malzemeler, olarak sınıflandırılmaktadır (Demirel ve Altıntaş, 2010).

2000/147/EC'ye göre ilave sınıflandırmalar–Duman Gazı Üretimi;

s1:Duman gazı üretimi çok sınırlı.

s2:Duman gazı üretimi sınırlı.

s3:Duman gazı üretimi s1 ve s2 sınıflarının gerekliliklerini karşılamayan, olarak sınıflandırılır (Demirel ve Altıntaş, 2010).

2000/147/EC'ye göre ilave sınıflandırmalar–Damlacık Teşekkülü;

d0:Alev damlacıkları veya parçacıkları meydana gelmeyen,

d1:Alev damlacıkları veya parçacıkları çabucak sönen,

d2:Alev damlacıkları veya parçacıklarının teşkili d0 ve d1 sınıflarının gerekliliklerini karşılamayan, olarak sınıflandırılmıştır (Demirel ve Altıntaş, 2010).

3.2.6. Ultrasonik darbe hızı (ultrasonic pulse velocity-UPV) deneyi

Ultrasonik Darbe Hızı (Ultrasonic Pulse Velocity-UPV) tekniği çeşitli malzemelerin mekanik özelliklerini değerlendirmek için kullanılan, tahribatsız bir yöntem olarak ortaya çıkmaktadır (Jongvivatsakul et al. 2019; Chompoorat vd., 2021). UPV testinin çok yönlülüğü, tekrarlana bilirliği ve basitliği, onu malzeme durumu değerlendirmeleri için oldukça etkili kılar. Bu yöntem, verilen malzeme numuneleri boyunca yayılan ultrasonik darbelerin hızının ölçülmesini içerir (Meggabi vd., 2022).

UPV testine tabi tutulmadan önce numunelerin terminal yüzeyleri pürüzsüz hale getirilmiştir. UPV'nin belirlenmesi, transdüserlerin poliüretan numunelerinin karşılıklı yüzeylerine yerleştirilmesini içeren doğrudan iletim tekniği kullanılarak gerçekleştirildi.

Ultrasonik darbelerin hızı Eşitlik 3.5’de görüldüğü şekilde hesaplanmaktadır (Meggabi vd., 2022):

$$UPV = x/t \quad (3.5)$$

Burada;

UPV : Ultrasonik darbe hızı (m/s),

x : Kat edilen mesafe (m)

t : Numune içinden geçen seyahat süresi (s)

UPV test düzeneği verici, alıcı amplifikatör, ultrasonik darbe jeneratörü ve zaman ölçme ekran ünitesi içerir (Zebari vd., 2016).

UPV deneyleri TS EN 12504-4 (2021) standardına göre yapılmıştır. UPV değerleri iki malzemenin boşluk yapısı ve dayanımını karşılaştırmada fikir verebilmektedir. UPV değeri ne kadar yüksekse malzemenin boşluk oranı o derece düşüktür. UPV değeri ne kadar yüksekse malzemenin basınç dayanımı o derece yüksektir. UPV ile boşluk oranı arasında ters ilişki, UPV ile basınç dayanımı arasında ise doğrusal ilişki bulunmaktadır. UPV deney ölçüm cihazı Şekil 3.13’de gösterilmiştir.



Şekil 3.13. UPV deney cihazı

3.2.7. SEM-EDX analizi

Taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve enerji dağılımlı X-ışını (EDX) analizi, element bileşenlerinin kimyasal bileşimine ilişkin nicel verilerin hızlı ve verimli bir şekilde toplanmasını kolaylaştıran, tahribatsız bir yaklaşımla numunenin bütünlüğünün korunmasını sağlayan ve incelenen malzeme özellikleri hakkında ayrıntılı bilgiler sağlayan, yüksek çözünürlüklere ulaşan bir analitik yöntemi temsil eder (Guyett vd., 2024). Poliüratan kaplama malzemesinin morfolojisi ve mikro yapısı 5 kV'ta çalışılan SEM cihazı ile Munzur Üniversitesi'nde incelendi.

3.2.8. X-ışını kırınım (XRD) analizi

XRD olarak kısaltılan X-ışını kırınımı, çeşitli malzemelerin karakterizasyonunda çok önemli bir deney yöntemidir. Bu analiz, malzemelerin kristal yapısını inceler ve incelenen malzemelerin genel bileşimi hakkında bilgi verir (Zhu & Wang, 2024). Malzemelerin amorf, kristal veya yarı kristal yapısı XRD analizi ile belirlenmektedir. Amorf yapıdaki malzemeler, XRD'de düşük şiddetli geniş pikler; metaller gibi kristal yapıdaki malzemeler, yüksek şiddetli keskin pikler vermektedir (Kwakye-Awuah vd., 2021). Deney numunelerinde kullanılan malzemeler üzerinde X-ışını Kırınım (XRD) Analizi yapılmış olup bu analiz Munzur Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Laboratuvarına yaptırılmıştır.

3.2.9. FT-IR analizi (Fourier dönüşümü kızılötesi spektroskopisi)

Herhangi bir maddedeki kimyasal bağları tanımlamak ve kimyasal kombinasyonları bulmak için basit, tahribatsız bir yöntem FT-IR spektroskopisidir. Deneysel çalışma için birkaç miligram malzeme gereklidir (Kaczmarek vd., 2021). Aralıklar, FT-IR grafiğinde gösterilen tipik güçlü hidroksil bantlarını ($\nu = 3600\text{--}3650\text{ cm}^{-1}$ 'de bağlanmamış OH germe bandı) ve C-H geniş alkil germe bandını ($\nu = 2850\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$) içerir (Reis vd., 2006).

400–600 cm^{-1} aralığında güçlü asimetrik germe ve 900–1100 cm^{-1} bölgesinde güçlü asimetrik bükülme Si-O bağlarının özellikleridir (Malathy vd., 2022). Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) bu bantlardaki titreşimlerle temsil edilir. Numunenin 954 cm^{-1}

bandı oda sıcaklığında C-S-H'ye karşılık gelen piki göstermektedir (Choudhary vd., 2020).

FT-IR spektroskopisinde, güçlü kuvars SiO_2 ve silika absorpsiyon bantları tipik olarak $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ bölgesinde görünür (Saikia vd., 2008). Özellikle, kuvars ve silika için genellikle 1080 cm^{-1} ve 800 cm^{-1} civarında güçlü bantlar gözlemlenir (Volkov vd., 2021).

FT-IR spektroskopisinde kaolin tipik olarak aşağıdaki aralıklarda güçlü absorpsiyon bantları gösterir; $3690\text{--}3620\text{ cm}^{-1}$: Bu bölge -OH gerilme titreşimlerine karşılık gelir (Drits vd., 2021). $1030\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ aralığı Si-O germe titreşimleri ile ilişkilidir. $500\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ aralığı Al-OH ve Al-O bükülme titreşimlerini içerir (Kloprogge ve Kloprogge 2019). Bu bantlar kaolin için karakteristiktir ve örneklerdeki bu kil mineralini tanımlamak ve analiz etmek için kullanılabilir (Du Plessis vd., 2021).

3.2.10. Yapışma dayanım deneyi

Yapışma dayanım deneyleri Siirt Üniversitesi İnşaat Mühendisliği laboratuvarında yapıldı. Yapışma dayanım deneyi aşağıdaki uygulamalar için yapılmaktadır:

- Harç ve sıvaların yapışma mukavemeti
- Asfaltın yapışma mukavemeti
- Karoların yapışma mukavemeti
- Kaplama ve katmanlarının yapışma mukavemeti
- Onarım malzemelerinin yapışma mukavemeti

Yapışma dayanım deneyinde kullanılan cihazın teknik özellikleri Çizelge 3.2’de görülmektedir.

Çizelge 3.2. Yapışma dayanım deney cihazı teknik özellikleri

Yapışma Dayanım Deney Cihazı Teknik Özellikleri	
Çalışma Aralığı	0,81–8,1 MPa
Çekme kuvveti	1,6–16 kN
Maksimum Çekme Hızı	4,65 mm/dak

Yapışma dayanım deneyleri TS EN 1542 standardına göre yapılmıştır. Bu deney, betonu koruma ve tamir için kullanılan enjeksiyon şerbeti, harç, beton ve yüzey koruma sistemlerinin yapışma dayanımını, çekme etkisiyle tayin etmek için yapılır. Ortalama çekmede yapışma dayanımı, geçerli deney sonuçlarından en düşük üç adedinin aritmetik ortalaması alınarak belirlenir. Deney sonrası numunede oluşan kopma şekli gözlem yoluyla belirlenir. Numunede kopma şekli aşağıdaki şekillerde olabilir:

- A : Beton alt tabaka içerisinde kopma,
- A/B : İlk tabaka (Astar, bağlayıcı şerbet veya harç) ve beton temas yerinden kopma,
- B : İlk tabaka içerisinde kopma
- B/C : İlk tabaka ve ikinci tabaka temas yerinden kopma,
- C : İkinci tabaka içerisinde kopma (İki tabakalı tamir sisteminde),
- /Y : Son tabaka ve yapıştırıcı tabaka temas yerinden kopma (İki tabakalı tamir sisteminde C/Y),
- Y : Yapıştırıcı tabaka içerisinde kopma,
- Y/Z : Yapıştırıcı tabaka ve çelik dairesel ayak temas yerinden kopma.

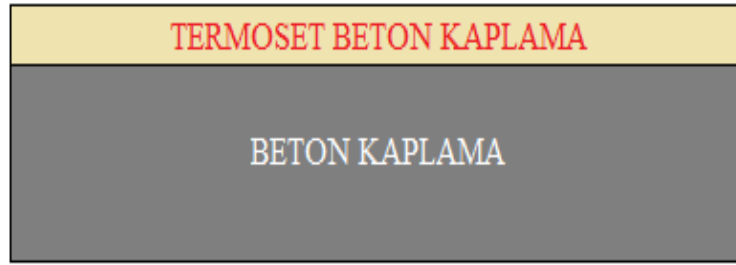
Bu kopma şekillerinin bir arada oluşması durumunda, her kopma şeklinin, alanı esas alan oranını belirlemek için kopma yüzeyinde gözlem yapılır ve kopma oranları yüzde halinde aşağıdaki örnekte görüldüğü gibi ifade edilir:

$$A : A/B : B = \%40 : \%10 : \%50$$

Geçersiz kopma, yapıştırma tabakasında meydana gelen erken kopmadır. Yüzeyin herhangi kısmında, -Y, Y/Z veya -/Y tipi kopmalar geçersiz kopma sayılır ve deney tekrarlanır. Geçerli kopmalar A, A/B ve B tipi kopmalardır. Deney sonuçları kopma şekline göre değerlendirilir. Tez çalışmasında 3 farklı tip durumda yapışma dayanım deneyleri yapıldı.

3.2.10.1. Beton yol kaplaması üzerine termoset beton yol kaplaması

Mevcut bir beton yol kaplaması üzerine yeni bir termoset beton yol kaplama yapıldığı zaman iki kaplama arasındaki yapışma dayanımı önem arz eder. Trafik yüklerinden dolayı yol kaplamaları basınç, eğilme ve çekme gerilmelerine maruz kalır. Çekme gerilmelerinde, üstteki tabakanın alttaki tabaka üzerinden kaymayarak kararlı bir davranış göstermesi gerekir. Termoset beton kaplama mevcut yol tamir ve onarım işlerinde de kullanılabilir. Yüzey üzerinde oluşan çukurların yama işlerinde kullanımına da olanak sağlar. Mevcut bir beton yol kaplaması üzerine yeni bir termoset beton yol kaplama en kesiti Şekil 3.14’de gösterilmiştir.



Şekil 3.14. Beton kaplama üzerine termoset kaplama uygulama enkesiti

Onarım isteyen mevcut bir beton yol kaplaması üzerine termoset beton yama yapılabilir. Kür süresi 3 dakika olduğu için çok kısa sürede trafiğe açılabilir. Hasarlı bir beton yol kaplaması üzerine termoset beton yama uygulama enkesiti Şekil 3.15’ de gösterilmiştir.



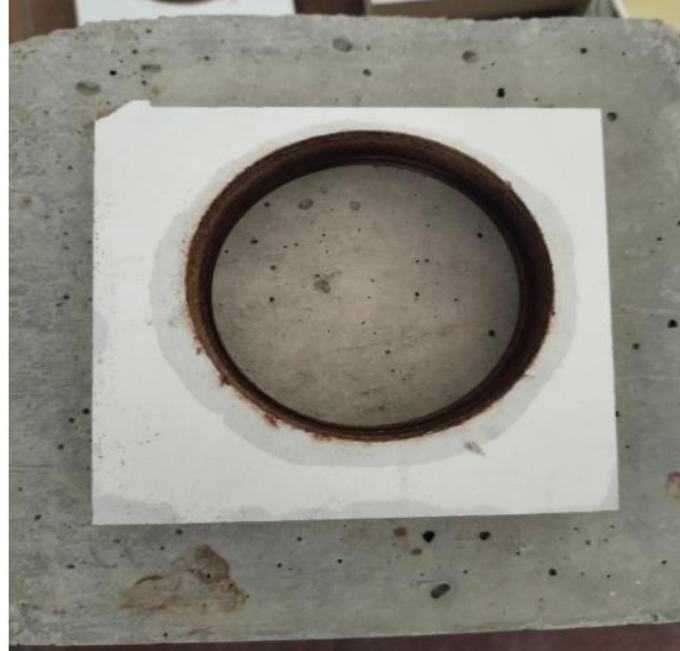
Şekil 3.15. Beton yol kaplaması üzerine termoset beton yama uygulama enkesiti

Deney hazırlık aşaması Şekil 3.16’da görülmektedir.



Şekil 3.16. Yapışma deneyi hazırlık aşaması

Beton yüzeyine termoset beton için kalıp konulması Şekil 3.17’de görülmektedir.



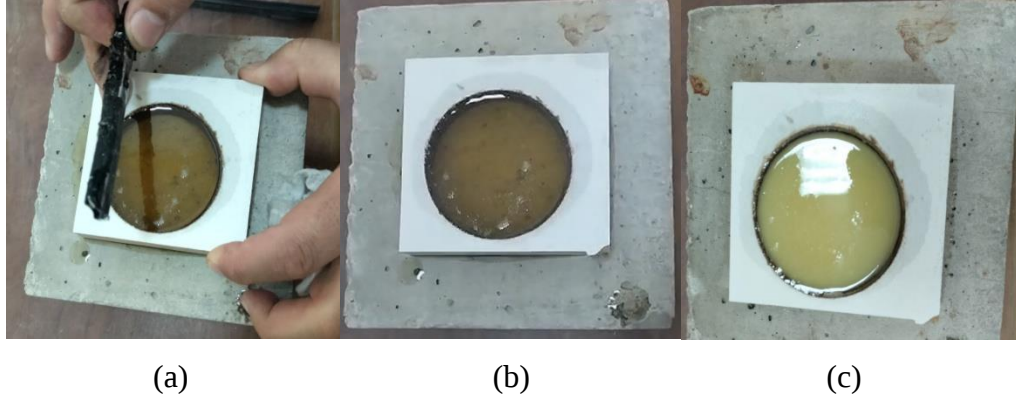
Şekil 3.17. Beton yüzeyine termoset beton için kalıp konulması

Kalıp içerisine termoset beton döküm aşaması Şekil 3.18’de görülmektedir.



Şekil 3.18. Kalıp içerisine termoset beton döküm aşaması

Kalıp içerisine dökülen termoset betonun sertleşme aşaması Şekil 3.19’da görülmektedir.



Şekil 3.19. Termoset betonun sertleşme aşaması: (a) Başlangıç (b) 1,5 dakika sonra
(c) 3 dakika sonra

Termoset betonun normal dayanımlı beton yüzeyinde sertleşme aşaması sonrası görünümü Şekil 3.20’de görülmektedir.



Şekil 3.20. Termoset betonun normal dayanımlı beton yüzeyinde sertleşme aşaması sonrası görünümü

Termoset betonun sertleştikten sonra, üzerine yapıştırıcı sürülme görüntüsü Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21. Termoset betonun sertleştikten sonra, üzerine yapıştırıcı sürülmesi

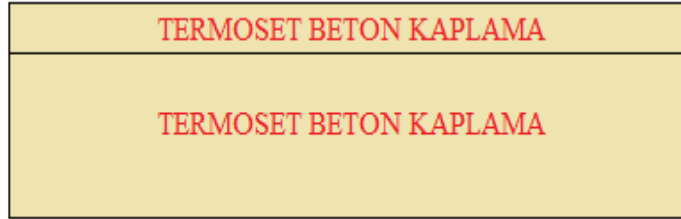
Yapıştırıcı sürüldükten sonra üzerine çekme diski bırakılır ve yapıştırıcı kuruyana kadar bekletilir (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. Yapışma deneyi çekme diskinin kurumaya bırakılması

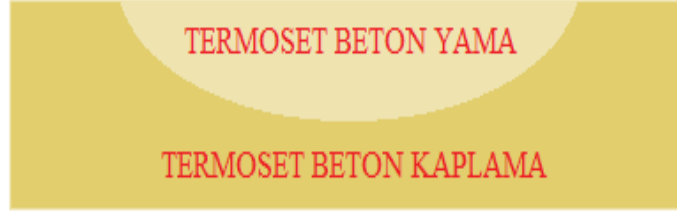
3.2.10.2. Termoset yol kaplaması üzerine termoset beton yol kaplaması

Mevcut bir termoset beton yol kaplaması üzerine yeni bir termoset beton yol kaplama uygulama en kesiti Şekil 3.23’de gösterilmiştir.



Şekil 3.23. Termoset beton yol kaplaması üzerine termoset beton yol kaplama uygulama enkesiti

Onarım isteyen mevcut bir termoset yol kaplaması üzerine termoset beton yama uygulaması yapılabilir. Çok kısa bir süre sonunda trafik akışının devamına katkı sağlar. Hasarlı bir termoset yol kaplaması üzerine termoset beton yama uygulama enkesiti Şekil 3.24’de gösterilmiştir.



Şekil 3.24. Termoset beton yol kaplaması üzerine termoset beton yama uygulama enkesiti

Termoset betonun termoset beton yüzeyinde sertleşme aşaması sonrası görünümü Şekil 3.25’de görülmektedir.



Şekil 3.25. Termoset betonun termoset beton yüzeyinde sertleşme aşaması sonrası görünümü

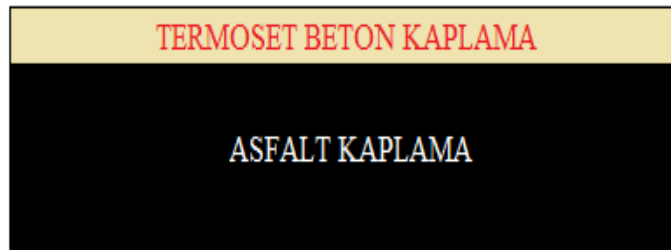
Yapışma deneyi çekme diskinin yapıştırıcı ile birlikte kurumaya bırakılması görüntüsü Şekil 3.26’da görülmektedir.



Şekil 3.26. Yapışma deneyi çekme diskinin kurumaya hazır hale getirilmesi

3.2.10.3. Asfalt yol kaplaması üzerine termoset beton yol kaplaması

Mevcut bir asfalt yol kaplaması üzerine yeni bir termoset beton yol kaplama uygulama en kesiti Şekil 3.27’de gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Asfalt kaplama üzerine termoset kaplama uygulama enkesiti

Onarım isteyen mevcut bir asfalt yol kaplaması üzerine termoset beton yama uygulaması yapılabilir. Kür süresi çok kısa olduğu için, trafiğe kısa sürede açılarak ulaşımın aksamaması sağlanır. Hasarlı bir asfalt yol kaplaması üzerine termoset beton yama uygulama enkesiti Şekil 3.28’de gösterilmiştir.



Şekil 3.28. Asfalt yol kaplaması üzerine termoset beton yama uygulama enkesiti

Bir yol inşaatında kullanılmış asfalt kaplamalar üzerinde deneyler yapıldı. Asfalt yüzeye termoset beton kaplama dökümü Şekil 3.29’da görülmektedir.



Şekil 3.29. Asfalt yüzeye termoset beton kaplama dökümü

3.2.11. Maliyet karşılaştırmaları

Tez çalışmasında, esnek, rijit ve termoset beton kaplamaların kaplama kalınlık ve maliyet hesapları yapılarak, ekonomik olarak birbirleriyle karşılaştırması yapılmıştır.

3.2.11.1. Esnek üstyapı kalınlık ve maliyet hesaplaması

Esnek kaplamaların dizaynı için Karayolları Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberinde Eşitlik 3.6 kullanılmaktadır (Güngör ve Sağlık, 2008):

$$\log (T_{8,2}) = Z_R \cdot S_0 + 9,36 \log (SN+1) - 0,20 + \log [(4,2-P_t)/(4,5-1,5)] / 0,40 + [1094/(SN+1)^{5,19}] + 2,32 \log M_R - 8,07 \quad (3.6)$$

Eşitlik 3.6’da;

$T_{8,2}$: Son Servis kabiliyetine erişinceye kadar tekerrür edecek standart dingil (8,2 ton) sayısı

P_t : Son servis kabiliyeti

Z_R : Standart normal sapma

S_0 : Toplam standart sapma

SN : Üstyapı sayısı (inç)

M_R : Esneklik Modülü (psi)

Üstyapı kalınlıklarının hesaplanması için bilinen $T_{8,2}$, P_t , Z_R , S_0 değerleri yardımıyla Eşitlik 5’den SN değeri bulunmakta, hesaplanan SN değeri, üstyapı tabakalarının izafi mukavemet sayıları ile bağlantılı olarak üstyapı kalınlıklarına dönüştürülmektedir (Güngör ve Sağlık, 2008). ASSHTO 1993 yöntemini esas alan Esnek Üstyapı Projelendirme Rehberi, Karayolları Genel Müdürlüğü tarafından 2008 yılında revize edilerek yayınlanmıştır. Bu metod, servis kabiliyeti-davranış ilişkisine dayanmaktadır. Bu metodda zemin taşıma gücüne, trafik yüküne, bölge ve iklim koşullarına ve üst yapı tabakalarının özelliklerine bağlı olarak üstyapı tabaka kalınlıkları verilir. Güvenilirlik; projesi yapılan üstyapıya ait proje parametrelerinin, belirlenen proje süresince, etkin trafik ve çevre koşulları altında, beklenen projelendirme gereklerini karşılama olasılığını ifade eder. Geleceğe yönelik kabul edilen trafik tahminleri ve servis kabiliyetindeki sapmaların belirli bir sınır dahilinde olabilmesi için güvenilirliğin belirlenmesi lazımdır. Güvenilirlik seviyesi ve güvenilirliğin standart normal sapması (Z_R) yol sınıfıyla ilişkili olarak Çizelge 3.3’den alınmaktadır (Güngör ve Sağlık, 2008).

Çizelge 3.3. Tavsiye edilen güvenilirlik değerleri

Yol Sınıfı	Şartname güvenilirlik değeri (%R)	Standart normal sapma Z_R
Otoyollar	95	-1,645
Devlet Yolu	85	-1,037
İl Yolu	70	-0,524

Toplam Standart Sapma (S_o) değeri, güvenilirliğe bağlı olarak esnek üstyapılar için 0,40–0,50 olup, ortalama 0,45 alınmaktadır. Drenaj etkisi, üstyapı sayısı hesaplanırken, alttemel ve temel tabakalarına ait değerlerin, drenaj katsayısı (m_i) olarak adlandırılan bir sabit sayıyla çarpılmasıyla elde edilir. Esnek üstyapılar için Karayolları projelendirme rehberinde, alttemel ve temel için drenaj katsayıları 1 olarak alınmaktadır. Yeni oluşturulan bir üstyapıda, yolun ilk servis kabiliyeti (P_o) değeri çoğunlukla 4,2 olarak alınmaktadır. Üstyapının proje süresi sonrasında hedeflenen hizmet kabiliyeti, son servis kabiliyeti (P_t) olarak isimlendirilir. P_t değeri genellikle otoyol ve devlet yolları için 2,5, il yolları için de 2,0 olarak alınmaktadır. (Güngör ve Sağlık, 2008). Asfalt kaplama kalınlık hesaplamalarında aşağıdaki değerler göz önüne alındı;

$T_{8,2}$	: 10×10^6
P_t	: 2,5
Z_R	: -1,037 (Devlet Yolu, güvenilirlik değeri (R, %85), Çizelge 13)
S_o	: 0,45
SN	: Üstyapı sayısı, inç
M_R	: 7500, psi

SN değeri, Eşitlik 3.6 ile 4,6 inç (11,68 cm) olarak hesaplandı. Karayolları esnek üst yapılar projelendirme rehberinde, $T_{8,2}$ (8,2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekerrür sayısı) 10×10^6 değerine göre, aşınma tabakası kalınlığı 5 cm, binder tabakası 6 cm ve bitümlü temel tabakası 8 cm, kırmataş temel tabakası 15 cm ve kırmataş alttemel tabakası 20 cm olarak verilmiştir (Güngör ve Sağlık, 2008; Bakış ve Hattatoğlu, 2016). SN karşılaştırması Çizelge 3.4’de görülmektedir.

Çizelge 3.4. Esnek üstyapı SN kontrolü

Tabaka adı	Kalınlık, D (cm)	Tabaka katsayısı (a)	Drenaj katsayısı (m)	SN (D*a*m)
Aşınma	5	0,42	-	2,10
Binder	6	0,40	-	2,40
Bitümlü temel	8	0,36	-	2,88
Kırmataş temel	15	0,15	1	2,25
Kırmataş alttemel	20	0,13	1	2,60
Toplam				12,23

Çizelge 3.4’de hesaplanan toplam SN değeri (12,23), Eşitlik 3.6 ile bulunan SN değerinden (11,68) büyük olduğundan üstyapı kalınlıkları uygundur. Tabaka katsayısı ve drenaj katsayıları, Karayolları Esnek Üst Yapılar Projelendirme Rehberinden alınmıştır (Güngör ve Sağlık, 2008).

BSK kaplama kalınlığı toplam 19 cm’dir. Bu kaplama kalınlığına göre, tez çalışmasında 2024 yılı maliyet hesaplaması yapılmıştır. $T_{8,2}$ (8,2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekerrür sayısı) 10×10^6 değerine göre, toplam platform genişliği 24 metre olan bölünmüş bir esnek yolun 1 km maliyeti hesaplanmıştır.

Yolun toplam yüzey alanı $24\ 000\ m^2$ ’dir. Maliyet hesaplamalarında aşınma tabakasının birim hacim ağırlığı $2,4\ t/m^3$ alınmıştır. Tabaka içerisindeki asfalt çimentosu (AC) oranı, %6 olarak alınmıştır. Aşınma tabakasındaki karışımda, $1\ m^3$ bitümlü karışım içerisindeki AC miktarı yaklaşık $0,144$ ton olarak hesaplanmıştır. 1 metre kalınlıkta ve $1\ m^2$ aşınma tabakasında uygulanan AC miktarı $0,144$ ton ise 5 cm kalınlıktaki aşınma tabakasının $1\ m^2$ ’lik yüzeyinde kullanılan AC miktarı $0,05 \times 0,144 = 0,0072$ ton olmaktadır. Binder tabakasının birim hacim ağırlığı $2,4\ t/m^3$ alınmış ve içerisindeki AC oranı %5 kabul edilmiştir. Binder tabakasındaki karışımda $1\ m^3$ karışım içerisindeki AC miktarı yaklaşık $0,12$ tondur. 1 metre kalınlıkta ve $1\ m^2$ binder tabakası yüzey alanında kullanılan AC miktarı $0,12$ ton ise 6 cm kalınlıktaki binder tabakasının $1\ m^2$ ’lik yüzeyinde kullanılan AC miktarı $0,06 \times 0,12 = 0,0072$ ton olmaktadır. Bitümlü temel tabakasının birim hacim ağırlığı $2,3\ t/m^3$ alınmış ve içerisindeki AC oranı %3,5 kabul edilmiştir. Bitümlü temel tabakasındaki karışımda $1\ m^3$ karışım içerisindeki AC miktarı yaklaşık $0,081$ tondur. 1 metre kalınlıkta ve $1\ m^2$ bitümlü temel tabakası yüzey alanında kullanılan AC miktarı $0,081$ ton ise 8 cm kalınlıktaki bitümlü temel tabakasının $1\ m^2$ ’lik yüzeyinde kullanılan AC miktarı $0,081 \times 0,08 = 0,0065$ ton olmaktadır (Bakış ve Hattatoğlu, 2016).

Toplam platform genişliği 24 metre, uzunluğu 1 km. olan bölünmüş bir asfalt yolun toplam yüzey alanı 24000 m² olarak hesaplanmıştır. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı (ÇŞB) Batman Rafinerisi Asfalt çimentosunun 2024 yılı için birim fiyatı 12.860,00 TL/ton' dur. Aşınma, binder ve bitümlü temel tabakasında asfalt çimentosu kullanılmış olup, temel ve alttemel tabakalarında asfalt çimentosu bulunmamaktadır. Temel ve alttemellerde Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) tarafından belirlenen 2024 yılı için birim fiyatlar göz önüne alınmıştır. Bitümlü karışımda kullanılan agregalar, KGM tarafından birim fiyata dâhil edilmiştir. T_{8,2}=10×10⁶ ve diğer değerlerde, tabaka cinslerine göre 2024 yılı için birim fiyatlar, KGM ile Çevre ve Şehircilik Bakanlığı birim fiyat listesinden elde edilmiştir (KGM, 2024; ÇŞB, 2024). Hesaplamalarda (0+000)-(1+000) arası Batman ili devlet yolu göz önüne alınmıştır. Rafineri Batman ilinde olduğundan taşıma mesafesi ve bitümün emiş derecesine kadar ısıtılması göz önüne alınmamıştır. Esnek üstyapı tabaka cinslerine göre birim fiyatlar Çizelge 3.5'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.5. Esnek üstyapı tabaka cinslerine göre birim fiyatlar

Poz No	Tanım	Birim	Maliyet (TL)
KGM/6405	5 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu aşınma tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	89,50
KGM/6306	6 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu binder tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	105,06
KGM/6208	8 cm sıkışmış kalınlıkta 1 m ² asfalt betonu bitümlü sıcak temel tabakası yapılması (kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ²	132,42
KGM/6040	Temel yapılması (1 inç kırılmış ve elenmiş ocak taşı ile)	m ³	407,65
KGM/6000	Ocak taşından konkasörle kırılmış malzeme ile alttemel yapılması	m ³	378,99
10.330.5423	Asfalt çimentosu (50/70)	Ton	12.860,00

5 cm aşınma tabakasında 1 m² de kullanılan AC miktarı 0,05×0,144=0,0072 ton, 6 cm binder tabakasında 1 m² de kullanılan AC miktarı 0,06×0,12=0,0072 ton, 8 cm bitümlü temelde 1 m² de kullanılan AC miktarı 0,08×0,081=0,0065 ton olarak hesaplanmıştır. 1 m² de kullanılan toplam asfalt çimento miktarı 0,021 tondur. Toplam platform genişliği 24 metre, uzunluğu 1 km olan bölünmüş bir asfalt yolun toplam yüzey alanı 24000 m² olarak hesaplanmıştır. 24000 m²’ de aşınma, binder ve bitümlü temel tabakasında kullanılan toplam AC miktarı 0,021×24000= 504 tondur (Bakış ve Hattatoğlu, 2016)..

3.2.11.2. Rijit üstyapı kalınlık ve maliyet hesaplaması

Rijit kaplama kalınlığı hesaplaması, AASHTO yol testinden elde edilen Eşitlik 3.7’e göre yapılmaktadır (AASHTO, 1993):

$$\begin{aligned} \text{Log}(W_{8,2}) = & Z_R \times S_o + 7,35\text{log}(D+1)-0,06+ \text{log}[\Delta PSI / (4,5-1,5)] / \\ & 1+[1,624 \times 10^7 / (D+1)^{8,46}] + (4,22-0,32 \times Pt) \times \text{log}(Sc' Cd [D^{0,75}-1,132] / 215,63 \times J \times [D^{0,75}- \\ & [18,42 / (E_c / k^{0,25})]]) \end{aligned} \quad (3.7)$$

Burada;

$W_{8,2}$: 8.2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekerrür sayısı

Z_R : Standart normal sapma

S_o : Trafik tahmini ve performans tahmininin bileşik standart hatası

D : Rijit plak kalınlığı, inç

ΔPSI : $P_o - P_t$ (Servis kabiliyetinde azalma miktarı)

P_o : Başlangıç servis kabiliyeti indeksi

P_t : Nihai servis kabiliyeti indeksi

Sc' : Betonun Kopma Modülü (Eğilmede çekme mukavemeti), psi

J : Yük transfer katsayısı

C_d : Drenaj katsayısı

E_c : Betonun Elastisite Modülü, psi

k : Yatak katsayısı, psi

Betonun elastisite modülü, TS 500 (2000)’e göre eşitlik 3.8 ile bulunması önerilmektedir:

$$E_c = 3250 \sqrt{f_{ck}} + 14000 \quad (3.8)$$

Burada;

E_c : Betonun elastisite modülü (MPa)

f_{ck} : Betonun karakteristik silindir basınç mukavemeti (MPa)

Esnek kaplamalarda, zeminin taşıma gücü efektif esneklik modülü (M_R) ile isimlendirilirken, beton kaplamalarda zeminin taşıma gücü efektif yatak katsayısı (zemin reaksiyon modülü) ile tanımlanmaktadır. Zemin yatak katsayısı (k) ile esneklik modülü (M_R) arasında Eşitlik 3.9'da görüldüğü gibi bir ilişki bulunmaktadır (Tunç 2007):

$$k = M_R / 19,4 \quad (3.9)$$

Eşitlik 3.9'da;

k : Yatak katsayısı (psi)

M_R : Esneklik modülü (psi), olarak tanımlanmaktadır.

Beton kaplamanın derzlerde veya çatlaklarda yükü dağıtabilme yeteneği için yük transfer katsayısı (J), bir parametre olarak göz önüne alınmaktadır (AASHTO, 1993). Çizelge 3.6'da yük transfer katsayıları verilmiştir.

Çizelge 3.6. Tavsiye edilen yük transfer katsayıları (AASHTO, 1993)

Banket	Asfalt		Beton Kaplama	
Yük Transferi	Var	Yok	Var	Yok
Kaplama Tipi	J	J	J	J
Donatısız Derzli	3,2	3,8–4,4	2,5–3,1	3,8–4,2
Donatılı Derzli	3,2	3,8–4,4	2,5–3,1	3,6–4,2
Sürekli Donatılı Derzsiz	2,9–3,2	-	2,3–2,9	-

Beton kaplamalarda drenaj katsayısı (C_d) için tavsiye edilen değerler, Çizelge 3.7'de gösterilmiştir. Tüm hesaplamalarda C_d değeri 1 olarak alınmıştır.

Çizelge 3.7. Tavsiye edilen drenaj katsayıları (AASHTO, 1993)

Drenaj Kalitesi	Suyun Uzaklaştırma Süresi	Kaplamanın Doygunluk Seviyesine Yakın Su İçeriğine Maruz Kaldığı Sürenin Yüzdesi			
		<%1	%1–5	%5–25	>%25
Çok iyi	2 saat	1,25–1,20	1,20–1,15	1,15–1,10	1,10
İyi	1 gün	1,20–1,15	1,15–1,10	1,10–1,00	1,00
Vasat	1 hafta	1,15–1,10	1,10–1,00	1,00–0,90	0,90
Kötü	1 ay	1,10–1,00	1,00–0,90	0,90–0,80	0,80
Çok Kötü	Dren yok	1,00–0,90	0,90–0,80	0,80–0,70	0,70

Hesaplamalarda aşağıdaki değerler göz önüne alındı (C 30/37 normal dayanımlı beton için);

$$W_{8,2} : 10 \times 10^6$$

$$Z_R : -1,037 \text{ (Devlet Yolu, güvenilirlik değeri (R, \%85), Çizelge 3.3)}$$

$$S_o : 0,45$$

$$D : \text{Rijit plak kalınlığı, inç}$$

$$\Delta PSI : 2, (P_o - P_t) \text{ ile hesaplandı}$$

$$P_o : 4,5$$

$$P_t : 2,5$$

$$Sc' : 4,55 \text{ MPa (659,93 psi) (Bakış, 2015)}$$

$$J : 2,9 \text{ (Çizelge 3.6)}$$

$$C_d : 1 \text{ (Çizelge 3.7)}$$

$$E_c : 33768 \text{ MPa (4897774,93 psi)}$$

$$k : 387 \text{ psi (Asfalt kaplamada olduğu gibi } M_R = 7500 \text{ psi alındı ve Eşitlik 3.9 ile değeri bulundu)}$$

Eşitlik 3.7 yardımıyla beton yol kaplama kalınlığı (D) 14,22 inç (36,12 cm) olarak bulundu. Hesaplanan bu kalınlığa göre, tez çalışmasında 2024 yılı maliyet hesaplaması yapılmıştır. Rijit üstyapılarda kaplama tabakası altına alttemel yapılması yeterlidir (Tunç, 2007). Rijit üstyapı maliyet hesaplamasında; C30/37 beton kaplama ile alttemel tabakası göz önüne alınmıştır. Esnek ve rijit üstyapı alttemel kalınlıkları birbirine eşit alınmıştır. $W_{8,2}$ (8,2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekerrür sayısı) 10×10^6 değerine göre hesaplama yapılarak rijit kaplama üstyapı 2024 yılı maliyet hesaplaması yapılmıştır. Toplam platform genişliği 24 metre olan bölünmüş bir beton yolun 2024 yılı birim fiyatları göz önüne alınarak 1 km maliyeti $W_{8,2} = 10 \times 10^6$ değerine göre hesaplanmıştır. Tasarım

hesapları, beton kesitinde yaklaşık %0,67 oranında donatı kullanılması gerektiğini göstermektedir (Edis, 2007). Çalışmada, C30/37 normal dayanımlı derzsiz ve sürekli donatılı beton kaplama maliyet hesaplamasında, 1 m³ betonda 60 adet ve 12 mm çaplı toplam 53,27 kg ağırlığında donatı kullanıldığı kabul edilmiştir (Bakış ve Hattatoğlu, 2016). Tabaka cinslerine göre birim fiyatlar Çizelge 3.8’de oluşturulmuştur.

Çizelge 3.8. C30/37 tabaka cinslerine göre birim fiyatlar (KGM, 2024; ÇŞB, 2024)

Poz No	Tanım	Birim	Maliyet (TL)
KGM/16.023/K-1	Her Dozda Demirli Beton	m ³	952,96
KGM/6000	Ocak taşından konkasörle kırılmış malzeme ile alttemel yapılması	m ³	378,99
10.130.1219	Çimento zati bedeli	Ton	2.045,00
15.160.1003	Ø8– Ø12 mm nervürlü beton çelik çubuğu bedeli ve işçilik	Ton	33.511,95

$W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerinde, toplam platform genişliği 24 metre olan bölünmüş bir rijit yolun 1 km maliyeti Çizelge 3.9’da görülmektedir.

Çizelge 3.9. 1 km uzunluktaki C30/37 beton kaplamalı rijit üstyapı toplam maliyeti

$W_{8,2}=10 \times 10^6$, C30/37 Beton plak kalınlığı=36,12 cm, Alttemel= 20 cm, Çimento= 450 kg/m³					
S.No	İşin Cinsi	Miktarı	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	Alttemel Yapılması	4800	m ³	378,99	1.819.152,00
2	Rijit plak beton dökümü	8868,80	m ³	952,96	8.451.611,65
3	Çimento zati bedeli	3990,96	Ton	2.045,00	8.161.513,20
4	Demir zati bedeli ve işçiliği	472,44	Ton	33.511,95	15.832.385,66
TOPLAM					34.264.662,51

3.2.11.3. Termoset beton kaplama kalınlık ve maliyet hesaplaması

Tez çalışmasında üretilen yeni tip termoset betonun rijit özellik göstermesinden dolayı, kaplama kalınlığı Eşitlik 3.7' ye göre hesaplanmıştır. Termoset beton üstyapı kalınlık hesaplamasında üstyapı kaplama tabakasının termoset beton kaplama tabakasından oluştuğu göz önüne alınmıştır. Termoset beton üstyapı maliyet hesaplamasında; termoset beton kaplama ile alttemel tabakası göz önüne alınmıştır. Esnek, rijit ve termoset beton üstyapı alttemel kalınlıkları birbirine eşit alınmıştır. $W_{8,2}$ (8,2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekrür sayısı) 10×10^6 değerine göre hesaplama yapılarak termoset beton kaplama üstyapı kalınlığı bulunmuştur. Hesaplamalarda aşağıdaki değerler göz önüne alındı (Termoset beton kaplama için);

$$W_{8,2} : 10 \times 10^6$$

$$Z_R : -1,037 \text{ (Devlet Yolu, güvenilirlik değeri (R, \%85), Çizelge 3.3)}$$

$$S_o : 0,45$$

$$D : \text{Rijit plak kalınlığı, inç}$$

$$\Delta PSI : 2, (P_o - P_t) \text{ ile hesaplandı}$$

$$P_o : 4,5$$

$$P_t : 2,5$$

$$Sc' : 25,32 \text{ MPa (3672,35 psi)}$$

$$J : 2,9 \text{ (Çizelge 3.6)}$$

$$C_d : 1 \text{ (Çizelge 3.7)}$$

$$E_c : 34.865,91 \text{ MPa (5.056.871,57 psi)}$$

$$k : 387 \text{ psi (Asfalt kaplamada olduğu gibi } M_R = 7500 \text{ psi alındı ve Eşitlik 3.9 ile değeri bulundu)}$$

Eşitlik 3.7 yardımıyla termoset beton yol kaplama kalınlığı (D) 6,20 inç (15,75 cm) olarak bulundu. Hesaplanan bu kalınlığa göre, tez çalışmasında 2024 yılı maliyet hesaplaması yapılmıştır. Rijit üstyapılarda kaplama tabakası altına alttemel yapılması yeterlidir (Tunç, 2007). Rijit üstyapı maliyet hesaplamasında; termoset beton kaplama ile alttemel tabakası göz önüne alınmıştır. Esnek ve rijit üstyapı alttemel kalınlıkları birbirine eşit alınmıştır. $W_{8,2}$ (8,2 ton eşdeğer tek-dingil yükü tekrür sayısı) 10×10^6 değerine göre hesaplama yapılarak rijit kaplama üstyapı 2024 yılı maliyet hesaplaması yapılmıştır. Toplam platform genişliği 24 metre olan bölünmüş bir beton yolun 2024 yılı birim

fiyatları göz önüne alınarak 1 km maliyeti $W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerine göre hesaplanmıştır. Hesaplanan termoset beton üstyapı kalınlıklarına göre maliyet hesaplamaları yapılmıştır. Tabaka cinslerine göre birim fiyatlar Çizelge 3.10'da oluşturulmuştur.

Çizelge 3.10. Termoset beton tabaka cinslerine göre birim fiyatlar (KGM, 2024)

Poz No	Tanım	Birim	Maliyet (TL)
KGM/6000	Ocak taşından konkasörle kırılmış malzeme ile alttemel yapılması	m ³	378,99
Özel Poz	Poliüretan zati bedeli	Ton	37.337,55
KGM/08.022/K	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 70 mm'ye kadar kırmataş hazırlanması	Ton	263,04

$W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerinde, toplam platform genişliği 24 metre olan bölünmüş bir termoset beton kaplamalı yolun 1 km maliyeti Çizelge 3.11'de görülmektedir.

Çizelge 3.11. 1 km uzunluktaki termoset beton kaplamalı üstyapı toplam maliyeti

$W_{8,2}=10 \times 10^6$, Termoset beton plak kalınlığı=15,75 cm, Alttemel= 20 cm, Poliüretan yoğunluk: 1,00 t/m³, 1 m³ kırmataş ağırlık=1,60 ton					
S.No	İşin Cinsi	Miktarı	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	Alttemel Yapılması	4800	m ³	378,99	1.819.152,00
2	Poliüretan zati bedeli	1.512,00	Ton	35.988,00	54.413.856,00
3	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 70 mm'ye kadar kırmataş hazırlanması	3.628,80	Ton	263,04	954.519,55
TOPLAM					57.187.527,55

Termoset beton üstyapı toplam maliyet hesaplaması aşağıda detaylandırılmıştır:

Toplam yüzey alanı = 24.000,00 m²

Termoset Beton yol kaplama kalınlığı= 15,75 cm

Toplam Termoset Beton Kaplama Hacmi = 24.000,00 × 0,1575= 3780,00 m³

Termoset Beton Kaplama Karışımının %60'ı agrega, yüzde 40'ı ise poliüretan ile oluşturulmaktadır.

Kaplama Agrega Hacmi= 3780,00 × 0,60= 2268,00 m³

Kaplama Agrega Ağırlığı= 2268,00 m³ × 1,60 t/m³ = 3.628,80 Ton

Kaplama Agrega Maliyeti= 3.628,80 Ton × 263,04 TL/Ton = 954.519,55 TL

2024 yılı birim fiyatlar Ocak ayında belirlenmektedir.

2024 Yılı Ocak Ayı Dolar kuru = 29,99 TL

Poliüretan ton fiyatı= 1.200,00 dolar (https://www.alibaba.com/product-detail/Speciality-Customized-Professional-Blend-Polyol-Polymetic_1600686336409.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.7af913a03oOeMn)

2024 Ocak ayı poliüretan ton fiyatı= 1.200,00 × 29,99 = 35.988,00 TL

Kaplama Poliüretan Hacmi= 3780,00 × 0,40=1.512,00 m³

Kaplama Poliüretan Ağırlığı= 1.512,00 m³ × 1,00 t/m³ = 1.512,00 Ton

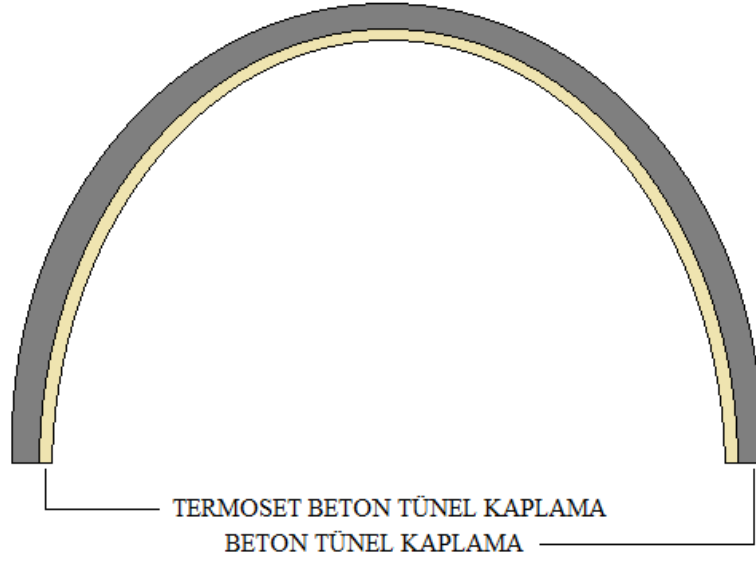
Kaplama Poliüretan Maliyeti= 1.512,00 Ton × 35.988,00 TL /Ton = 54.413.856,00 TL

Termoset Beton Üstyapı Toplam Maliyeti=

1.819.152,00+54.413.856,00+954.519,55 = **57.187.527,55 TL**

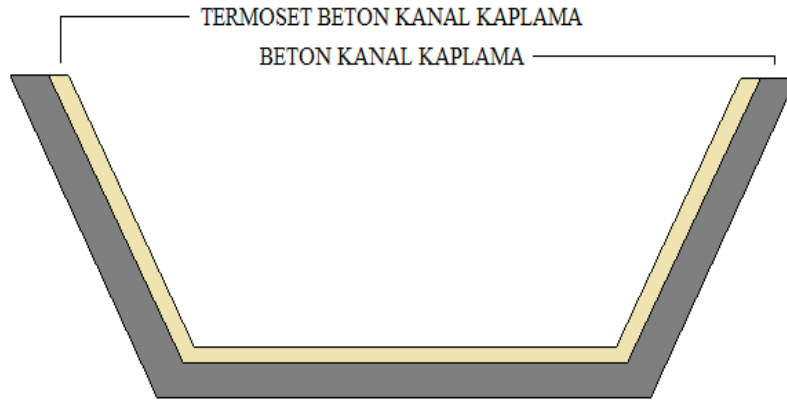
3.2.12. Termoset beton kaplamanın diğer yapılarda uygulanabilirliği

Termoset beton yol kaplaması doğrudan sıkıştırılmış alttemel tabakası üzerine inşa edilebilir. Yol uygulamalarına ek olarak termoset beton kaplamalar tünellerde, sulama kanallarında, yüzme havuzlarında, barajlarda, betonarme köprü ayaklarında, gemi ve tekne yapımlarında, demiryolu travers üretiminde, yol kaldırım yapımında, yol kilitli parke taşı yapımında, bina ve benzeri yapılarda da kullanılabilir. Beton tünel kaplaması üzerine kalıp veya enjeksiyon yoluyla termoset beton uygulama enkesiti Şekil 3.30'da görülmektedir.



Şekil 3.30. Beton tünel kaplaması üzerine kalıp veya enjeksiyon yoluyla termoset beton uygulama enkesiti

Beton sulama kanal kaplaması üzerine kalıp veya enjeksiyon yoluyla termoset beton kaplama uygulama enkesiti Şekil 3.31’de görülmektedir.



Şekil 3.31. Beton kanal kaplaması üzerine kalıp veya enjeksiyon yoluyla termoset beton uygulama enkesiti

Kalıp içersine doğrudan dökülebildiği gibi, özel iç tasarımlarıyla oluşturulacak enjektörler ile püskürtme yöntemiyle de kullanılabilir. Termoset beton kaplamaların basınç, eğilme, donma-çözülme ve yüzey aşınma dayanımları yüksek olup her türlü yapısal uygulamada kullanılabilir. Su emme değerlerinin sıfıra yakın olması, termoset beton kaplamaların ıslak hacimlerde kullanımına katkı sağlar. İçerisinde birbirinden bağımsız kılcal gözeneklerin bulunması, yapı ısı yalıtımına katkı sağlar.

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Optimum Bağlayıcı Kıvam Oranının Belirlenmesi

Poliüretan reçinenin iki ana bileşeni reçine (polyol) ve sertleştiricidir (izosiyanat). Her ikisinin karışımıyla farklı kıvamlarda poliüretan reçine elde edilebilmektedir (Szychver 2012; Engels et al. 2013; Randall & Lee 2002; <https://tr.wikipedia.org> 2023). Tez çalışmasında kullanılan bağlayıcı bileşenlerinden Polyol birim hacim ağırlığı (γ_p) 0,92 g/cm³ ve izosiyanat birim hacim ağırlığı (γ_i) 1,14 g/cm³ olarak bulunmuştur. Tez çalışmasında Polyol hacmi (V_p) ve İzosiyanat hacmi (V_i) aşağıda görüldüğü gibi 5 değişik hacim durumunda karıştırılarak optimum bağlayıcı kıvam oranı belirlenmiştir:

4.1.1. Bağlayıcı kıvam oranı 1. durum (V_p =%20, V_i =%80)

7×7×7 cm³ çelik küp kalıplara toplam çelik küp hacminin %20 si polyol ve %80 i izosiyanat olmak üzere poliüretan reçine bileşenleri dökülmüş ve karıştırılmıştır. Ancak 24 saat gibi uzun bir süre beklenilmesine rağmen karışımda herhangi bir sertleşme olmamıştır. Karışım sıvı halde kalmış bağlayıcı bir özellik göstermemiştir. Gözlemler sonucu bu karışım oranlarının optimum bağlayıcı olarak kullanılamayacağı ortaya çıkmıştır.

4.1.2. Bağlayıcı kıvam oranı 2. durum (V_p =%30, V_i =%70)

Aynı ebattaki çelik küp kalıplara toplam çelik küp hacminin %30 u polyol ve %70 i izosiyanat olmak üzere poliüretan reçine bileşenleri dökülmüş ve karıştırılmıştır. 15 dakikalık bir beklemeden sonra karışımda elastik bir sertleşme oluşmuştur. Numune yüzeyine yük uygulandığında yüzeyde çökmeler görülmüş ancak yüzeyden yük kaldırıldığında bu çökmeler hızlı bir şekilde yeniden eski haline dönüşmüştür.

4.1.3. Bağlayıcı kıvam oranı 3. durum (Vp=%50, Vi=%50)

Aynı şekilde çelik küp kalıplara toplam çelik küp hacminin %50 si polyol ve %50 si izosiyanat olmak üzere poliüretan reçine bileşenleri dökülmüş ve karıştırılmıştır. 3 dakikalık bir beklemeden sonra karışımda plastik bir sertleşme oluşmuştur. Numune yüzeyine yük uygulandığında yüzeyde çökmeler görülmemiştir. Numunenin kararlı ve rijit bir yapıda olduğu ortaya çıkmıştır.

4.1.4. Bağlayıcı kıvam oranı 4. durum (Vp=%70, Vi=%30)

Benzer şekilde çelik küp kalıplara toplam çelik küp hacminin %70 i polyol ve %30 u izosiyanat olmak üzere poliüretan reçine bileşenleri dökülmüş ve karıştırılmıştır. 6 dakikalık bir beklemeden sonra karışımda elasto-plastik bir sertleşme oluşmuştur. Numune yüzeyine yük uygulandığında yüzeyde çökmeler görülmemiştir. Numunenin 3.durumdaki numuneye göre başlangıçta daha yumuşak bir sertleşme göstermiştir. 24 saat sonra tam kararlı ve rijit yapıya kavuşmuştur. Kür süresi 3.durumdaki numuneye göre daha uzundur.

4.1.5. Bağlayıcı kıvam oranı 5. durum (Vp=%80, Vi=%20)

Yine $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$ çelik küp kalıplara toplam çelik küp hacminin %80 i polyol ve %20 si izosiyanat olmak üzere poliüretan reçine bileşenleri dökülmüş ve karıştırılmıştır. 15 dakikalık bir beklemeden sonra karışımda elastik bir sertleşme oluşmuştur. Numune yüzeyine yük uygulandığında yüzeyde çökmeler görülmemiştir. 24 saat sonra bile numune elastik yapı özelliğini devam ettirmiştir. Numunede zaman içerisinde rijit sertleşme görülmemiştir. Kür süresi 3.durumdaki numuneye göre daha uzundur.

Bu beş durumdaki karışım oranları içerisinde tez çalışması için optimum bağlayıcı kıvamının 3.durumdaki kıvam oranları olduğu ortaya çıkmıştır. Bu nedenle tüm tez çalışmalarında optimum bağlayıcı kıvam oranı poliüretan reçinenin %50 si polyol ve %50 si izosiyanat olmak üzere göz önüne alınmıştır.

4.2. Agrega ve Bağlayıcı Karışım Oranlarının Belirlenmesi

1 m³ karışım için yapılan hesaplamalar sonucu aşağıdaki Eşitlik 4.1 oluşturuldu:

$$V_A = V_K \times (\gamma_K - 1) / (\gamma_A - 1) \quad (4.1)$$

Burada;

V_A : Agrega hacmi (m³)

γ_A : Agrega Birim Hacim Ağırlığı (t/m³)

V_K : Karışımın toplam hacmi (m³)

γ_K : Karışımın Birim Hacim Ağırlığı (t/m³)

Eşitlik 4.1 yardımıyla Çizelge 4.1 oluşturuldu. Çizelge 4.1 'de karışım birim hacim ağırlıklarına göre malzeme karışım miktarları görülmektedir.

Çizelge 4.1. Malzeme karışım oranları

Karışım No	V_A (%)	V_S (%)	V_A (m ³)	V_S (m ³)	V_K (m ³)	W_A (t)	W_S (t)	W_K (t)	γ_A (t/m ³)	γ_P (t/m ³)	γ_K (t/m ³)
1	100	0	1,00	0	1,00	2,75	0,00	2,75	2,75	1,00	2,75
2	90	10	0,90	0,10	1,00	2,48	0,10	2,58	2,75	1,00	2,58
3	80	20	0,80	0,20	1,00	2,20	0,20	2,40	2,75	1,00	2,40
4	70	30	0,70	0,30	1,00	1,93	0,30	2,23	2,75	1,00	2,23
5	60	40	0,60	0,40	1,00	1,65	0,40	2,05	2,75	1,00	2,05
6	50	50	0,50	0,50	1,00	1,38	0,50	1,88	2,75	1,00	1,88
7	40	60	0,40	0,60	1,00	1,10	0,60	1,70	2,75	1,00	1,70
8	30	70	0,30	0,70	1,00	0,83	0,70	1,53	2,75	1,00	1,53
9	20	80	0,20	0,80	1,00	0,55	0,80	1,35	2,75	1,00	1,35
10	10	90	0,10	0,90	1,00	0,28	0,90	1,18	2,75	1,00	1,18
11	0	100	0,00	1,00	1,00	0,00	1,00	1,00	2,75	1,00	1,00

Tüm tez çalışmasında 5 nolu karışım oranları göz önüne alınmıştır. Çizelge 4.1 'de görüldüğü gibi, üretilecek tüm numunelerin birim hacim ağırlığı yaklaşık 2,05 t/m³ olacak şekilde karışım dizaynları oluşturulmuştur.

4.3. Agrega Elek Analizinin Yapılması

Tüm deneylerde 0–1 mm, 1–3 mm ve 3–5 mm arası kuvars agregası kullanılmıştır. Tüm tez çalışmasında kullanılan kuvars agregasının elek analizi Çizelge 4.2’de görülmektedir.

Çizelge 4.2. Elek analizi

Elek Çapı (mm)	Elek Üzerinde Kalan Ağırlık (g)	Elek Üzerinde Kalan Toplam Ağırlık (g)	Elek Üzerinde Kalan Toplam Ağırlık (%)	Elek Altında Kalan (%)
8	-	-	-	100
4	402	402	67	33
2	132	534	89	11
1	42	576	96	4
0,5	24	600	100	0

Tüm tez çalışmasında, genel olarak deneylerde kullanılacak kuvars agregasının %67 si 3–5 mm arası, %22 si 1–3 mm arası ve %11’i 0,5–1 mm arasında alınmıştır.

4.4. Basınç Deneyleri

Basınç deneyleri için 15×15×15 cm³ çelik küp kalıplar kullanılmıştır. Her kür için 3 adet numune oluşturulmuştur. 4 kür için toplam 12 numune üretilmiştir. Bu 12 numunenin görünümü Şekil 4.1’de verilmiştir.



Şekil 4.1. Poliüretan reçine ve agregadan oluşan numuneler

Elde edilen numunelere 7 gün hava kürü, 7 gün su kürü, 28 gün hava kürü ve 28 gün su kürü uygulanmıştır. Kür sonrası tüm numunelere basınç deneyi uygulanmıştır. Maksimum basınç dayanımını veren kürde şahit numuneler üretilmiştir. Şahit numunelerde sadece poliüretan reçine kullanılmıştır. Diğer numunelerde agrega kullanılmış, bağlayıcı olarak poliüretan reçine kullanılmıştır. Şahit numunelerde ise hiç bir agrega kullanılmamış olup sadece poliüretan reçine kullanılmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.3’de görülmektedir.

Çizelge 4.3. Basınç dayanım sonuçları

KÜR TİPİ	BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (t/m³)	SU EMME (%)	ORTALAMA BASINÇ DAYANIMI (MPa)
7 GÜN HAVA	1,917	0,03	40,94
7 GÜN SU	1,923	0,03	40,38
28 GÜN HAVA	1,930	0,03	41,22
28 GÜN SU	1,935	0,03	41,01

Çizelge 4.3’de görüldüğü gibi numunelerin tüm kürlerde elde edilen basınç dayanımlarında önemli bir fark görülmemektedir. Tüm kür şartlarında numuneler birbirine yakın sonuçlar vermiştir. Bunun sebebinin numunelerin su emme değerlerinin

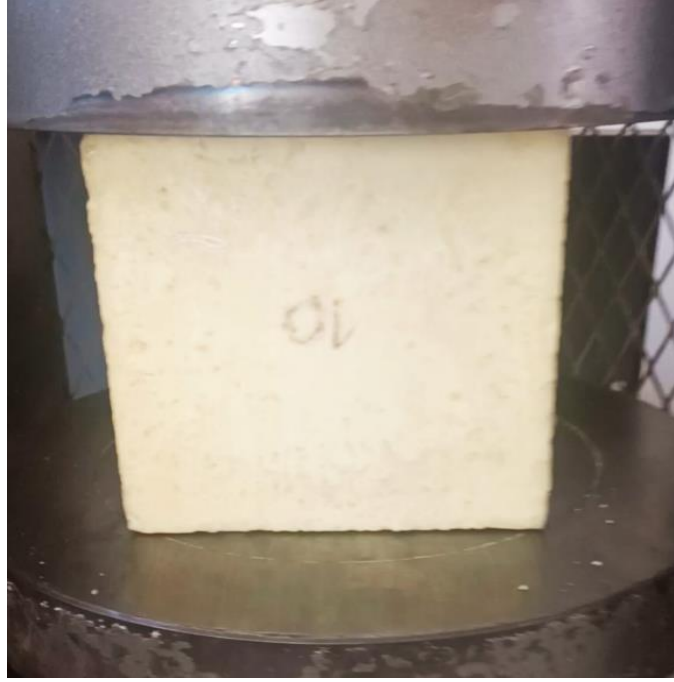
sıfıra yakın olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sıfıra yakın su emme değerine (%0,03) sahip numunelerin iklim şartlarından etkilenmediği söylenebilir. Ayrıca bu tip karışımlara sahip yapıların su üstünde inşa edildiği gibi su altında da inşa edilebileceği ve uzun süre dayanımlarını ilk gündeki gibi koruyabileceği sonucuna varılabilir. Çünkü 7 ve 28 günlük su kürleri arasındaki basınç farkı çok düşüktür.

Çizelge 4.3’de görüldüğü gibi en yüksek basınç dayanımı veren kür tipinin 28 gün hava kürü olduğu görülmektedir. Bu kür tipi sonucu oluşan numuneye *İdeal Numune* ismi verilmiştir. Şahit numuneler hazırlanarak ideal numune kür tipinde (28 gün hava kürü) bekletilmiş ve kür sonrası basınç deneyi uygulanmıştır. Şahit numune üretiminde herhangi bir agrega kullanılmamıştır. Şahit numune üretiminde sadece poliüretan reçine kullanılmıştır. Deneylerin hiç birinde kesinlikle çimento ve su kullanılmamıştır. Kalıplardan çıkarılan şahit numune görünümü Şekil 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.2. Şahit numune görünümü

Şahit numune basınç dayanım deney görüntüsü Şekil 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Şahit numune basınç dayanım deney görüntüsü

İdeal numune basınç dayanım deney görüntüsü Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.4. İdeal numune basınç dayanım deney görüntüsü

Şahit numunenin ortalama basınç dayanımı Çizelge 4.4’de görülmektedir.

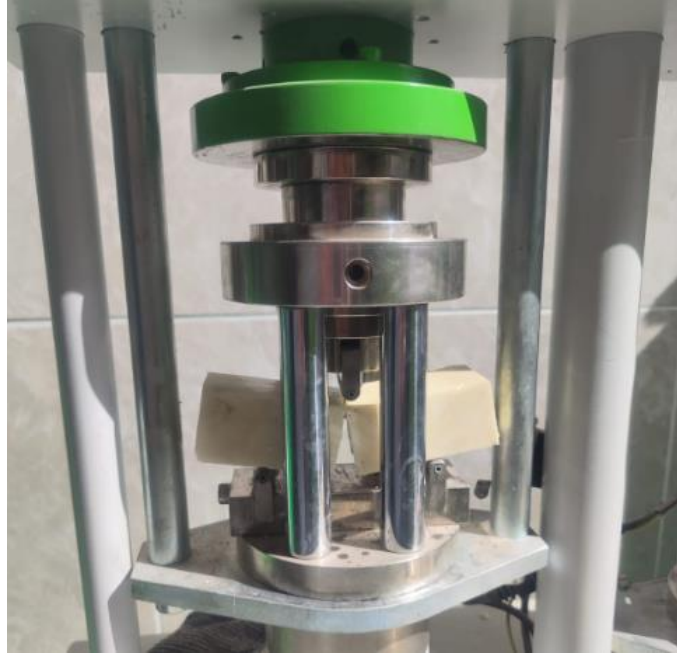
Çizelge 4.4. Şahit numune basınç dayanım sonucu

ŞAHİT NUMUNE KÜR TİPİ	BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (t/m³)	SU EMME (%)	ORTALAMA BASINÇ DAYANIMI (MPa)
28 GÜN HAVA	1,093	0,03	28,83

Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4 karşılaştırıldığında ideal numunenin şahit numune ile karşılaştırılması sonrası, ideal numunenin basınç dayanımının şahit numunenin basınç dayanımından yaklaşık %43 daha fazla olduğu söylenebilir.

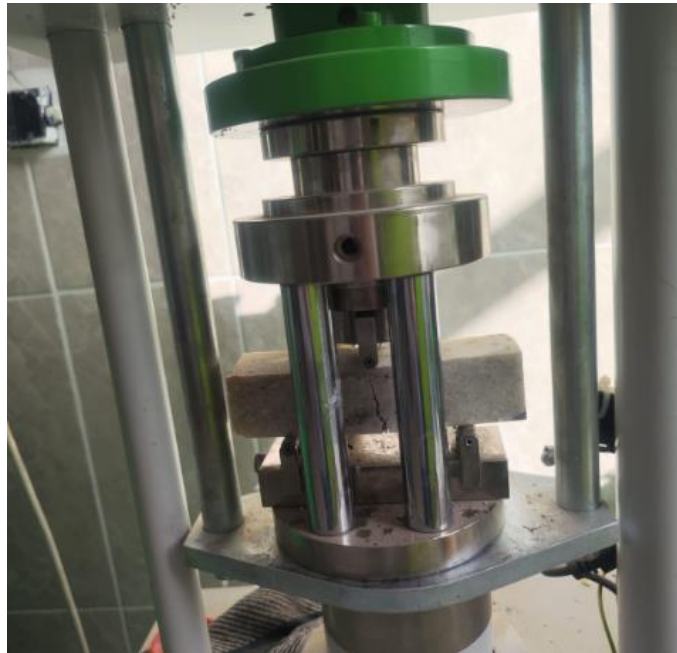
4.5. Eğilme Deneyleri

Eğilme deneyleri için 4×4×16 cm³ çelik prizma kalıplar kullanılmıştır. 3 Adet Şahit eğilme numuneleri ve 3 Adet kuvars agregalı İdeal eğilme numuneleri ayrı ayrı hazırlanarak ideal numune kür tipinde (28 gün hava kürü) bekletilmiş ve kür sonrası tüm numunelere eğilme deneyi uygulanmıştır. Eğilme deneyi için şahit numune üretiminde herhangi bir agregat kullanılmamıştır. Kuvars agregalı İdeal eğilme numunelerinde ise kuvars agregası ile bağlayıcı olarak poliüretan reçine kullanılmıştır. Deneylerin hiç birinde kesinlikle çimento ve su kullanılmamıştır. Şahit numune eğilme dayanım deney görüntüsü Şekil 4.5’de verilmiştir.



Şekil 4.5. Şahit numune eğilme dayanım deney sonuç görüntüsü

İdeal numune eğilme dayanım deney sonuç görüntüsü Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.6. İdeal numune eğilme dayanım deney sonuç görüntüsü

Eğilme dayanım deney sonuçları Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6' da görülmektedir.

Çizelge 4.5. Şahit numune eğilme dayanım sonucu

ŞAHİT NUMUNE KÜR TİPİ	BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (t/m³)	SU EMME (%)	ORTALAMA EĞİLME DAYANIMI (MPa)
28 GÜN HAVA	1,093	0,03	20,51

Çizelge 4.6. İdeal numune eğilme dayanım sonucu

İDEAL NUMUNE KÜR TİPİ	BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (t/m³)	SU EMME (%)	ORTALAMA EĞİLME DAYANIMI (MPa)
28 GÜN HAVA	1,930	0,03	25,32

Çizelge 4.5 ve Çizelge 4.6 karşılaştırıldığında ideal numunenin şahit numune ile karşılaştırılması sonrası, ideal numunenin eğilme dayanımının şahit numunenin eğilme dayanımından yaklaşık %23 daha fazla olduğu söylenebilir. Çimento bağlayıcılı normal ve yüksek dayanımlı betonların eğilme dayanımlarının 3–10 MPa arasında olduğu bilinmektedir. Tez çalışmasında üretilen yeni poliüretan bağlayıcılı termoset betonun eğilme dayanımının çimento bağlayıcılı normal ve yüksek dayanımlı betonların eğilme dayanımlarından yaklaşık 2,5–8,5 kat daha fazla olduğu deneysel olarak kanıtlanmıştır.

4.6. Ultrasonik Darbe Hızı (Ultrasonic Pulse Velocity-UPV) Deneyleri

UPV testinin yapılışı Şekil 4.7’de görülmektedir.



Şekil 4.7. UPV testinin yapılışı

Şahit numune UPV deney sonuçları Çizelge 4.7’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. Şahit numune UPV deney sonuçları

NUMUNE TİPİ	ULTRASONİK DARBE HIZI (m/s)
ŞAHİT NUMUNE-1	1545
ŞAHİT NUMUNE-2	1838
ŞAHİT NUMUNE-3	1722
ORTALAMA DEĞER	1702

İdeal numune UPV deney sonuçları Çizelge 4.8’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. İdeal numune UPV deney sonuçları

NUMUNE TİPİ	ULTRASONİK DARBE HIZI (m/s)
İDEAL NUMUNE-1	2798
İDEAL NUMUNE-2	2778
İDEAL NUMUNE-3	2825
ORTALAMA DEĞER	2800

UPV değerleri iki malzemenin boşluk yapısı ve dayanımını karşılaştırmada fikir verebilmektedir. UPV değeri ne kadar yüksekse malzemenin boşluk oranı o derece düşüktür. UPV değeri ne kadar yüksekse malzemenin basınç dayanımı o derece yüksektir. UPV ile boşluk oranı arasında ters ilişki, UPV ile basınç dayanımı arasında ise doğrusal ilişki bulunmaktadır. Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8 incelendiğinde, UPV değerleri göz önüne alındığında, ideal numunelerin boşluk oranının şahit numunelerin boşluk oranından daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Çizelge 4.7 ve Çizelge 4.8 incelendiğinde ve UPV değerleri göz önüne alındığında, ideal numunelerin basınç dayanımının şahit numunelerin basınç dayanımından daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

4.7. Böhme Yüzey Aşınma Deneyleri

Böhme deney görünümü Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



Şekil 4.8. Böhme testi görünümü

Böhme aşınma deney sonuçları Çizelge 4.9’da görölmektedir.

Çizelge 4.9. Böhme aşınma deney sonuçları

Numuneler	Yoğunluk pr (g/cm ³)	Kütle kaybı Δm (g)	Aşınma ΔV (cm ³ /50 cm ²)	TS 2824 EN 1338 Spesifikasyon Limiti (cm ³ /50 cm ²)
Şahit Numune	1,093	0,20	0,18	$\Delta V \leq 18$
İdeal Numune	1,930	1,91	0,99	

Çizelge 4.9'a göre ideal numunelerin aşınma kaybı, şahit numunenin aşınma kaybindan yaklaşık 5,5 kat daha yüksektir. Şartname limitinde yol kaplamasında kullanılacak kaplamanın aşınma kaybının 18 den küçük olması gerektiği ifade edilmiştir. Gerek şahit numuneler gerekse ideal numuneler şartname limitlerini karşılamaktadır. Bu nedenle yol kaplaması olarak kullanılabilirler.

4.8. Donma-Çözülme Deneyleri

Donma-çözülme değeri için, her tipteki numuneden üçer adet numune alınarak bu üç değerın ortalaması hesaplanmıştır. Referans numunelerin ve ideal numunelerin donma-çözülme deney sonuçları Çizelge 4.10'da görülmektedir.

Çizelge 4.10. Donma-çözülme testi için sıcaklık ve zaman döngüleri

Numune Tipi	Deney Öncesi Ağırlık (g)	Deney Sonrası Ağırlık (g)	Kütle Kaybı (kg)	Yüzey Alanı (m²)	Birim alan başına kütle kaybı (kg/m²)	Ortalama Birim alan başına kütle kaybı (kg/m²)	TS 2824 EN 1338 Şartname Limiti (kg/m²)
Referans-1	953,42	946,40	0,007	0,01	0,70	0,77	I ≤ 1
Referans-2	934,34	924,40	0,010	0,01	1,00		
Referans-3	946,63	941,00	0,006	0,01	0,60		
İdeal-1	1936,17	1925,80	0,010	0,01	1,00	0,77	
İdeal-1	1999,03	1993,60	0,005	0,01	0,50		
İdeal-1	1961,65	1953,20	0,008	0,01	0,80		

Çizelge 4.10'da görüldüğü gibi hem referans numuneleri hem de ideal numuneler şartname limitlerini karşılamaktadır. Bu nedenle yol kaplama inşaatlarında kullanılabilirler. Ayrıca gerek referans numunelerinin gerekse ideal numunelerin ortalama birim alan başına kütle kayıpları birbirine eşit çıkmıştır. Bu durum her iki poliüretan kaplamanın da olumsuz iklim şartlarından etkilenmediğini göstermektedir. Sonuç olarak her iki tip numunenin de olumsuz hava şartlarında yüksek hasar direncine sahip oldukları söylenebilir.

Donma-çözülme deneyi sonrası numunelere basınç deneyi uygulanmıştır. Donma-çözülme deneyi sonrası numunelerin basınç deney sonuçları Çizelge 4.11'de görülmektedir.

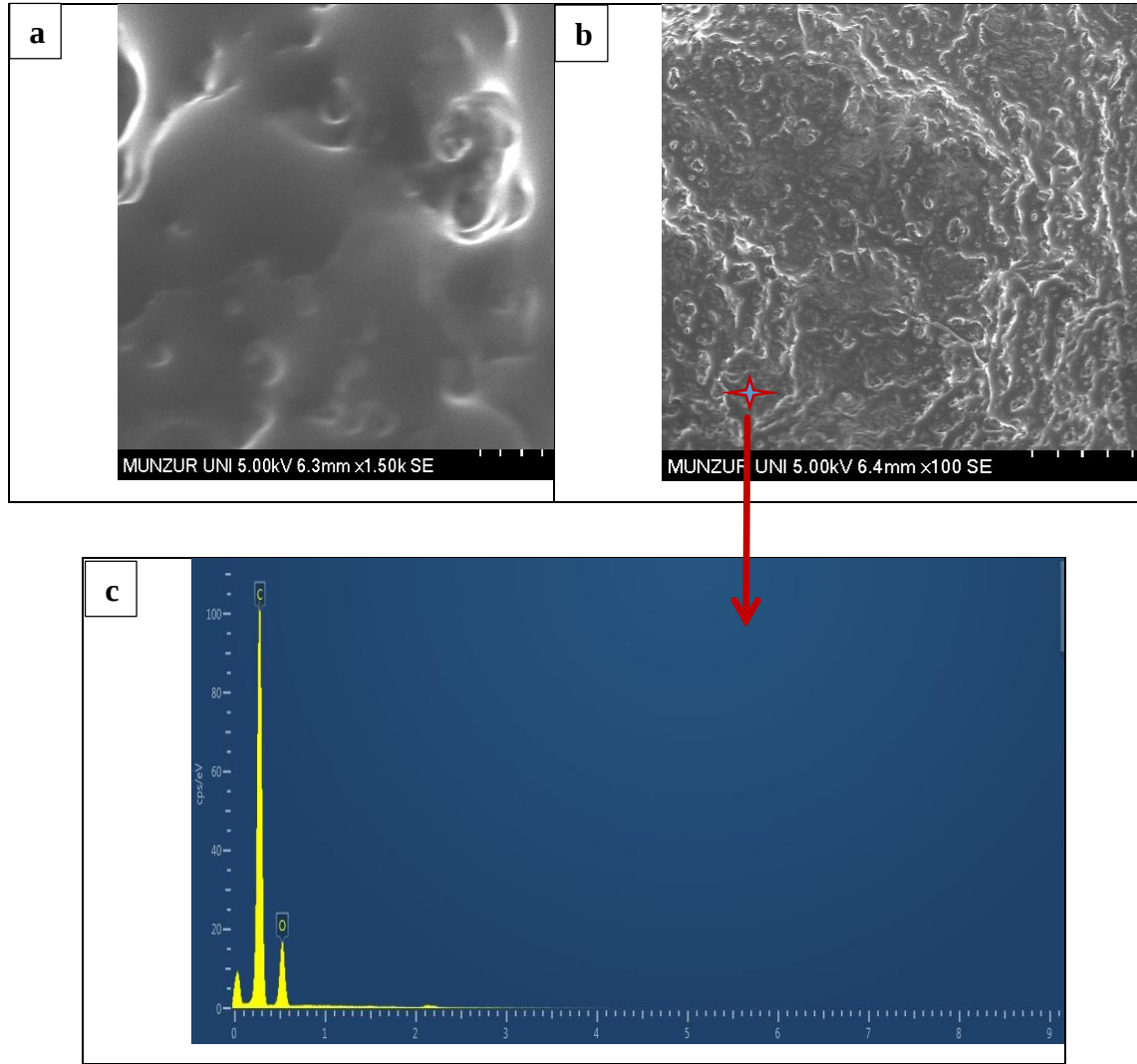
Çizelge 4.11. Donma-çözülme deneyi sonrası numunelerin basınç deney sonuçları

NUMUNE TİPİ	BİRİM HACİM AĞIRLIĞI (t/m³)	SU EMME (%)	DONMA- ÇÖZÜLME DENEYİ ÖNCESİ ORTALAMA BASINÇ DAYANIMI (MPa)	DONMA- ÇÖZÜLME DENEYİ SONRASI ORTALAMA BASINÇ DAYANIMI (MPa)
Referans	1,093	0,03	28,83	26,65
İdeal	1,930	0,03	41,22	34,94

Çizelge 4.11'de görüldüğü gibi donma-çözülme deneyi sonrası referans numunelerin basınç dayanımında %7,56 azalma meydana gelmiştir. İdeal numunelerin basınç dayanımında ise %15,24 azalma meydana gelmiştir. Bu durum, agregalı poliüretan yapının (ideal numune) agregasız poliüretan yapıya (referans numune) nazaran olumsuz iklim şartlarında iç yapı iskeleti olarak daha kararsız olduğunu göstermektedir. Rijit yol kaplamalarında genel olarak kaplama basınç dayanımının minimum 28 MPa olması istenmektedir (Tunç 2007). Her iki numune tipinde de deney sonrası elde edilen basınç değerleri, numunelerin yol kaplaması olarak kullanılabilirliğini göstermiştir.

4.9. SEM-EDX Analizleri

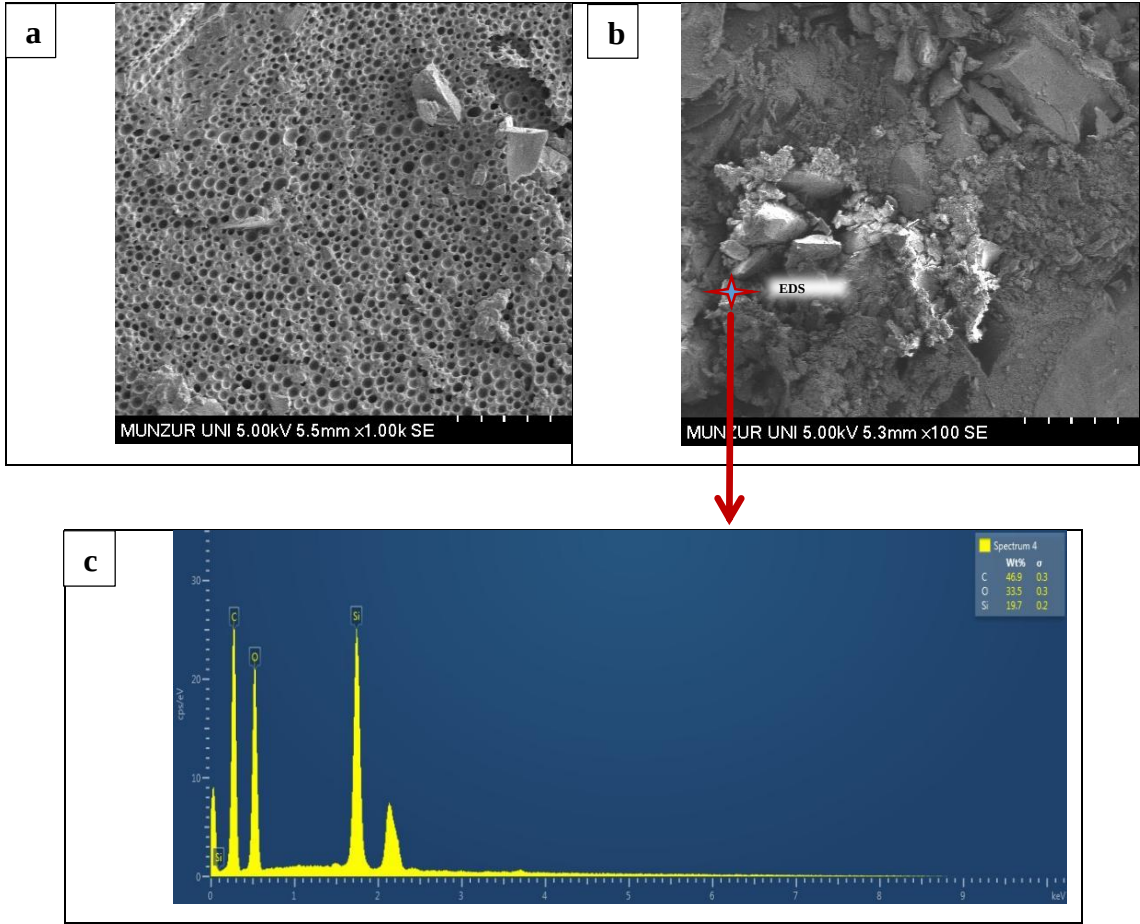
Poliüratan kaplama malzemesinin morfolojisi ve mikro yapısı 5 kV'ta çalışılan SEM cihazı ile Munzur Üniversitesi'nde incelendi.



Şekil 4.9. Poliüratan kaplama malzemesinin (a) SEM İmage 1.5k SE (b) SEM İmage 100 SE büyütmelelerdeki morfolojisi (c) EDX

SEM imajlarında görünen (Şekil 4.9a) kabarcıklar beton kesicisi ile kesildikten sonra alınan SEM fotoğraflarında (Şekil 4.10a) görüldüğü üzere küresel mikro boşluklar olup bunlar arasında bağlantı sağlayacak mikro kanalcıklar olmadığı, dolayısıyla boşluklar arasında bağlantı olmadığından su emme ve özgül ağırlığının az olacağı düşünülmektedir.

Yapılan bir çalışmada, malzeme içerisindeki birbirinden bağımsız mikro boşlukların, malzemenin su emme ve özgül ağırlığını düşürdüğünü ifade edilmiştir (Saleh vd., 2019). Bu özellikler, mikro boşluklu poliüretanı nem direnci ve daha hafif ağırlığın avantajlı olduğu uygulamalar için uygun hale getirir (Atiqah vd., 2017; Li vd., 2021; Xu vd., 2022).



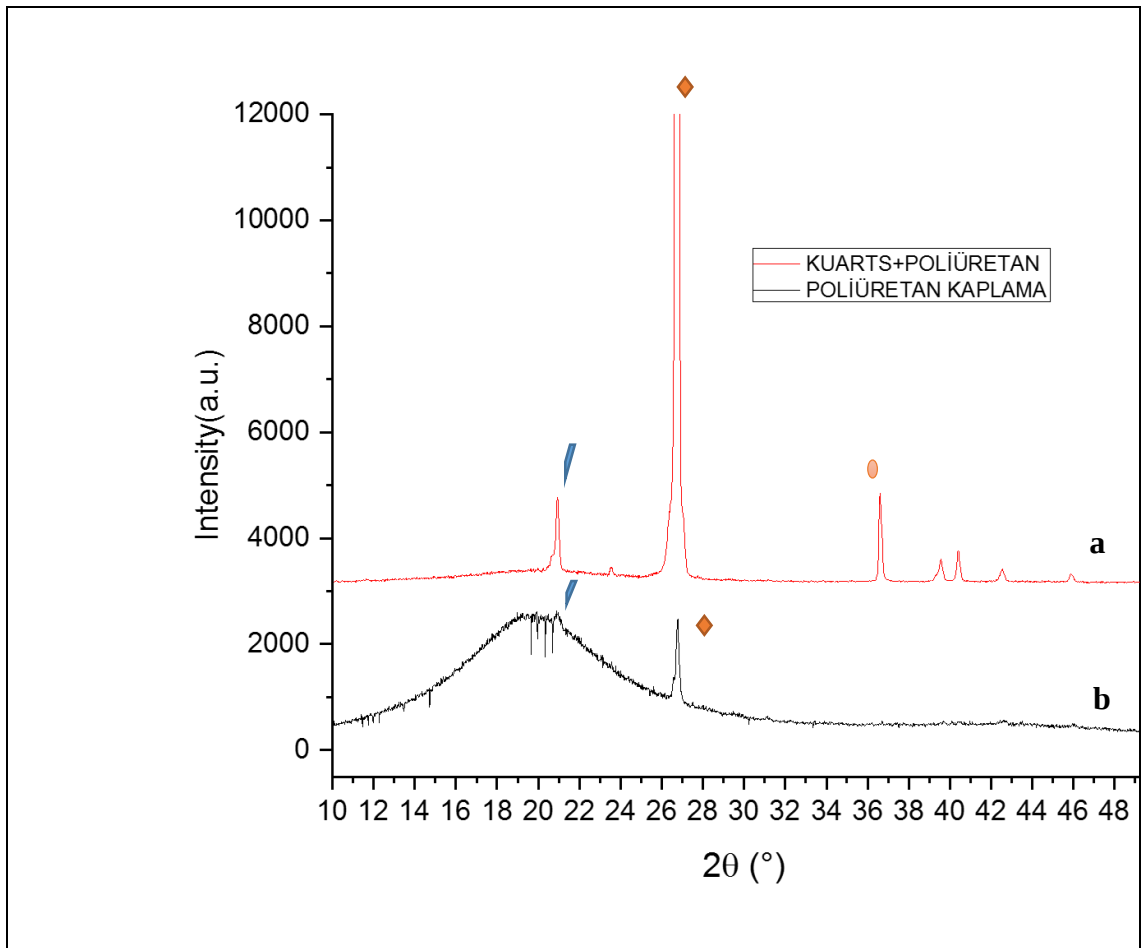
Şekil 4.10. Poliüretan Kuvars karışımlı kaplama partiküllerinin (a) 1,00 k ve (b) 100 SE büyütmelelerdeki morfolojisi (c) EDX

Şekil 4.10a ve Şekil 4.10b'de poliüretan kaplama malzemesinin morfolojisi gösterilmektedir. Enerji dağılımlı X-ışını incelemesi (EDX) sonuçlarına göre Si/O oranında silika (SiO_2) mevcuttur. Şekil 4.10c'deki pikler de silisyum oranının yüksek olduğunu görülmektedir. Bunun sebebi, karışım içerisine katılan kuvars agregasından dolayıdır. Şekil 4.10b de görüldüğü gibi kuvars agregaları poliüretan bağlayıcı içerisine gömülü durumdadır. SEM görüntülerinden elde bu veriler, kuvars agregası ile poliüretan bağlayıcı arasındaki arayüzey bağlarının (adezyon) kuvvetli olduğunu kanıtlamaktadır.

4.10. XRD (X Işınları Analizi)

Malzemelerin amorf, kristal veya yarı kristal yapısı XRD analizi ile belirlenmektedir. Amorf yapıdaki malzemeler, XRD’de düşük siddetli geniş pikler; metaller gibi kristal yapıdaki malzemeler, yüksek siddetli keskin pikler vermektedir (Kwakye-Awuah vd., 2021).

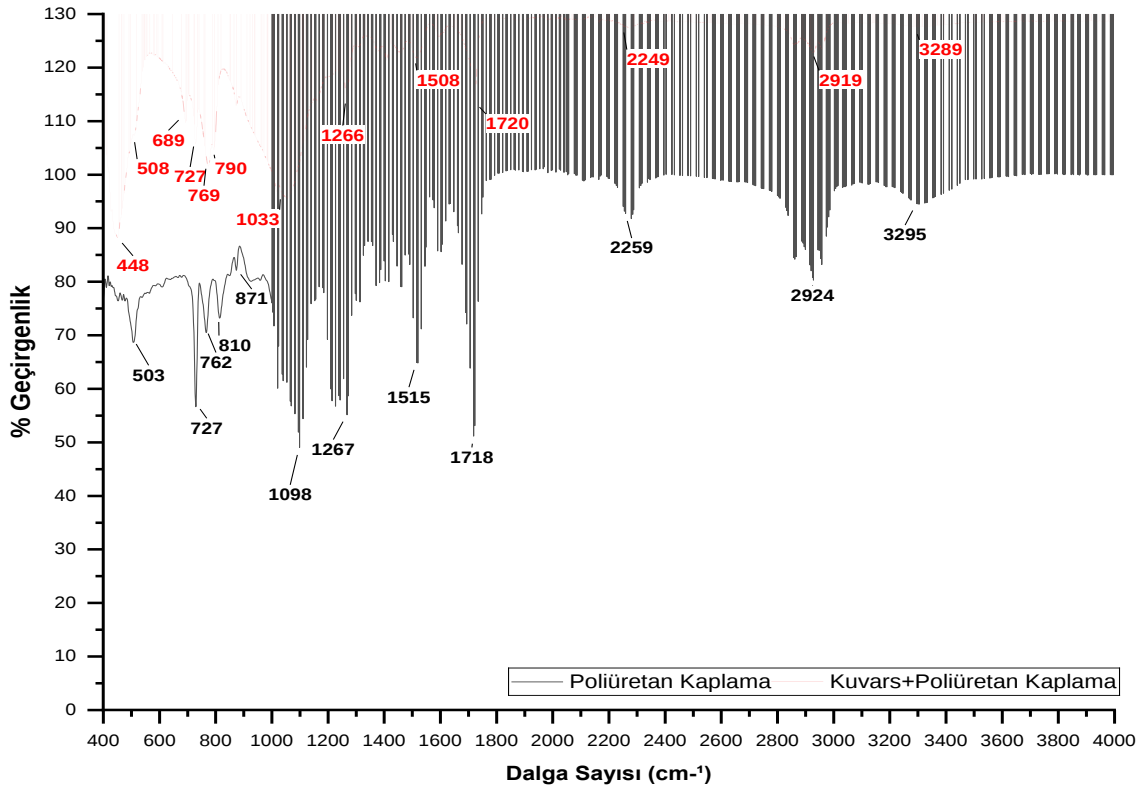
Kaolin mineralinin kuvars katkılı poliüretan malzemedeki görülmesi, dayanıklılığın artırılmasını sağlayan ve beyaz, bej rengi veren etkenlerdendir (Kwakye-Awuah vd., 2021). Şekil 4.11’de XRD grafiğinde görüldüğü üzere $2\theta \approx 21^\circ$ ’de silis, $2\theta \approx 27^\circ$ ’de kuvars ve $2\theta \approx 36.5^\circ$ ’de kaolin görülmektedir.



Şekil 4.11. (a) Kuvars+ poliüretan, (♦) Kuvars, Silis (/), kaolin(○) (b) Poliüretan Kaplama XRD faz analizleri

4.11. FT-IR Analizi (Fourier Dönüşümü Kızılötesi Spektroskopisi)

Herhangi bir maddedeki kimyasal bağları tanımlamak ve kimyasal kombinasyonları bulmak için basit, tahribatsız bir yöntem FT-IR spektroskopisidir. Deneysel çalışma için birkaç miligram malzeme gereklidir (Kaczmarek vd., 2021). Aralıklar, FT-IR grafiğinde gösterilen tipik güçlü hidroksil bantlarını ($\nu = 3600\text{--}3650\text{ cm}^{-1}$ 'de bağlanmamış OH germe bandı) ve C-H geniş alkil germe bandını ($\nu = 2850\text{--}3000\text{ cm}^{-1}$) içerir (Reis vd., 2006). $400\text{--}600\text{ cm}^{-1}$ aralığında güçlü asimetrik germe ve $900\text{--}1100\text{ cm}^{-1}$ bölgesinde güçlü asimetrik bükülme Si-O bağlarının özellikleridir (Malathy vd., 2022). Kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) bu bantlardaki titreşimlerle temsil edilir. Numunenin 954 cm^{-1} bandı oda sıcaklığında C-S-H'ye karşılık gelen piki göstermektedir (Choudhary vd., 2020). FT-IR spektroskopisinde, güçlü kuvars SiO_2 ve silika absorpsiyon bantları tipik olarak $4000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$ bölgesinde görünür (Saikia vd., 2008). Özellikle, kuvars ve silika için genellikle 1080 cm^{-1} ve 800 cm^{-1} civarında güçlü bantlar gözlemlenir (Volkov vd., 2021). Şekil 4.12'de görüldüğü gibi, kuvars ve silika 1098 cm^{-1} bölgesinde güçlü pik yapmıştır.



Şekil 4.12. Poliüretan kaplama ve kuvars+poliüretan karışımının FT-IR sonucu

FT-IR spektroskopisinde kaolin tipik olarak aşağıdaki aralıklarda güçlü absorpsiyon bantları gösterir; 3690–3620 cm^{-1} : Bu bölge -OH gerilme titreşimlerine karşılık gelir (Drits vd., 2021). 1030–1000 cm^{-1} aralığı Si-O germe titreşimleri ile ilişkilidir. 500–400 cm^{-1} aralığı Al-OH ve Al-O bükülme titreşimlerini içerir (Kloprogge ve Kloprogge 2019). Bu bantlar kaolin için karakteristiktir ve örneklerdeki bu kil mineralini tanımlamak ve analiz etmek için kullanılabilir (Du Plessis vd., 2021).

Şekil 4.12’de poliüretan kaplama ve kuvars+poliüretan karışımının FT-IR spektrumları birlikte gösterilmektedir. Her iki spektrum karşılaştırıldığında, piklerde herhangi bir kayma veya yeni bir pik oluşumu gözlenmemektedir. Bu sonuca göre, poliüretan bağlayıcı içerisine katılan kuvars agregası, bağlayıcı poliüretan matrisin yapısında herhangi bir değişmeye neden olmamaktadır. Şekil 4.12’de, poliüretan kaplama ve kuvars+poliüretan karışımının birlikte analizinde, poliüretan kaplama piklerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebinin poliüretan reçinenin aromatik halka gerilmelerinden dolayı meydana geldiği düşünülmektedir (Huang vd., 2000; Pattanayak ve Jana, 2005, Akgün, 2008).

4.12. Yol Üstyapısı Maliyet Hesaplamaları

4.12.1. Esnek üstyapı maliyet hesaplaması

$T_{8.2}=10 \times 10^6$ değerinde, toplam platform genişliği 24 metre olan bölünmüş bir asfalt yolun 1 km maliyeti Çizelge 4.12’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.12. 1 km uzunluktaki esnek üstyapı toplam maliyeti

T_{8,2}=10×10⁶, Aşınma=5 cm, Binder= 6 cm, Bitümlü Temel=8 cm, Temel=15 cm, Alttemel=20 cm					
S.No	İşin cinsi	Miktarı	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	Alttemel Yapılması	4800	m ³	378,99	1.819.152,00
2	Temel Yapılması	3600	m ³	407,65	1.467.540,00
3	Bitümlü Temel Yapılması	24000	m ²	132,42	3.178.080,00
4	Binder Tabakası Yapılması	24000	m ²	105,06	2.521.440,00
5	Aşınma Tabakası Yapılması	24000	m ²	89,50	2.148.000,00
6	AC zati bedeli	504	ton	12.860,00	6.481.440,00
TOPLAM					17.615.652,00

4.12.2. Rijit üstyapı maliyet hesaplaması (C30/37 beton kaplama)

W_{8,2}=10×10⁶ değerinde, toplam platform genişliği 24 metre olan bölünmüş bir rijit yolun 1 km maliyeti Çizelge 4.13’de görülmektedir.

Çizelge 4.13. 1 km uzunluktaki C30/37 beton kaplamalı rijit üstyapı toplam maliyeti

W_{8,2}=10×10⁶, C30/37 Beton plak kalınlığı=36,12 cm, Alttemel= 20 cm, Çimento= 450 kg/m³					
S.No	İşin Cinsi	Miktarı	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	Alttemel Yapılması	4800	m ³	378,99	1.819.152,00
2	Rijit plak beton dökümü	8868,80	m ³	952,96	8.451.611,65
3	Çimento zati bedeli	3990,96	Ton	2.045,00	8.161.513,20
4	Demir zati bedeli ve işçiliği	472,44	Ton	33.511,95	15.832.385,66
TOPLAM					34.264.662,51

4.12.3. Rijit üstyapı maliyet hesaplaması (termoset beton kaplama)

$W_{8,2}=10 \times 10^6$ değerinde, toplam platform genişliği 24 metre olan bölünmüş bir termoset beton kaplamalı yolun 1 km maliyeti Çizelge 4.14’de görülmektedir.

Çizelge 4.14. 1 km uzunluktaki termoset beton kaplamalı üstyapı toplam maliyeti

$W_{8,2}=10 \times 10^6$, Termoset beton plak kalınlığı=15,75 cm, Alttemel= 20 cm, Poliüretan yoğunluk: 1,00 t/m³, 1 m³ kırmataş ağırlık=1,60 ton					
S.No	İşin Cinsi	Miktarı	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
1	Alttemel Yapılması	4800	m ³	378,99	1.819.152,00
2	Poliüretan zati bedeli	1.512,00	Ton	35.988,00	54.413.856,00
3	Ocak taşından konkasörle kırılmış ve elenmiş 70 mm'ye kadar kırmataş hazırlanması	3.628,80	Ton	263,04	954.519,55
TOPLAM					57.187.527,55

Üstyapı kalınlık karşılaştırması Çizelge 4.15’de görülmektedir.

Çizelge 4.15. $W_{8,2}$ değerine göre kaplama kalınlıkları (cm)

$W_{8,2}$ ($\times 10^6$)	BSK (Bitümlü Sıcak Karışım)	C 30/37 (Normal Dayanımlı Beton)	Termoset Beton (Poliüretan Bağlayıcılı Beton)
10	19,00	36,12	15,75

Üstyapı maliyet karşılaştırması Çizelge 4.16’da görülmektedir.

Çizelge 4.16. $W_{8,2}$ değerlerine göre üstyapı toplam maliyetleri (TL)

$W_{8,2}$ ($\times 10^6$)	BSK (Bitümlü Sıcak Karışım)	C 30/37 (Normal Dayanımlı Beton)	TERMOSET BETON (Poliüretan Bağlayıcılı Beton)
10	17.615.652,00	34.264.662,51	57.187.527,55

4.13. Yangın Deneyleri

Tez çalışmasında oluşturulan termoset beton kaplama bağlayıcısı poliüretan olup plastik bir polimerdir. Bu nedenle yangın sınıfı TS EN 2/A1 (2013)' e göre A sınıfı yangına girmektedir.

Cergy-Pontoise Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Yapı Laboratuvarı, asfalt ve betondan alınan birçok numune üzerinde, yangına karşı davranışı gösteren deneysel çalışma yapmıştır. Bu çalışma; bitümlü karışımların yangındaki davranışını ölçmek amacıyla standart yangın eğrisinin kullanıldığı ve çeşitli yüksekliklerdeki sıcaklığın ısı çiftleri aracılığıyla ölçüldüğü ilk kontrollü çalışma olarak kabul edilmektedir. Karşılaştırma yapmak için asfalt kaplama üzerine yapılan bu deneyler beton numuneler üzerine de uygulanmıştır (Noumowe, 2003; Jofré vd., 2010). Yürütülen çalışmanın en önemli sonuçları aşağıda görülmektedir:

- Bileşenlerinden dolayı, yangın esnasında beton kaplamalar oldukça kararlıdır. Bu yüzden beton kaplamalar, tünellerdeki yangın riskine sebep olmamaktadır.
- Bitümlü kaplamalar, yangın esnasında ısı ve yangın yükünü artıran yüksek kalorifik değerlere sahiptir. 428°C ile 530°C arasında yanma meydana gelmektedir.
- Bitümlü kaplamalar yangın sırasında, mekanik dayanımlarını kaybetmektedir. Yangın sonucunda bitümlü karışımlar deformasyona uğramakta, yapısal özelliklerini kaybetmektedir. Ayrıca yanma sonucu bitümün bağlayıcı etkisi ortadan kalkmaktadır.

TS EN ISO 2592' e göre bitümün parlama noktası (yanma noktası) 220°C ve üzerindedir. Poliüretanın (PUR) tutuşma sıcaklığı ise 356°C'dir (Lyon ve Janssens, 2005; Kılıç, 2017). Bu nedenle termoset beton kaplamaların asfalt kaplamalara nazaran yanmaya daha dirençli olduğu söylenebilir.

Bazı plastikler hafiflikleri ve yangın koşullarına olan dayanıklılıkları nedeniyle itfaiyecilerin koruma malzemelerinde kullanılmaktadır. Örneğin: Emniyet malzemeleri, miğfer veya elbiseler, C-PVC yağmurluk, PVC veya PUR (poliüretan) kaplı yangın hortumları (Vogel vd., 2012, Kılıç, 2017). Bu durum poliüretan içerikli malzemelerin yangına dayanıklı olduğunu göstermektedir.

Tez çalışması UL 94 yangın deneyinde, numune test alevine maruz bırakıldı. Numune 30 saniye sonra yanmaya başladı ve yandıktan 17 saniye sonra kendiliğinden

söndü. Deney süresince numunede yanmadan dolayı herhangi bir damlama görülmedi. Bu sonuç itibarıyla, termoset beton kaplamanın UL 94-5VA ile birlikte UL 94-5VB'yi de karşıladığı ortaya çıktı. Bu sonuçlara göre, termoset beton kaplamanın yangın direncinin yüksek olduğu söylenebilir.

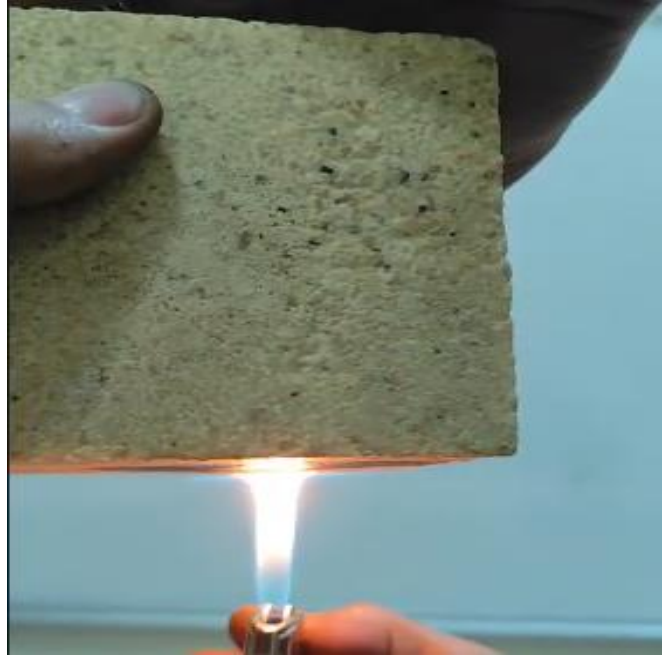
5VA: Yüzey yanması 60 saniye içinde durur (Numune yüzey yanması 17 saniye sürdü),

5VB: 60 saniye içinde yüzey yanması (Numune yüzeyi 30 saniyede yanmaya başladı),

Tez çalışmasında elde edilen termoset beton kaplama her iki şartı da sağlamaktadır.

Numune sınıflandırması yapılırken; numunede deformasyon görülmemesi, deney sırasında duman gazının sınırlı miktarda olması ve deney sırasında numunede alev damlacıklarının olmaması gibi özellikler göz önüne alındı. Sonuç olarak 2000/147/EC'ye göre, tez çalışmasından elde edilen termoset beton kaplamanın A2-s2,d0 sınıfında olduğu söylenebilir.

Duman ve alev verileri ile yanan madde hakkında ve yangının ısısı hakkında fikir sahibi olunabilir. Alev, hafif kırmızımsımsı bir renk ise, yangın henüz başlangıç safhasında olup yaklaşık ısı 500°C derecedir. Alev, beyaz-kırmızı, bir renk görünümünde ise, çok az kırmızı, daha çok beyaza dönük bir renk ise, yangının ısısı yaklaşık 1500°C derecedir (<http://tr.trakyayangin.com/guncel-bilgiler/yangin-siniflarina-gore-yanma-karakteristikleri/>). Numune taban ortası 70 saniye boyunca 1500°C derece aleve maruz bırakıldı. Numunede herhangi bir yanma ve damlama görülmedi. Numune ortasından yanma durumu Şekil 4.13'de görülmektedir.



Şekil 4.13. Numune ortasından yanma durumu

Numunenin 70 saniye aleve maruz kaldıktan sonraki durumu Şekil 4.14’de görülmektedir.



(a) 1X görünümü

(b) 2X görünümü

(c) 4X görünümü

Şekil 4.14. Numunenin 70 saniye aleve maruz kaldıktan sonraki durumu

Deney sonrası numune gözlemlenmiş ve herhangi bir deformasyona rastlanılmamıştır. Başka bir numune 23 derece ısıda etüve bırakıldı. 1,5 saat sonra etüv ısısı 17°C’ye çıktı. 3 saat sonra etüv ısısı 22°C’ye çıktı. 3 saat sonra etüv ısısında yükselme olmadı ve numune etüvde 1 saat daha bekletildi. Numune toplamda 223°C’ye kadar 4 saat etüvde bırakıldı. Deney sonrası numunelerin resimleri çekilerek Şekil 4.15’de gösterildi.



(a) 1X görünümü

(b) 2X görünümü

(c) 4X görünümü

Şekil 4.15. Numunenin etüvde 4 saat 223°C ısı sonrası görünümü

Deney sonrası numune gözlemlenmiş ve herhangi bir deformasyona rastlanılmamıştır. Bu durum termoset beton kaplamaların yangına dayanıklı olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır.

4.14. Yapışma Dayanım Deneyleri

4.14.1. Beton yol kaplaması üzerine termoset beton yol kaplaması

Yapıştırıcı kuruduktan sonra çekme diskci cihaza tespit edildi ve deney başlatıldı (Şekil 4.16).



Şekil 4.16. Yapışma deneyi çekme diskinin cihaza tespit edilmesi

Deneye tabi tutulan 5 numunenin yapışma dayanımları sırasıyla 3,95 MPa, 3,99 MPa, 3,97 MPa, 4,00 MPa ve 3,92 MPa olarak bulundu. Deney tamamlandıktan sonra numunenin yapışma dayanım değeri, Şekil 4.17’de görüldüğü gibi deney cihazı tarafından otomatik olarak kaydedilmektedir.

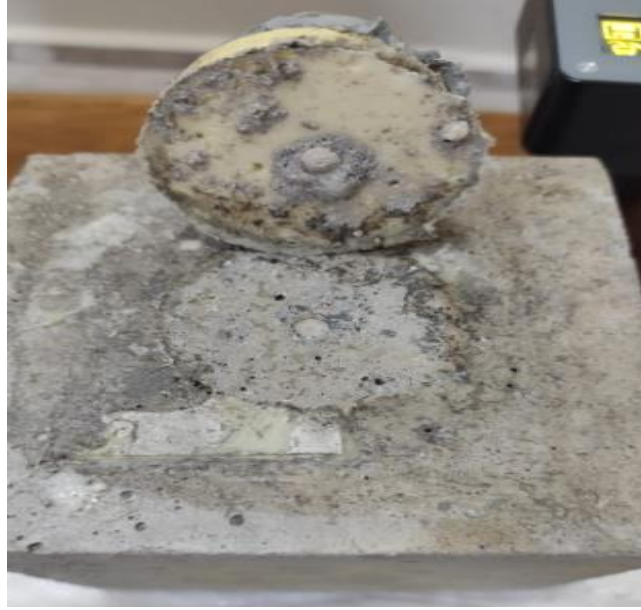


Şekil 4.17. Beton üzeri termoset kaplamada yapışma deney cihazı ve otomatik kaydedilen yapışma dayanım değeri

Bu 5 değerden en küçük 3 değerın aritmetik ortalaması alınarak yapışma dayanım değeri bulundu.

$$\text{Yapışma dayanım değeri} = (3,95 + 3,97 + 3,92) / 3 = 3,95 \text{ MPa}$$

Numunede kopma şekli Şekil 4.18’de görülmektedir.



Şekil 4.18. Beton kaplama yüzeyine termoset beton kaplama uygulamasında numunede kopma şekli

Şekil 4.18’de görüldüğü gibi numune A/B : %100 olarak gözlemlendi. TS EN 1542 standardına göre A/B kopma şekli, geçerli bir kopma şeklidir ve cihazda otomatik olarak kaydedilen yapışma dayanım sonucu kabul edilebilir.

A/B : İlk tabaka (termoset kaplama) ve C 30/37 beton temas yerinden kopma

Beton kaplama üzerine termoset beton kaplama uygulanması durumunda, iki kaplama arasındaki yapışma dayanım deney sonuçları Çizelge 4.17’de görülmektedir.

Çizelge 4.17. Beton kaplama yüzeyine termoset beton kaplama uygulamasında yapışma dayanım deney sonuçları

Numune No	Yapışma Dayanımı (MPa)	Kopma Şekli	En Düşük 3 Değerin Ortalama Yapışma Dayanımı (MPa)	Değerlendirme
1	3,95	A/B: %100	3,95	Yüksek yapışma dayanımı
2	3,99	A/B: %100		
3	3,97	A/B: %100		
4	4,00	A/B: %100		
5	3,92	A/B: %100		

Çizelge 4.17’de görüldüğü gibi beton yol üzerine termoset beton kaplama uygulandığında, iki tabaka arasındaki yapışma dayanımının yüksek olduğu söylenebilir.

4.14.2. Termoset beton yol kaplaması üzerine Termoset beton yol kaplaması

Yapışma deneyi çekme diskinin cihaza tespit edilmesi ve deneyin başlaması görünümü Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Yapışma deneyi çekme diskinin cihaza montesi ve deneyin uygulanması

Deneye tabi tutulan 5 numunenin yapışma dayanımları sırasıyla 4,63 MPa, 4,69 MPa, 4,61 MPa, 4,67 MPa ve 4,65 MPa olarak bulundu. Deney tamamlandıktan sonra numunenin yapışma dayanım değeri deney cihazı tarafından otomatik olarak kaydedilmektedir (Şekil 4.20).



Şekil 4.20. Termoset üzeri termoset kaplamada otomatik kaydedilen yapışma dayanım değeri

Bu 5 değerden en küçük 3 değerın aritmetik ortalaması alınarak yapışma dayanım değeri bulundu.

$$\text{Yapışma dayanım değeri} = (4,63 + 4,61 + 4,65) / 3 = 4,63 \text{ MPa}$$

Numunede kopma şekli Şekil 4.21’de görölmektedir.



Şekil 4.21. Termoset beton kaplama yüzeyine termoset beton kaplama uygulamasında numunede kopma şekli

Şekil 4.21’de görüldüğü gibi numune A/B : %100 olarak gözlemlendi. TS EN 1542 standardına göre A/B kopma şekli, geçerli bir kopma şeklidir ve cihazda otomatik olarak kaydedilen yapışma dayanım sonucu kabul edilebilir.

A/B: İlk tabaka (üstteki dairesel termoset beton kaplama) ve ikinci tabaka (alttaki termoset beton kaplama) temas yerinden kopma

Termoset beton kaplama üzerine termoset beton kaplama yapılması durumunda, iki kaplama arasındaki yapışma dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.18’de görülmektedir.

Çizelge 4.18. Termoset beton yüzeyine termoset beton kaplama uygulamasında yapışma dayanım deney sonuçları

Numune No	Yapışma Dayanımı (MPa)	Kopma Şekli	En Düşük 3 Değerin Ortalama Yapışma Dayanımı (MPa)	Değerlendirme
1	4,63	A/B: %100	4,63	Yüksek yapışma dayanımı
2	4,69	A/B: %100		
3	4,61	A/B: %100		
4	4,67	A/B: %100		
5	4,65	A/B: %100		

Çizelge 4.18’de görüldüğü gibi termoset beton yol üzerine termoset beton kaplama uygulandığında, iki tabaka arasındaki yapışma dayanımının yüksek olduğu söylenebilir.

4.14.3. Eski asfalt yol kaplaması üzerine yeni termoset beton yol kaplaması

Deneye tabi tutulan 5 numunenin yapışma dayanımları sırasıyla 0,89 MPa, 0,83 MPa, 0,91 MPa, 0,87 MPa ve 0,90 MPa olarak bulundu. Deney tamamlandıktan sonra numunenin yapışma dayanım değeri, Şekil 4.22’ de görüldüğü gibi cihaz tarafından otomatik olarak kaydedilmektedir.



Şekil 4.22. Asfalt kaplama üzeri termoset kaplamada otomatik kaydedilen yapışma dayanım değeri

Bu 5 değerden en küçük 3 değerın aritmetik ortalaması alınarak yapışma dayanım değeri bulundu.

$$\text{Yapışma dayanım değeri} = (0,89 + 0,83 + 0,87) / 3 = 0,86 \text{ MPa}$$

Numunede kopma şekli Şekil 4.23’de görülmektedir.



Şekil 4.23. Asfalt kaplama yüzeyine termoset beton kaplama uygulamasında numunede kopma şekli

Şekil 4.23’de görüldüğü gibi numune A/B : %100 olarak görüldü. TS EN 1542 standardına göre A/B kopma şekli, geçerli bir kopma şekli olup, cihazda otomatik olarak kaydedilen yapışma dayanım sonucu kabul edilebilir.

A/B: İlk tabaka (termoset beton kaplama-üstteki dairesel kaplama) ve asfalt kaplama (ikinci tabaka-alttaki asfalt) temas yerinden kopma

Asfalt kaplama üzerine termoset beton kaplama durumunda, iki kaplama arasındaki yapışma dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.19’da görülmektedir.

Çizelge 4.19. Asfalt kaplama yüzeyine termoset beton kaplama uygulamasında yapışma dayanım deney sonuçları

Numune No	Yapışma Dayanımı (MPa)	Kopma Şekli	En Düşük 3 Değerin Ortalama Yapışma Dayanımı (MPa)	Değerlendirme
1	0,89	A/B: %100	0,86	Beton kaplama ve termoset beton kaplama yüzeyine nazaran düşük yapışma dayanımı
2	0,83	A/B: %100		
3	0,91	A/B: %100		
4	0,87	A/B: %100		
5	0,90	A/B: %100		

Çizelge 4.19’da görüldüğü gibi asfalt kaplama üzerine termoset beton kaplama uygulandığında, iki tabaka arasındaki yapışma dayanımının beton kaplama ve termoset kaplamalara nazaran daha düşük olduğu söylenebilir. Bunun sebebinin kullanılmış asfalt numunelerinin üzerindeki zamanla birikmiş motor yağlarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, herhangi bir bitüm veya çimento bağlayıcısı kullanmadan, poliüretan reçine bağlayıcısı ve agrega kullanarak yeni bir yol kaplaması oluşturuldu. Çalışmanın diğer bir önemi ise, yol kaplama inşasında, kaplama üretimi için karışımda herhangi bir miktar su kullanılmadı. Bu çalışmada oluşturulan poliüretan reçine bağlayıcılı yol kaplamasında, bağlayıcı olarak çimento veya bitüm içermeyen, karışımında su bulunmayan yeni bir kaplama türü ortaya çıkarıldı. Sonuç olarak tez çalışmasının en önemli iki amacı aşağıda belirtilmiştir:

- Doğal afetler sonrası yıkılan veya ağır hasar gören yol kaplamasında, kaplamanın 5–15 dakikada kürünü tamamlayarak trafiğe açılması,
- Su kaynaklarının hızla azaldığı günümüzde, yol kaplama inşası için kaplama üretiminde su kullanılmaması.

Yol kaplamaları genel olarak asfalt ve beton kaplama olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tez çalışmasında, üçüncü bir yol kaplaması sınıflandırmasına dâhil olabilecek poliüretan reçine bağlayıcılı yol kaplaması oluşturuldu. Karışımda kullanılan bağlayıcı malzeme, iki bileşenli poliüretan reçinedir. Agrega ve bağlayıcı karışım oranları belirlendikten sonra numunelere aşağıdaki kürler uygulandı:

- 7 gün hava kürü
- 7 gün su kürü
- 28 gün hava kürü
- 28 gün su kürü

Kür sonrası numunelere aşağıdaki deney ve analizler uygulandı:

- Basınç deneyi (TS EN 12390-3)
- Eğilme deneyi (TS EN 12390-5)
- Böhme aşınma deneyi (TS 2824 EN 1338)
- Donma-Çözülme deneyi (TS 2824 EN 1338)
- Yangın deneyi (UL94, 2000/147/EC, TS EN 2/A1)
- Ultrasonik darbe hızı (Ultrasonic pulse velocity-UPV) deneyi (TS EN 12504-4)
- Yapışma dayanım deneyi (TS EN 1542)
- SEM-EDX Analizi
- XRD Analizi
- FT-IR Analizi

Tez çalışması sonrası ayrıca yeni oluşturulan ürünün maliyet hesaplamaları da yapılarak asfalt ve beton yol kaplamalarla karşılaştırıldı. Şartname limitlerine göre, beton yol kaplamalarının minimum basınç dayanımının 28 MPa, minimum eğilme dayanımının 4,5 MPa, minimum donma-çözülme kütle kaybı değerinin $\leq 18 \text{ kg/m}^2$ ve minimum böhme aşınma değerinin $\leq 1 \text{ cm}^3/50 \text{ cm}^2$ olması gerekmektedir (TS 2824 EN 1338, 2005; Tunç, 2007). Bu şartname limitlerine göre sonuçlar değerlendirilerek Çizelge 5.1 oluşturuldu.

Çizelge 5.1. Termoset beton deney sonuçları

Basınç Dayanımı (MPa)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Donma-Çözülme Kütle Kaybı (kg/m²)	Böhme Aşınma Dayanımı (cm³/50 cm²)
41,22	25,32	0,77	0,99

- Termoset beton kaplama deney (Çizelge 5.1) sonuçları yorumlandığında;
 - ✓ Basınç dayanımı 41,22 MPa > 28 MPa (Minimum şartname limiti)
 - ✓ Eğilme dayanımı 25,32 MPa > 4,5 MPa (Minimum şartname limiti)
 - ✓ Donma-çözülme kütle kaybı 0,77 kg/m² ≤ 1,0 kg/m² (Minimum şartname limiti)
 - ✓ Böhme aşınma değeri 0,99 cm³/50 cm² ≤ 18 cm³/50 cm² (Minimum şartname limiti) olarak bulundu ve standart değerleri karşıladığından yol kaplaması olarak kullanılabileceği deneysel olarak kanıtlandı.
- Termoset beton kaplamanın yangın deney sonuçlarına göre;

UL 94 yangın deneyinde, numune test alevine maruz bırakıldı. Numune 30 saniye sonra yanmaya başladı ve yandıktan 17 saniye sonra kendiliğinden söndü. Deney süresince numune yanmadan dolayı herhangi bir damlama görülmedi. Bu sonuç itibarıyla, termoset beton kaplamanın UL 94-5VA ile birlikte UL 94-5VB'yi de karşıladığı ortaya çıkmıştır. Bu sonuçlara göre, termoset beton kaplamanın yangın direncinin yüksek olduğu söylenebilir.

Tez çalışmasında oluşturulan termoset beton kaplama bağlayıcısı poliüretan olup plastik bir polimerdir. Bu nedenle yangın sınıfı TS EN 2/A1 (2013)' e göre A sınıfı yangına girmektedir.

Numune sınıflandırması yapılırken; numune deformasyon görülmemesi, deney sırasında duman gazının sınırlı miktarda olması ve deney sırasında numune alev

damlacıklarının olmaması gibi özellikler göz önüne alındı. Sonuç olarak 2000/147/EC'ye göre, tez çalışmasından elde edilen termoset beton kaplamanın A2-s2,d0 sınıfında olduğu söylenebilir.

- Yapışma dayanım deney sonuçları yorumlandığında;

Çizelge 4.17'de görüldüğü gibi, beton yol üzerine termoset beton kaplama uygulandığında, iki tabaka arasındaki yapışma dayanımının 3,95 MPa olduğu, dolayısıyla yüksek yapışma dayanımına sahip olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.18'de görüldüğü gibi termoset beton yol üzerine termoset beton kaplama uygulandığında, iki tabaka arasındaki yapışma dayanımının 4,63 MPa olduğu, dolayısıyla yüksek yapışma dayanımına sahip olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.19'da görüldüğü şekilde asfalt kaplama üzerine termoset beton kaplama uygulandığında, iki tabaka arasındaki yapışma dayanımının 0,86 MPa olduğu, dolayısıyla yapışma dayanımının beton kaplama ve termoset kaplamalara nazaran daha düşük olduğu söylenebilir. Bunun sebebinin kullanılmış asfalt numunelerinin üzerindeki zamanla birikmiş motor yağlarından kaynaklandığı düşünülmektedir.

- Ultrasonik Darbe Hızı (UPV) deneyi yorumlandığında;

Ultrasonik Darbe Hızı (UPV) ölçümü, iki farklı malzemenin boşluk yapısının ve doğal mukavemet özelliklerinin karşılaştırmalı analizini kolaylaştırabilecek önemli bir göstergedir. Bu bağlamda, kaydedilen daha yüksek bir UPV değerinin, malzeme içindeki daha düşük bir boşluk oranıyla ilişkili olduğunu ve daha kompakt bir içyapıya işaret etmektedir. Ayrıca, UPV değerindeki bir artışın, söz konusu malzemenin basınç dayanımındaki belirgin bir artışla doğrudan ilişkili olduğunu bilinmektedir. Bu ilişki, UPV değerleri ile boşluk oranı arasında ters bir ilişkinin varlığını ifade ederken, aynı zamanda UPV ile malzemenin gösterdiği basınç dayanımı arasında doğrudan doğrusal bir ilişki olduğunu göstermektedir. Bu tez çalışması kapsamında elde edilen veriler, ifade edilen bu sonuçları doğrulamaktadır.

- Diğer sonuçlar açısından değerlendirildiğinde;

Deprem, sel gibi doğal afetler, savaş ve benzeri saldırılar sonucunda bir çok ulaşım yapısı yıkılmakta veya ağır hasar almaktadır. Yıkılan veya ağır hasar gören bu yapıların en kısa sürede yeniden inşa edilerek hizmete sunulması gerekmektedir. Son yaşanan depremler sonrası deprem bölgesindeki bazı karayolları yıkılmış veya ağır hasar alarak kullanılamayacak duruma gelmiştir. Deprem sonrası karayollarının ağır hasar görerek hizmet dışı kalması sonucu, ulaşım problemleri baş göstermiştir. Bu yolların yıkılması veya ağır hasar görmesi sonucu afet sonrası deprem bölgelerine ulaşımlarda

sorunlarla karşı karşıya kalınmıştır. Yolların tamamen yıkılması veya ağır hasar alması sonucu ambulans ve sağlık hizmetlerinde sıkıntıların ortaya çıkabileceği de göz önünde bulundurulmalıdır. Bir yaralının karayolu ambulansı ile en kısa zamanda sağlık merkezine ulaştırılabilmesi için yıkılan veya ağır hasar gören yolun en kısa sürede hizmete sunulması gerekmektedir. Göçük altından can kurtarma faaliyetleri ve yaralıların karayolu ambulansı ile hastaneye yetiştirilmesinde hızlı ulaşım hayati bir öneme sahiptir. Bir deprem can kurtarma ekibinin olay yerine karayoluyla 1 saatte ulaşmasıyla 24 saatte ulaşması arasında çok büyük bir farkın olduğu açıktır. Bunun yanında bir yaralının da aynı şekilde en kısa zamanda hastaneye ulaştırılması hayati öneme sahiptir. Her ne kadar termoset beton yol kaplama birim fiyatı yüksek görünse de, deprem, terör saldırıları ve benzeri durumlarda, yolun acilen ulaşım açılması gerektiği durumlarda kullanılabilir. Deprem sonrası yıkılan veya ağır hasar gören karayolunun yeniden inşası için şu anda geleneksel olarak bitüm veya çimento bağlayıcılı yol kaplamaları kullanılmaktadır. Her iki bağlayıcı ile yapılan yol kaplamaları 3–24 saat arası trafiğe açılmaktadır. Bu tez çalışmasında poliüretan reçine bağlayıcısı ve agregası kullanarak yeni bir yol kaplama inşası yapılmıştır. Termoset beton yol kaplaması 3 dakika içerisinde kür olmakta ve 15 dakika sonra hizmete açılabilir. Çalışmanın diğer bir önemi ise, yol kaplama inşasında, kaplama üretimi için karışımda su kullanılmamasıdır. Çimento bağlayıcılı beton yollarda karışımda su kullanılmaktadır. Günümüzde iklimsel değişimlerden dolayı kuraklık sorununun ortaya çıktığı ve su kaynaklarının hızla tükendiği bilinmektedir. Beton üretimlerinde önemli miktarlarda su kullanılmakta ve bu durum su kaynaklarının daha da azalmasına neden olmaktadır. Bu çalışmada oluşturulan poliüretan reçine bağlayıcılı termoset beton yol kaplamasında, bağlayıcı olarak çimento veya bitüm içermeyen, karışımında su bulunmayan yeni bir kaplama türü ortaya çıkarılmıştır.

Bu çalışmada agregası olarak kuvars agregası kullanılmıştır. Farklı tipte agregalar kullanılarak yeni tip termoset beton kaplamalar oluşturulabilir. Çalışmanın tüm aşamalarında herhangi bir çelik lif kullanılmamıştır. İçerisine çelik lifler katılarak çalışma genişletilebilir. Poliüretan reçine oranları değiştirilerek esnek termoset beton kaplamaların da üretilmesi mümkündür. Agregası dane çapları değiştirilerek çalışma genişletilebilir.

KAYNAKLAR

- Akgün, H. (2008). Poliüretan-Karbon fiber kompozitlerin hazırlanması ve karakterizasyonu. Master's thesis, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*. AASHTO, Washington, D.C.
- Atiqah, A., T. Mastura, M., A. Ahmed Ali, B., Jawaid, M., & M. Sapuan, S. (2017). A review on polyurethane and its polymer composites. *Current Organic Synthesis*, 14(2), 233–248.
- Bakış, A. (2015). Rijit yol üstyapı inşasında reaktif pudra betonun (RPB) kullanılabilirliğinin araştırılması.
- Bakış, A., & Hattatoğlu, F. (2016). Asfalt yol kaplaması ile sanayi atık lifli reaktif pudra beton yol kaplamasının maliyet karşılaştırması. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 7(3), 421–432.
- Bakış, A., Hattatoğlu, F., & Bayrak, O. Ü. (2017). Reaktif Pudra Beton ile İnşa Edilecek Rijit Yol Kaplamasının Maliyet Hesaplaması. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 7(1), 183–194.
- Chelmecki, J., Szeptyński, P., Jasińska, D., & Kwiecień, A. (2024). Analyzing the Vibration Response of Adhesively Bonded Composite Cantilevers. *Materials*, 18(1), 93.
- Chompoorat, T., Likitlersuang, S., Sitthiawiruth, S., Komolvilas, V., Jamsawang, P., & Jongpradist, P., (2021). Mechanical properties and microstructures of stabilised dredged expansive soil from coal mine. *Geomechanics and Engineering*, 25(2), 143–157.
- Choudhary, R., Gupta, R., & Nagar, R. (2020). Impact on fresh, mechanical, and microstructural properties of high strength self-compacting concrete by marble cutting slurry waste, fly ash, and silica fume. *Construction and Building Materials*, 239, 117888.
- Commission Decision. (2000). 2000/147/EC, OJEU, L 50, p.23–26.
- Çağdaş, İ.U. & Yıldırım, Ö., (2020). Cam Elyaf Takviyeli poliüretan dış yüzölü sandviç kirişlerin eğilme rijitliklerinin konsol kiriş titreşim deneyi ile belirlenmesi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(3), 273–279.
- Demirel, F., & Altıntaş, S. (2010). Çatı ve çatı kaplamalarının dış yangın performanslarının Avrupa Birliği direktiflerine göre sınıflandırılması ve konunun Türkiye-Avrupa genelinde irdelenmesi. *Politeknik Dergisi*, 13(1), 65–70.

- Ding, H., Sun, Q., Wang, Y., Jia, D., Li, C., Ji, C., & Feng, Y. (2021). Flexural behavior of polyurethane concrete reinforced by carbon fiber grid. *Materials*, 14(18), 5421.
- Drits, V. A., Zviagina, B. B., Sakharov, B. A., Dorzhieva, O. V., & Savichev, A. T. (2021). New insight into the relationships between structural and FTIR spectroscopic features of kaolinites. *Clays and Clay Minerals*, 69(3), 366–388.
- Du Plessis, P. I., Gazley, M. F., Tay, S. L., Trunfull, E. F., Knorsch, M., Branch, T., & Fourie, L. F. (2021). Quantification of kaolinite and halloysite using machine learning from FTIR, XRF, and brightness data. *Minerals*, 11(12), 1350.
- Edis, E. (2007). Asfalt ve beton kaplamalı yolların maliyet yönünden karşılaştırılması (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- EN, T. (2001). 1542. *Products and systems for the protection and repair of concrete structures- Test methods- Measurement of bond strength by pull-off*
- EN, T. 2/A1. (2013). Yangınların sınıfları. *Türk Standartları Enstitüsü*.
- EN, T. (2021). 12504-4. *Testing concrete in structures- Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity*.
- Engels, H.W., Pirkel, H.G., Albers, R., Albach, R.W., Krause, J., Hoffmann, A., Casselmann, H., & Dormish, J. (2013). Polyurethanes: Versatile Materials and Sustainable Problem Solvers for Today's Challenges. *Angewandte Chemie International Edition*, 52(36), 9422–9441.
- Garbowski, T., Pawlak, T. G., & Szymczak-Graczyk, A. (2024). Efficient Load-Bearing Capacity Assessment of a Degraded Concrete Manhole Using Sectional Homogenization. *Materials*, 17(23), 5883.
- Gold, C. (2006). UL-94-test for flammability of plastic materials for parts in devices and appliances. *Washington: Tech notes*.
- Guyett, P. C., Chew, D., Azevedo, V., Blennerhassett, L. C., Rosca, C., & Tomlinson, E. (2024). Optimizing SEM-EDX for fast, high-quality and non-destructive elemental analysis of glass. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 39(10), 2565–2579.
- Güngör, A. G., & Sağlık, A. (2008). Karayolları esnek üst yapılar projelendirme rehberi. *Karayolları Genel Müdürlüğü, Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara*, 7–9.
- Han, Y., Meng, X., Feng, F., Song, X., Huang, F., & Wen, W. (2023). Study on Temperature-Dependent Uniaxial Tensile Tests and Constitutive Relationship of Modified Polyurethane Concrete. *Materials*, 16(7), 2653.
- Hassan, A., Rashid, Y., Mourad, A. H. I., Ismail, N., & Laghari, M. S. (2019). Thermal and structural characterization of geopolymer-coated polyurethane foam-phase change material capsules/geopolymer concrete composites. *Materials*, 12(5), 796.

- Hodul, J., Mészárosóvá, L., & Drochytka, R. (2022). New chemically resistant coating systems with progressive incorporation of hazardous waste in polyurethane and epoxy matrices. *Materials*, 15(9), 3235.
- <https://tr.wikipedia.org/wiki/Poli%C3%BCretan> [Eriřim Tarihi: 01 Temmuz 2023].
- https://www.alibaba.com/product-detail/Low-price-Polyol-isocyanate-PPG-3000_1600899979278.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.4cdc13a0cve6Hg [Eriřim Tarihi: 27 Ocak 2025].
- <http://tr.trakyayangin.com/guncel-bilgiler/yangin-siniflarina-gore-yanma-karakteristikleri/> [Eriřim Tarihi: 03 řubat 2025].
- Huang, S. L., Chao, M. S., Ruaan, R. C., & Lai, J. Y. (2000). Microphase separated structure and protein adsorption of polyurethanes with butadiene soft segment. *European Polymer Journal*, 36(2), 285–294.
- Jia, Z., Jia, D., Sun, Q., Wang, Y., & Ding, H. (2021). Preparation and mechanical-fatigue properties of elastic polyurethane concrete composites. *Materials*, 14(14), 3839.
- Jofré, C., Romero, J., & Rueda, R. (2010). *Pavimentos de hormigón en túneles: su influencia en la seguridad frente al juego*. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones.
- Jongvivatsakul, P., Janprasit, K., Nuaklong, P., Pungrasmi, W., & Likitlersuang, S., (2019). Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method. *Constr Build Mater*, 212, 737–744. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.035.
- Kaczmarek, K., Leniart, A., Lapinska, B., Skrzypek, S., & Lukomska-Szymanska, M. (2021). Selected spectroscopic techniques for surface analysis of dental materials: A narrative review. *Materials*, 14(10), 2624.
- Karaçoban, E.D., (2023). UV ile kürlenebilen lineer ve dallanmış üretan akrilat reçinelerin sentezi ve karakterizasyonu (Master's thesis, Bilecik şeyh Edebali Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
- Kılıç, A. (2017). Plastiklerin yangın güvenliği. *TÜYAK Yangın Mühendisliği Dergisi*, 3, 38–43.
- Kloprogge, J., & Kloprogge, J. (2019). Thermal, Mechanical and Chemical Treatments of the Kaolin Minerals. *Spectroscopic methods in the study of kaolin minerals and their modifications*, 161–241.
- Krol, P. (2007). Synthesis methods, chemical structures and phase structures of linear polyurethanes. Properties and applications of linear polyurethanes in polyurethane elastomers, copolymers and ionomers. *Progress in materials science*, 52(6), 915-1015.

- Kwakye-Awuah, B., Abavare, E. K. K., Sefa-Ntiri, B., Nkrumah, I., Von-Kiti, E., & Williams, C. (2021). Synthesis and characterization of geopolymer-zeolites from Ghanaian Kaolin samples by variation of two synthesis parameters. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1–13.
- Leng, C., Lu, G., Gao, J., Liu, P., Xie, X., & Wang, D. (2019). Sustainable green pavement using bio-based polyurethane binder in tunnel. *Materials*, 12(12), 1990.
- Li, X., Li, J., Wang, J., Yuan, J., Jiang, F., Yu, X., & Xiao, F. (2021). Recent applications and developments of Polyurethane materials in pavement engineering. *Construction and Building Materials*, 304, 124639.
- Lyon, R. E., & Janssens, M. L. (2005). *Polymer flammability* (No. DOT/FAA/AR-05/14). United States. Federal Aviation Administration. Office of Aviation Research.
- Malathy, R., Shanmugam, R., Chung, I.-M., Kim, S.-H., & Prabakaran, M. (2022). Mechanical and microstructural properties of composite mortars with lime, silica fume and rice husk ash. *Processes*, 10(7), 1424.
- Martha, R., George, B., Gérardin-Charbonnier, C., Fredon, E., Rahayu, I. S., Darmawan, W., & Gérardin, P. (2024). Surface Characteristics and Artificial Weathering Resistance of Oil-Based Coatings on the Chemically and Thermally Modified Short-Rotation Teak Wood. *Materials*, 17(15), 3881.
- Meggabi, T., Hareru, W. K., & Mulugeta, D., (2022). Prediction of compressive strength of normal concrete with partial replacement of sand by waste glass using fuzzy model. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 13(2), 135–146. doi:10.30880/ijscet.2022.13.03.013.
- Noumowe, A. (2003). Characterisation of asphalt exposed to high temperature: Application to fire case of asphalt pavement. *Cergy-Pontoise University (English version)*.
- Pattanayak, A., & Jana, S. C. (2005). Thermoplastic polyurethane nanocomposites of reactive silicate clays: effects of soft segments on properties. *Polymer*, 46(14), 5183–5193.
- Randall, David & Lee Steve (2002), *The Polyurethanes Book*, Wiley, ISBN 978-0-470-85041-1, New York, NY, USA, 113–126.
- Reis, E. F. D., Campos, F. S., Lage, A. P., Leite, R. C., Heneine, L. G., Vasconcelos, W. L., ... & Mansur, H. S. (2006). Synthesis and characterization of poly (vinyl alcohol) hydrogels and hybrids for rMPB70 protein adsorption. *Materials Research*, 9, 185–191.
- Saikia, B. J., Parthasarathy, G., & Sarmah, N. C. (2008). Fourier transform infrared spectroscopic estimation of crystallinity in SiO₂ based rocks. *Bulletin of Materials Science*, 31, 775–779.

- Saleh, S., Yunus, N. Z. M., Ahmad, K., & Ali, N. (2019). Improving the strength of weak soil using polyurethane grouts: A review. *Construction and Building Materials*, 202, 738–752.
- Schaaf, B., Abeln, B., Feldmann, M., Stammen, E., & Dilger, K. (2024). Full-Locked Coil Ropes with HDPE Sheath: Studies of Mechanical Behavior of HDPE Under Accelerated Aging. *Materials*, 18(1), 106.
- Szycher, M. (2012), Structure-property relations in polyurethanes, Szycher's Handbook of Polyurethanes, 2nd ed.; CRC Press, Boca Raton, FL, USA, 37–86.
- TS 2824 EN 1338, (2005). Concrete Paving Blocks-Requirements and Test Methods, TSE, Ankara, Turkey, 21–27.
- TS EN 12390-3, (2010). Testing Hardened Concrete-Part 3: Compressive Strength of Test Specimens, TSE, Ankara, Turkey, 7–9.
- TS EN 12390–5, (2010). Testing hardened concrete-Part 5: Flexural strength of test specimens, TSE, Ankara, Turkey, 12–17.
- Tunç, A. (2007). Yol Malzemeleri ve Uygulamaları, 2. Baskı, Nobel Yayın Dağıtım, 361–362.
- Vogel, C., Mueller, A., Lehmann, D., & Taeger, F. (2012). Characterization of the burning behaviour of plastics by a new method. *Open Journal of Polymer Chemistry*, 2(02), 86–90.
- Volkov, D. S., Rogova, O. B., & Proskurnin, M. A. (2021). Organic matter and mineral composition of silicate soils: FTIR comparison study by photoacoustic, diffuse reflectance, and attenuated total reflection modalities. *Agronomy*, 11(9), 1879.
- Xu, L., Li, X., Jiang, F., Yu, X., Wang, J., & Xiao, F. (2022). Thermosetting characteristics and performances of polyurethane material on airport thin-overlay. *Construction and Building Materials*, 344, 128252.
- Zebari, Z., Bedirhanoğlu, İ., & Aydın, E. (2016). Beton basınç dayanımının ultrasonik ses dalgası yayılma hızı ile tahmin edilmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(1), 43–52.
- Zhang, L., Huang, C., Li, Z., Wang, A., Gao, M., Gao, Y., & Wang, X. (2024). Experimental Study on Water-Plugging Performance of Grouted Concrete Crack. *Materials*, 17(7), 1568.
- Zhang, X., Hou, F., Du, H., Yan, L., Guo, A., Ma, X., & Liu, J. (2024). Preparation of ceramic fiber threads with enhanced abrasion resistance performance. *Materials*, 17(3), 599.
- Zhu, J., & Wang, J.-P. (2024). Virtual XRD Method in Molecular Dynamics Simulation and a Case Study for Fe₁₆N₂ and Fe₈N Thin Films. *TMS Annual Meeting & Exhibition*, 1693–1704.

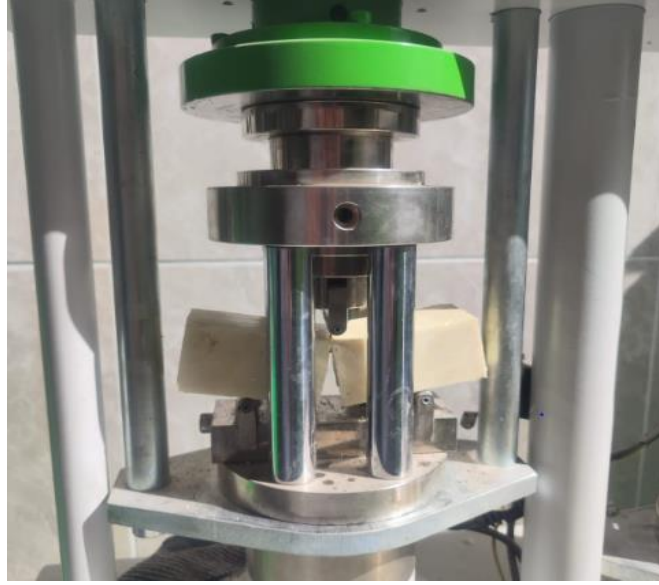
EKLER



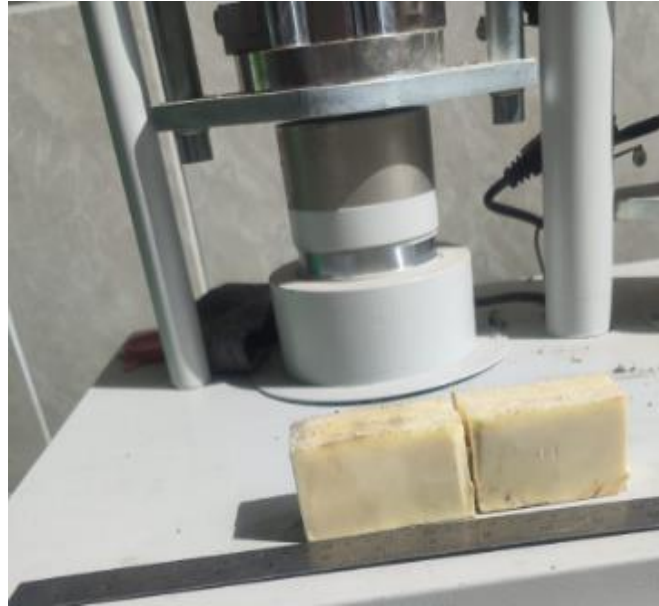
Şekil 0.1. Poliüretan bileşeninden polyol görünümü



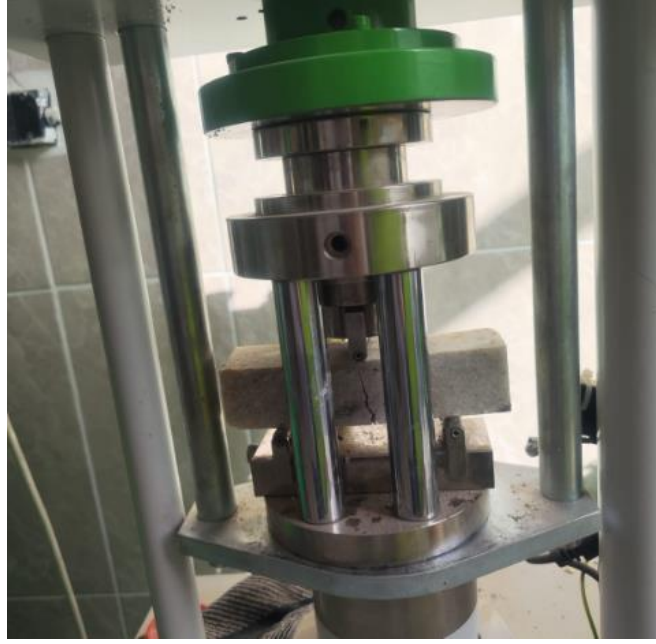
Şekil 0.2. Poliüretan bileşeninden izosiyanat görünümü



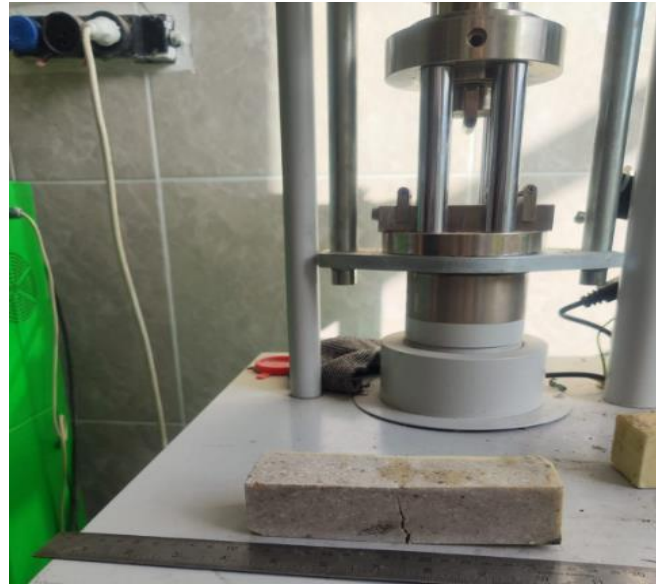
Şekil 0.3. Agregasız şahit termoset betonun eğilme deneyi kırılma görünümü



Şekil 0.4. Agregasız şahit termoset betonun eğilme deneyi kırılma sonrası görünümü



Şekil 0.5. Agregalı ideal termoset betonun eğilme deneyi kırılma görünümü



Şekil 0.6. Agregalı ideal termoset betonun eğilme deneyi kırılma sonrası görünümü



Şekil 0.7. Termoset beton basınç deneyi numuneleri



Şekil 0.8. Şahit termoset beton numunesinin basınç deneyine alınması



Şekil 0.9. İdeal termoset beton numunesinin basınç deneyine alınması



Şekil 0.10. Böhme aşınma deneyi öncesi numune görünümü



Şekil 0.11. Böhme aşınma deney görünümü



Şekil 0.12. Yapışma dayanım deneyi öncesi görünüm



Şekil 0.13. Normal beton üzeri yapışma deneyi öncesi üst katmanın teraziye alınması



Şekil 0.14. Termoset beton üzeri yapışma deneyi öncesi üst katmanın teraziye alınması



Şekil 0.15. Termoset beton üzeri termoset beton yapışma deneyi uygulaması



Şekil 0.16. Normal dayanımlı beton üzeri termoset beton yapışma deneyi uygulaması



Şekil 0.17. UPV deneyinden bir görünüm



Şekil 0.18. Numune UPV deney görünümü