



**KENEVİR TOHUMU YAĞI VE ATIK TRAFO YAĞI
KULLANILARAK GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ
ASFALTLARIN KARIŞIM ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Merve Nur KURT

Danışman: Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK
Yüksek Lisans Tezi
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı
2024

(Her hakkı saklıdır.)

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

**KENEVİR TOHUMU YAĞI VE ATIK TRAFO YAĞI KULLANILARAK GERİ
DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ASFALTların KARIŞIM ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

(Investigation of Mixture Properties of Recycled Asphalt Using Hemp Seed Oil and Waste
Transformer Oil)

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Merve Nur KURT

Danışman: Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK

Erzurum
Nisan, 2024

KABUL VE ONAY TUTANAĞI

Merve Nur KURT tarafından hazırlanan “Kenevir Tohumu Yağı ve Atık Trafo Yağı Kullanılarak Geri Dönüştürülmüş Asfaltların Karışım Özelliklerinin İncelemesi” başlıklı çalışması 22/04/2024 tarihinde yapılan tez savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ulaştırma Bilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı:	Halim Ferit BAYATA <i>Erzincan Binali Yıldırım Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Danışman:	Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır
Jüri Üyesi:	Doç. Dr. Ahmet ATALAY <i>Atatürk Üniversitesi</i>	Aslı ıslak imzalıdır

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

Prof. Dr. Saltuk Buğrahan CEYHUN
Enstitü Müdürü

Bu çalışma BAP projeleri kapsamında desteklenmiştir.
Proje NO: FYL-2022-10709

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

ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU

Yüksek Lisans Tezi olarak Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK danışmanlığında sunulan “Kenevir Tohumu Yağı ve Atık Trafo Yağı Kullanılarak Geri Dönüştürülmüş Asfaltların Karışım Özelliklerinin İncelemesi” başlıklı çalışmanın tarafımızdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını, yararlanılan eserlerin kaynakçada gösterildiğini, Fen Bilimleri Enstitüsü tarafından belirlenmiş olan Turnitin Programı benzerlik oranlarının aşılmadığını ve aşağıdaki oranlarda olduğunu beyan ederiz.

Tez Bölümleri	Tezin Benzerlik Oranı (%)	Maksimum Oran (%)
Giriş	0	30
Kuramsal Temeller	13	30
Materyal ve Metot	23	35
Araştırma Bulguları ve Tartışma	15	20
Sonuçlar ve Öneriler	13	20
Tezin Geneli	21	25

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

Beyan edilen bilgilerin doğru olduğunu, aksi halde doğacak hukuki sorumlulukları kabul ve beyan ederiz.

Tez Yazarı (Öğrenci)	Tez Danışmanı
Merve Nur KURT	Doc. Dr. Osman Ünsal BAYRAK
22.4.2024	22.4.2024
İmza: Aslı ıslak imzalıdır	İmza: Aslı ıslak imzalıdır

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

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

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

TEŞEKKÜR

Bu çalışmamın tüm aşamalarında bilgi, birikim ve desteklerini esirgemeyen danışman hocam Sayın Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK’a,

Çalışmalarım için bana destek olan Atatürk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi (BAP) birimine (FYL-2022-10709),

Laboratuvar çalışmaları aşamasındaki desteklerinden ötürü Arş. Gör. Ahmet Oğuz DEMİRİZ’e, Arş. Gör.Ömer Faruk KELEŞ’e, Dr. Öğr. Üyesi Fatih İrfan BAŞ’a, Dr. Öğr. Üyesi Muhammet Ali ÇOLAK’a

Çalışmalarım boyunca hep yanımda olan, hayatımın hiçbir aşamasında benden maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve özellikle kıymetli annem Bedia KURT’a ve sevgili babam Bünyamin KURT’a teşekkürlerimi sunarım.

Merve Nur KURT

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KENEVİR TOHUMU YAĞI VE ATIK TRAFİ YAĞI KULLANILARAK GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ASFALTIN KARIŞIM ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Merve Nur KURT

Danışman: Doç. Dr. Osman Ünsal BAYRAK

Amaç: Çalışmanın amacı geri kazanılmış bitümün, bitkisel yağ olan kenevir tohumu yağı ve atık bir yağ olan atık trafo yağı ile gençleştirilmesi ve yeniden yol inşaatında kullanımının incelenmesidir. Bununla birlikte bitümü modifiye etmek için kullanılan parametrelerin taguchi yöntemi kullanılarak optimizasyonunu yapmaktır.

Yöntem: Çalışmada; 70/100 penetrasyonlu saf bitüme, %0 %20 %40 oranlarında Geri kazanılmış bitüm (RAP)ve gençleştirici olarak %0 %0,5 %1 oranlarında kenevir tohumu yağı ve atık trafo yağı katılarak performans özelliklerini değerlendirmek için penetrasyon, yumuşama noktası, Marshall stabilite deneyleri uygulanmıştır. Katkı malzemelerinin optimizasyonu için Taguchi metodu kullanılmış ve optimum değerler bulunmuştur.

Bulgular: RAP ve gençleştirici katılmamış saf bitümün penetrasyon değeri 76,63 elde edilmiştir. RAP ve kenevir tohumu yağı katıldığında ise sırasıyla 57,27 ve 43,07 değerleri elde edilmiştir. Buda kenevir tohumu yağının RAP katkısını yumuşatmakta bu oranlarda zorlandığını göstermektedir. Daha sonar RAP ve atık trafo yağının aynı anda katıldığı deneylerde sonuçlar 56,40 ve 67,90 olmaktadır. Bu durum bize atık trafo yağının, kenevir tohumu yağından daha güçlü gençleştirici etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Her iki yağında birlikte kullanıldığı deneyde ise penetrasyon değeri 84,0 gelmiştir. Buda her iki yağın birlikte kullanıldığında RAP üzerindeki etkisinin daha güçlü olduğunu göstermiştir

Sonuç: Geri kazanılmış bitüm katkısının, 70/100 penetrasyonlu bitümü sertleştirdiği fakat Kenevir tohumu yağı ve atık trafo yağının yumuşattığı gözlenmiştir. Aynı zamanda atık trafo yağı kenevir tohumu yağından daha güçlü yumuşatma özelliğine sahip olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Geri Kazanılmış Bitüm, Esnek Yol Üstyapısı, Kenevir Tohumu Yağı, Atık Trafo Yağı, Taguchi Metodu, Marshall

Nisan 2024, 71 sayfa

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF MIXTURE PROPERTIES OF RECYCLED ASPHALT USING HEMP SEED OIL AND WASTE TRANSFORMER OIL

Merve Nur KURT

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Osman Ünsal BAYRAK

Purpose: The main purpose of this study is to rejuvenate asphalt (RAP), which is a waste material, with hemp seed oil, which is a vegetable oil, and waste transformer oil, which is a waste oil, and to examine its reuse on roads. At the same time, it is to optimize the parameters used for bitumen modification by using the Taguchi method.

Method: In this study; Penetration, softening point and Marshall tests were applied to evaluate the performance properties by adding RAP at the rate of 0% 20% 40 to pure bitumen, and hemp seed oil and waste transformer oil at the rate of 0% 0.5% 1% as rejuvenators. Taguchi method was used to optimize additive materials and optimum values were found.

Findings: The penetration value of bitumen without RAP and rejuvenator was obtained as 76.63. When RAP and hemp seed oil were added, values of 57.27 and 43.07 were obtained, respectively. This shows that hemp seed oil has difficulty in softening the RAP contribution at these rates. Later, in the experiments in which RAP and waste transformer oil were included simultaneously, the results were 56.40 and 67.90. This shows us that waste transformer oil has a stronger rejuvenating effect than hemp seed oil. In the experiment where both oils were used together, the penetration value was measured at 84.0. This indicates that the combined use of both oils has a stronger effect on RAP.

Results: It was observed that RAP additive hardened the bitumen, but Hemp seed oil and waste transformer oil softened it. At the same time, waste transformer oil has a stronger softening property than hemp seed oil.

Keywords: Recycled Bitumen, Flexible Road Pavement, Hemp Seed Oil, Waste Transformer Oil, Taguchi Method, Marshall

April 2024, 71 pages

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY TUTANAĞI.....	i
ETİK BİLDİRİM VE İNTİHAL BEYAN FORMU	ii
TEŞEKKÜR	iii
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
KISALTMALAR DİZİNİ	xi
GİRİŞ.....	1
KURAMSAL TEMELLER.....	2
Bitümlü Bağlayıcılar	2
Asfalt	2
Katran.....	3
Bitümlü Esnek Üst Yapıların Tasarımı	4
Alttemel tabakası.....	5
Temel tabakası	5
Kaplama tabakası	5
Bitümlü karışımlardan beklenen özellikler	6
Stabilite (Dayanım)	6
Durabilite (Dayanıklılık)	7
Geçirimsizlik	7
İşlenebilirlik	7
Esneklik.....	8
Yorulma mukavemeti.....	8
Kayma direnci	8
Yol kaplamalarında oluşan bozulma ve bozulma türleri.....	9
Timsah sırtı (Yorulma) çatlaklar	9
Kenar çatlakları	10
Enine Çatlaklar.....	11
Boyuna çatlaklar.....	12
Blok (Harita) çatlaklar.....	12
Tekerlek izinde oturmalar	13

Ondüasyon	14
Çukurlar.....	15
Segregasyon, soyulma ve sökülmeler	15
Asfalt Kaplamalarının Geri Dönüşümü	16
Asfaltın geri dönüşüm yöntemleri.....	17
Soğuk düzeltme (Cold planing)	18
Sıcak geri dönüşüm (Hot recycling)	19
Sıcak yerinde geri dönüşüm (Hot in-place recycling).....	20
Soğuk geri dönüşüm (Cold in-place recycling)	21
Tam derinlikten geri kazanma (Full depth reclamation).....	23
Asfalt Geri Dönüşümüyle İlgili Yapılan Çalışmalar.....	25
MATERYAL VE METOT	28
Kullanılan Malzemeler.....	28
Yapılan Deneyler	31
Penetrasyon deneyi.....	31
Yumuşama noktası deneyi	31
Parlama noktası deneyi	32
Taguchi yöntemi.....	33
Marshall deneyi.....	34
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	41
Numunenin Hazırlanması	41
Penetrasyon Deneyi ve Sonuçları	41
Yumuşama Noktası Deneyi ve Sonuçları	43
Marshall Deneyi Sonuçları.....	45
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	52
KAYNAKÇA	55
ÖZGEÇMİŞ.....	58

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Asfalt Çimentolarının Sınıflandırılması	3
Tablo 2. Yolda Oluşan Bozulma Tipine Göre Seçilecek Düzeltme Metodu.....	18
Tablo 3. Agrega Fiziksel Özellikleri.....	28
Tablo 4. Agregaların Elek Analizi	28
Tablo 5. Trikloretilen Özellikleri.....	29
Tablo 6. Kenevir Tohumu Yağı Özellikleri.....	30
Tablo 7. Atık Trafo Yağı Özellikleri	30
Tablo 8. Marshall Stabilite Deneyi Kriterleri	40
Tablo 9. Optimum Bitüm Yüzdesi İçin Formül Tablosu.....	40
Tablo 10. Karışım Parametreleri.....	41
Tablo 11. Penetrasyon Deney Sonuçları ve S/N Değerleri.....	42
Tablo 12. Penetrasyon Ortalama S/N Etkileri.....	42
Tablo 13. Penetrasyon Performans Tahminleri	42
Tablo 14. Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları.....	43
Tablo 15. Yumuşama Noktası Ortalama S/N Etkileri	44
Tablo 16. Yumuşama Noktası Performans Tahminleri	44
Tablo 17. Marshall Stabilite Tablosu.....	46
Tablo 18. Optimum Bitüm Değeri Marshall Stabilite Tablosu	47
Tablo 19. Marshall Ortalama S/N Etkileri.....	50
Tablo 20. Marshall Performans Değerleri	50

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Bitümlerin sınıflandırılması	4
Şekil 2. Esnek üstyapı enkesiti	4
Şekil 3. Üstyapı kesitinde gerilme dağılımı	6
Şekil 4. Timsah sırtı (yorulma) çatlakları	10
Şekil 5. Kenar çatlağı	11
Şekil 6. Enine çatlaklar	12
Şekil 7. Boyuna çatlaklar	12
Şekil 8. Blok çatlakları	13
Şekil 9. Tekerlek izi oturma	13
Şekil 10. Tekerlek izi oturması yol örneği	14
Şekil 11. Ondülasyon yol örneği	15
Şekil 12. Çukur yol örneği	15
Şekil 13. Segregasyon soyulma sökülme yol örneği	16
Şekil 14. Soğuk Düzeltme işlemi sonrası yol yüzeyi	19
Şekil 15. Sıcak yerinde geri dönüşüm	21
Şekil 16. Yerinde sıcak geri dönüşüm uygulamalarından örnek	21
Şekil 17. Yerinde soğuk geri dönüşüm uygulaması	22
Şekil 18. Plentte soğuk karışım geri dönüşümü uygulamasının aşamaları	23
Şekil 19. Tam derinlikte geri kazanım işleminin uygulanması	23
Şekil 20. Soğuk Yerinde Geri Dönüşüm (CIR) ile Tam Derinlikli Geri Dönüşüm (FDR) yöntemlerinin grafik olarak karşılaştırması	24
Şekil 21. Atık asfalt betonu malzemesi ve geri kazanılmış bitüm	29
Şekil 22. Reflüks ekstraktör aleti	30
Şekil 23. Penetrasyon Deney Düzeneği	31
Şekil 24. Yumuşama noktası deney düzeneği	32
Şekil 25. Parlama noktası deney düzeneği	33
Şekil 26. Kalıplanmış numuneler	36
Şekil 27. Penetrasyon istatistikleri	43
Şekil 28. Yumuşama noktası istatistikleri	45
Şekil 29. Marshall numuneleri	45
Şekil 30. Dp - Bitüm% grafiği	48
Şekil 31. Stabilite- Bitüm% si grafiği	48
Şekil 32. Akma - Bitüm% grafiği	48

Şekil 33. ADB - Bitüm% grafiği	49
Şekil 34. Boşluk- Bitüm% grafiği	49
Şekil 35. VMA - Bitüm% grafiği	49
Şekil 36. Marshall istatistik grafiği	51



KISALTMALAR DİZİNİ

μ	: Performans değerinin genel ortalaması
e_i	: <i>i.</i> deneydeki rassal hata
M_1	: İlk numune ağırlılığı (gr)
M_2	: Deney sonrası numune ağırlılığı (gr)
n	: Bir deney kombinasyonunda yapılan tekrar sayısı
P_{25}	: Bitümün 25°C deki penetrasyon değeri
PI	: Pentrasyon indeksi
S/N	: Performans istatistiği (sinyal/gürültü oranı)
S_b	: Bitümün elastik rijitliği (MPa)
T_1	: Deney öncesi yumuşama noktası (°C)
T_1	: Deney sonrası yumuşama noktası (°C)
T_{RB}	: Yumuşama noktası (°C)
t_w	: Yükün etki süresi (s)
T_{YN}	: Yumuşama noktası
X_i	: Deneydeki parametre – seviye kombinasyonunun sabit etkisi
Y_i	: <i>i.</i> deneyin performans istatistiği

GİRİŞ

Ülkemizde ve dünyada nüfus hızla artmakta ve bu durum beraberinde hammaddeye olan ihtiyacı da artırmaktadır. Doğal kaynaklarımızın sınırlı olması, kullandığımız ürünlerin işleri bitince doğaya zararlı atık olmaları ve tüketim hızının artması geri dönüşüm ve atık madde kullanımının önemini artırmaktadır.

İnşaat sektörü sürekli gelişmekte olup, hammadde ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. 2021 verileri incelendiğinde inşaat sektörünün gayri safi milli hasıladaki payı 5,7 olup, inşaat sektöründe yapılacak geri dönüşüm faaliyetlerinin ülke ekonomisine fayda sağlayacağı da açıktır.

Karayolu inşaatı hammaddelerinden olan bitümün her geçen yıl maliyeti artmaktadır. Ayrıca ülkemizin karayolu ağıda her geçen yıl genişlemektedir. 2022 yılı verilerine göre ülkemizdeki yol ağı 68.526 km olup bu yol ağının 28.306 km si asfalt betonu yollardan oluşmaktadır. Buda toplam yol ağının %40 ına denk gelmektedir. (KGM,2022). Yol ağımızın %40 lık kısmını kapsayan ve bu çalışmada konusu olan esnek üst yapılar kullanım ömürlerini tamamladıktan sonra atık olmakta ve çevreye ciddi zararlar vermektedir. Çevreye verilen zararı en aza indirmek ve atık olarak gördüğümüz ömrünü tamamlamış yolların sahip olduğu potansiyeli değerlendirmek için atık asfaltların hammadde olarak kullanılması ekonomik ve çevresel açıdan faydalar sağlayacaktır.

Bu çalışmada geri kazanılmış bitüm, atık trafo yağı ve kenevir tohumu yağı ile gençleştirilmeye çalışılıp saf bitümle karıştırılmıştır. Elde edilen ürünün özelliklerini incelemek için penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası ve marshall stabilite deneyleri yapılmıştır.

Yapılan bu çalışmanın bitüm geri dönüşümüne dikkat çekeceği düşünülmüştür.

KURAMSAL TEMELLER

Bitümlü Bağlayıcılar

Bitüm ham petrolün doğada kendiliğinden çökmesiyle oluşan, petrol rafinerilerinde damıtma yoluyla elde edilen veya kömürün karbonizasyonu sonucu oluşan hidro karbon yapıda bir bağlayıcıdır. Siyah ve koyu kahve renkleri arasında değişir. Ortam sıcaklıklarında yüksek vizkozlu, katı veya yarı katı formlarda bulunur. (Annual Magazine, 2002)

Bitümlü bağlayıcılar temelde iki ana grupta incelenirler. Bunlar asfalt ve katrandır. Asfaltlarda kendi içinde doğal asfaltlar ve yapay olmak üzere iki grupta incelenir (Orhan,2015)

Asfalt

Asfaltın kelime anlamı ‘ kırılması güç’ demektir. Koyu renkli ve kuvvetli bağlayıcı özelliği bulunmaktadır. Kıvam olarak katı, yarı katı ve sıvı hallerde bulunabilen asfaltlar, kökenlerine göre doğal ve yapay asfaltlar olarak iki gruba ayrılır (Keçeciler vd,1988).

Doğal asfaltlar

Doğal asfaltlar tabiatta minerallerle karışık olarak bulunan doğal asfaltlar, bulundukları konuma göre göl ve kaya asfaltı olarak isim alırlar. Göl asfaltlarının en çok bilineni olan Trinidad göl asfaltının içerisinde % 35 bitüm bulunurken, kaya asfaltlarında bu oran genellikle %12 dir.(Keçeciler vd, 1988)

Rafineri asfaltlar (yapay)

Yapay dediğimiz asfaltlar ham petrolün damıtılmasıyla oluşurlar. Genel de üç gruba ayrılırlar;

Asfalt çimentosu(AC), ham petrolün damıtılması veya doğal asfaltın işlem görmesi sonucu oluşur. 10-300 arasında penetrasyon değerlerine göre sınıflanır. Asfalt çimentosu sıvı petrol asfaltı ve asfaltemülsiyonlarının ana maddesidir (Keçeciler vd, 1988).

Tablo 1. Asfalt Çimentolarının Sınıflandırılması

Penetrasyon sınıfı	Viskozite sınıflaması
40 – 50 Penetrasyon AC	AC-20
60 – 70 Penetrasyon AC	AC-40
85 – 100 Penetrasyon AC	AC-10
120 – 150 Penetrasyon AC	AC-5
200 – 300 Penetrasyon AC	AC-20,5

Sıvı petrol asfaltların da benzin, nafta, bakiye veya gaz yağı gibi yağlar ısıtılmış bitüm ile karıştırılır. Benzin veya nafta ile karıştırılmasıyla çabuk kür olan(RC), gaz yağı ile orta hızla kür olan (MC), bakiye yağ ile yavaş kür olan(SC)sıvı petrol asfaltları elde edilir.

Asfalt emülsiyonları; tam anlamıyla emülsiyon, karışmayan iki sıvının birbiri içerisinde dağılmasından meydana gelen, homojen görünümlü heterojen sistemdir.

Asfalt emülsiyonları, asfalt çimentosu küreciklerinin bir miktar emülgatör yardımıyla su içerisinde karıştırılmasıyla elde edilir. Bu mekanik bir işlem olup, emülgatör su ve asfaltın birbiri içerisinde karışabilmesi için kullanılır.

Asfalt emülsiyonları emülgatörün cinsine bağlı olarak iki gruba ayrılır:

1. Anyonik asfalt emülsiyonları
2. Katyonik asfalt emülsiyonları

Asfalt emülsiyonları agregata ile karıştırıldığında veya yol yüzeyine püskürtüldüğünde kesilirler, asfalt taneleri yüzeye yığılırken serbest kalan su buharlaşır. Asfalt emülsiyonları kesilme hızlarına göre üç gruba ayrılırlar.

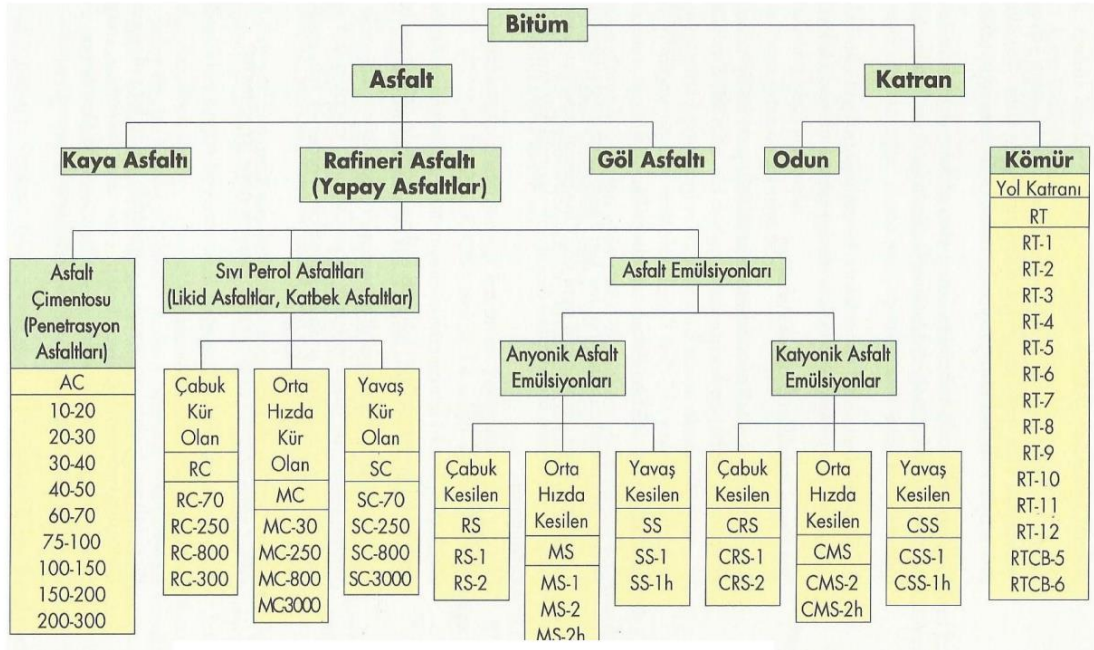
Çabuk kesilen asfalt emülsiyonları

Orta hızda kesilen asfalt emülsiyonları

Yavaş kesilen asfalt emülsiyonları

Katran

Odun, kömür veya bir takım organik maddelerin kapalı bir sistemde kuru damıtılması sonucu elde edilen bir yağ türüdür. Katran canlı sağlığını tehdit etmesi, içerisinde oransal olarak düşük miktarda bitüm bulundurması, sıcaklık direncinin düşük olması gibi sebeplerden yol yapımında doğrudan kullanılmaz. Bitüm ile oluşturduğu karışım yüzeysel kaplamalarda kullanılır. (Dhannoon,2017)



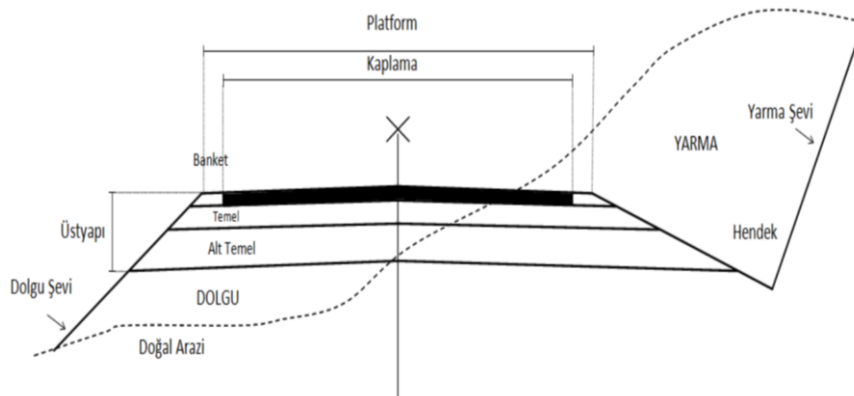
Şekil 1. Bitümlerin sınıflandırılması (İlcalı vd. 2001)

Bitümlü Esnek Üst Yapıların Tasarımı

Karayolu inşasında çokça tercih edilen esnek üst yapılar, farklı tabakalardan oluşmaktadır. Bu tabakalar tesviye yüzeyinden yukarıya doğru sırasıyla; alttemel, temel ve bitümlü kaplama tabakalarıdır. Tabakalı şekilde inşa edilmesinin amacı üzerlerine gelen trafik yüklerini güvenli ve ekonomik şekilde taban zeminine iletebilmektir.

Esnek üst yapıların imalatının nispeten kolay olması ve hizmete kısa sürede açılması tercih edilmelerinde önemli etkenlerdendir. Bitümün pahalı bir yapı malzemesi olması sebebiyle katmanların kalınlıkları ve malzeme seçimi hesaplanırken; çevre ve iklim şartları, üzerine gelecek trafik yükü, yolun kullanılma sıklığı gibi etkenleri dikkatte almak gerekir.

Şekilde tipik bir karayolu en kesiti verilmiştir.



Şekil 2. Esnek üstyapı enkesiti (Ünlü, 2019)

Alttemel tabakası

Taban zemini ve tesviye yüzeyi arasında serilen ve belirli bir gradasyona sahip olan tabakaya alttemel tabakası denir. İçeriği incesi az kum, taş kırığı, moloz, yüksek fırın cürufu, çakıl gibi daneli malzemelerden oluşur. Amacı üst tabakalardan gelen yükü taban zeminine iletmek olan alttemel tabakası, su ve don etkilerine karşı yol yapısını korur. (Varol, 2019)

Temel tabakası

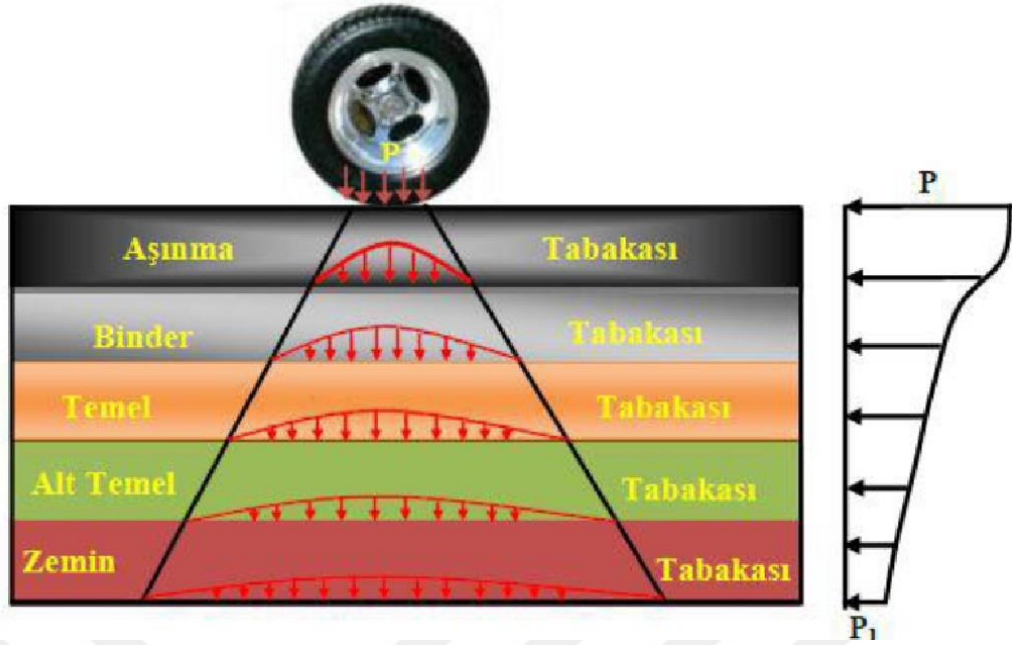
Alttemel ve kaplama tabakaları arasına serilen, granüllü malzeme ve az miktar bağlayıcı malzemeden oluşan tabakaya temel tabakası denir. İçeriğinde bulunan granüllü malzemenin fiziksel özellikleri alttemel tabakasına göre daha kaliteli olan doğal çakıl, kırma taş veya doğal kum gibi malzemelerdir. Başlıca görevi üst tabakadan gelen yükü alttemel tabakasıyla birlikte zemine yaymak ve beraberinde trafiğin darbe tesirini en aza indirmek olan bu tabaka, yol gövdesi için özel bir öneme sahiptir.(Yayla, 2014)

Kaplama tabakası

Kaplama tabakası trafik yüklerine maruz kalan ilk tabakadır. Gelen trafik yükünü alt tabakalara düzenli şekilde dağıtmalıdır. Bu yüzden kaplama tabakasında çekme ve basınç gerilmelerinin en fazla görüldüğü katmandır. Yoldaki güvenliği sağlamak için yeterli pürüzlülüğe sahip olmalı, çevre ve iklim değişikliklerine dirençli olmalıdır. Bu sebeplerden kaplama tabakası daha elastik ve daha stabil olmalıdır. Esas görevlerinden biri düzgün bir yuvarlanma yüzeyi oluşmak olan bu tabaka genelde iki tabaka halinde inşa olunur; alt tabaka binder tabakası en üst tabaka aşınma tabakasıdır.

Binder tabakası, aşınma tabakasından gelen yükü güvenli şekilde temel tabakasına iletmek ve aşınma tabakasına oturabileceği düzgün bir yüzey oluşturmak amacıyla inşa edilir.

Aşınma tabakası, en üstte bulunur. Bu tabaka trafik yüklerinden oluşan kuvvetlere ve iklim şartlarının zorlayıcı etkilerine karşı koyar. Başlıca amacı; suya karşı geçirimsiz bir yüzey oluşturup alt katmanları suyun zararlı etkilerinden korumak, yeterli pürüzlülüğü sağlayarak sürüş güvenliği ve konforunu oluşturmaktır.



Şekil 3. Üstyapı kesitinde gerilme dağılımı (Çetin, 2007)

Bitümlü karışımlardan beklenen özellikler

Hazır hale geldikten sonra yol üzerine serilen bitümlü karışımdan belirli özellikleri göstermesi beklenir. Başlıklar halinde (Umar ve Ağar 1985).

- Stabilite(Dayanım)
- Durabilite(Dayanıklılık)
- Geçirimsizlik
- İşlenebilirlik
- Esneklik
- Yorulma mukavemeti
- Kayma direnci

Stabilite (Dayanım)

Trafik sirkülasyonu esnasında bitümlü sıcak karışımlı kaplama yol üzerine yapılan basınç, sürtünme, statik ağırlıklara karşı gösterdiği dirence stabilite (dayanım) denir. Stabilitenin düşük ve yüksek olma durumlarında farklı olumsuzluklarla karşılaşılabilir.

Dengeli bir direnç çizelgesi için agreganın şeklinin, orantılı dağılımının, dayanımının, bağlayıcının kohezyon kuvvetinin, bitümün türü, miktarının, sıcaklık değerlerinin rolü vardır. Düşük stabilite değerlerinde yol üzerinde bozulmalar artar trafik altı olumsuz şekil ve kaymalara sebep olur. Teker izleri, sökülmeler, çökmeler görülür.(Kurtis, 2003) Olumsuz durumlarla sadece düşük stabilite değerlerinde değil aynı zamanda yüksek stabilite

değerlerinde de karşılaşılır. Esnekliğini kaybeden bitümlü sıcak karışım kaplamasından kaynaklı yüksek gerilimler görülür; buda çatlak oluşumuna etki eder.

Durabilite (Dayanıklılık)

Bitümlü sıcak karışımın zaman, çevre, yük etrafında gelişen olumsuz koşullara gösterdiği direnç durabilite olarak tanımlanır. Orijinal özelliklerinin zamana karşı tutarlı seyri verimli karışımı ortaya koyar. Agregalara yapılan basınç, yüksek sıcaklık, donma, çözülme, cilalanma sonucu durabilite yetersiz ise asfaltın yük taşıma nitelikleri azalır.

Bağlayıcı maddenin miktarı durabiliteyi etkiler. Bağlayıcının artışıyla dayanıklılık da doğrusal bir artış gösterir; çünkü bitüm film kalınlığı artışıyla geçirmezlik daha korunabilir olur. Suyun ve havanın asfaltla olan teması azaltılır. Belirli düzeyde film kalınlığı artıştan sonra yaşlanmada azalma seyri görülmez. Karışımın içerisine hava ve su girişi oluyor ve bundan kaynaklı karışım sertleşiyorsa aşınma meydana gelebilir. Bitüm film kalınlığı yeterli düzeyde değil ve bitüm ve agregaya uyumlu değil ise aynı durum gözlenir. (Şengöz ve Agar, 2005)

Agreganın ince ve kaba olma durumlarında durabilite etkisi azalmaktadır. Kaba agregalarda yeterli sarılma sağlanmamaktadır. Kohezyon kuvveti azaldığı için durabilite sorunu ortaya çıkar. İnce agregaya miktarı fazla olduğuna ise bağlayıcı emilim göstermektedir.

Geçirimsizlik

Bitümlü sıcak karışımın içerisine su ve hava geçişine engel olma direncine denir. Karışımın hava boşluklarının fazlalığı direnç için önemlidir. Geniş hava boşlukları, miktarı yüzeye yakınlık durumu su ve hava girişini etkiler. Hava ve su girişinin miktarı ise soyunma kuvvetini azaltır. Yaşlanmayı hızlandırır. (Tunç, 2004)

İşlenebilirlik

Bitümlü sıcak karışımı elde ederken, karışım aşamasında, deney aşamalarında, sıkıştırırken ve kullanım için serilirken sağladığı kolaylık seviyesine denir. İşlenebilirlik agreganın tüm fiziki yapısıyla (boyutu, şekli, yüzey yapısı, en büyük dane çapı) ilgilidir; fiziki yapısıyla birlikte agreganın cinsi, agreganın gradasyonu, bağlayıcı bitümün viskozitesi ve oranına da bağlıdır. Bitümlü karışımın niceliksel ve niteliksel özelliklerine uygulanan değişikliklerle işlenebilirlik yükseltilip, düşürülebilir. Yüzey yapısı keskin hatlı ve pürüzlü agregaya sahip karışımda dayanım artışı varken, işlenebilirlik azalmakta, yüzey yapısı daha yumuşak hatlı ve dokusu pürüzsüz ise dayanım azalır ve işlenebilirlik artar.

Esneklik

Kaplamanın temel, alt yapı ve taban zemininde ortaya çıkan deformasyonlara karşı uyum sağlayarak çatlama olmadan esnek kalmasını ifade eder. Bitümün viskozitesi, karışımındaki bileşenler, duktilitesi ve sıcaklığa duyarlılığı, aynı zamanda karışım içindeki mineral dolgu maddesinin oranına bağlıdır.

Tipik olarak, artan bitüm içeriği ve görece geniş boşluklu (gradasyonlu) agregalarla bir kaplama karışımının elastikliği sağlanabilir. Ancak, kaplamanın elastikliği arttıkça stabilitesinin azalabileceği, düşük elastikliğinde ise aşırı çatlaklara ve parçalanmalara yol açabileceği unutulmamalıdır.(Ertaş, 2019)

Yorulma mukavemeti

Bitümlü sıcak karışımın yorulma mukavemeti, tekrarlanan yükler altındaki kaplamanın eğilmeye karşı çatlama direncini gösterir. Elastik geri dönüş miktarı, oranı, yaşlanma direnci ve kaplama kalınlığıyla birlikte hava boşluğu miktarı, bitümün karakteristik özelliğine bağlı olarak farklılık göstermektedir.

Yorulma mukavemetini artışında kaplamanın uygun şekilde sıkıştırılması önemli; çünkü bitümlü kaplamanın yorulma mukavemetini artırmak için rijitliği de artış göstermelidir. Sıkıştırma eksikliği veya dizilim hataları nedeniyle kaplamaların yorulma süreleri azalabilir, özellikle de yüksek hava boşluğuna sahip olanlar. Yaşlanmadan da kaynaklı mukavemette düşüş olur. (Harold ve Paul, 1995).

Bitümlü Kaplama kalınlığı yeteri kadar olmadığında ve alt tabakalar da zayıf olursa, aşırı deformasyon kaplamanın altındaki yanal çekme gerilmelerine neden olarak büyük yük altında yorulma çatlakları oluşabilir. Sonuç olarak yorulma çatlaklarını engellemek için kalın ve güçlü destek sağlayan kaplamaları tercih etmek, aynı zamanda çekme mukavemeti yüksek malzemeleri seçmek önemlidir. Bu kontekste, yumuşak bitüm, sert bitüme göre daha üstün bir yorulma direncine sahiptir.

Kayma direnci

Tekerleklerin kaplamayla temas ettiği noktada ortaya çıkan kayma direnci, taşıtların farklı hava koşullarında güvenli bir şekilde durabilmesi ve hareket edebilmesi için gereken sürtünme kuvvetini ifade eder. Agreganın partikül dağılımı, yüzey yapısı, formu ve karışımın sıkıştırılabilirliği kayma direnci ile bağlantılıdır. Yeteri kadar bitüm içeriği ve pürüzlü yüzey dokusuna sahip agregalar, kayma mukavemetini artırmaya olumlu şekilde katkıda bulunan etkenlerdir.

Yol kaplamalarında oluşan bozulma ve bozulma türleri

Malzeme kalitesi olarak en iyi şekilde belirlenmiş, projesine uygun şekilde yapılmış yol dahi zaman içinde kullanımına bağlı olarak ve çevre şartları da göz önüne alındığında kullanım sürecinde bozulmaya başlar. Kullanılacak olan yolun faydalı şekilde ömrünün artırılması veya ekonomik ömrü de hesap edildiğinde o yoldan daha çok faydalanılması için kaplamanın ayrıntılı bakım, onarım hizmetlerinin yapılması şarttır. Yola yapılacak olan uygun ve doğru bir bakımla ve etkili bir drenajla yolun ömrü uzatılabilir.

Yol üstyapılarında meydana gelen yüzey bozukluklarının çeşitleri aşağıda verilmiştir.

- Timsah sırtı (Yorulma) çatlaklar
- Kenar çatlakları
- Enine çatlaklar
- Boyuna çatlaklar
- Blok (Harita) çatlaklar
- Tekerlek izinde oturmalar
- Ondülasyon
- Çukurlar
- Segregasyon, soyulma ve sökûlmeler

Timsah sırtı (Yorulma) çatlaklar

Timsah sırtı çatlaması, malzemenin tekrarlayan yüklemelere maruz kalarak meydana gelen yorgunluk çatlamasına timsah sırtı çatlaması denir ve malzemenin yüzeyinde timsah sırtına benzeyen desenler oluşturan çatlaklardır. Timsah sırtı çatlaklar tekrarlanan yükler doğrultusunda kaplamayı limit noktasına kadar gerdiğinde gerçekleşir. Timsah sırtı çatlamaya sebep olan etkenler şu şekildedir;

- Temel, alt temel, taban zeminin tabakasının iyi sıkıştırılmaması
- Zayıf drenaj sistemi ile taşıma gücünün azalması
- Aşırı trafik yükü doğrultusunda meydana gelen yorulma
- Kullanım şartlarına uygun olmayan malzeme seçimi ve yanlış yapım teknikleri
- Yapım esnasında havadaki sıcaklık, donma ve nem etkisi özetle çevre ve iklim şartları



Şekil 4. Timsah sırtı (yorulma) çatlakları

Bu çatlakların önüne geçmek için önlemler şunlardır;

- Projelendirmede ağır yükler hesaba en iyi şekilde katılmalı
- Kaplama daha kalın yapılmalı
- Etkili yeraltı drenajı sağlanmalı
- Nem ve suya karşı dayanıklı malzeme seçimi yapılmalı
- Modifiye bitüm kullanılmalı

Malzeme seçiminde esnek malzeme seçimine dikkat edilmelidir. BSK çekme gerilmesine dayanacak şekilde çekme mukavemetine sahip olmalı bununla birlikte tekrarlanan yüklere karşı çatlamadan karşı koyacak şekilde de esnek olmalıdır. Özetleyecek olursak yumuşak asfaltın sert asfalttan daha iyi yorulma dayanımları vardır diyebiliriz. (Ertaş,2019)

Kenar çatlakları

Banket ve kaplama kenarı arasında oluşup, yol eksenine paralel süresiz şekilde süren gözle görülen ve bazen de yola doğru dalgalanmış çatlaklardır.

Kenar çatlaklarını oluşum nedenlerini şunlardır;

- Donma ve çözünme sonucu oluşan çatlama
- Zeminde yetersiz sıkışma ve yeterli olmayan taşıma gücü ile birlikte kenara gelen aşırı yükler
- Drenajın yetersiz olması
- Yol genişliğinin yetersiz olması sonucu trafiğin kenarlara yakın sürmesi
- Banketin kenara yeterli şekilde destek olamaması oluşur (Arapoglu, 2015).



Şekil 5. Kenar çatlağı

Kenar çatlaklarının önüne geçmek için bazı önlemler alınabilir. Bunlar; yüksek dayanımlı malzeme kullanılması, her bir tabakada sağlam ve iyi şekilde yapılacak olan sıkıştırma işlemi, yeterli olacak bir drenaj sistemi, yola zarar verecek ve su çekme potansiyel olacak malzeme ve bitkilerden arındırılma işlemi alınabilecek önlemlerden bazılarıdır. (Umar ve Agar 1985)

Enine Çatlaklar

Olumsuz ve kötü çevre şartları sonucu meydana gelen çatlaklardır. Tekrarlı meydana gelen trafik yüklerinin doğrudan ve dolaylı hiçbir şekilde etkisi yoktur.(Umar ve Agar 1985)

Kaplama yüzeyindeki sıcaklığın düşmesi sonucunda termal olarak tetiklenen ve kaplamadaki bitümün maruz kalabildiği azami gerilme kuvvetinin aşılması sonucunda düşük sıcaklıktaki çatlamlar meydana gelir. Gelişen bu olay doğrultusunda karayolunun merkezine dik şekilde ve genellikle eşit aralıkta oluşan enine çatlaklardır. Enine çatlaklar yüzeyden başlayıp aşağı yönde ilerler. Bu çatlakların oluşum nedenleri; asfalt kaplamasında düşük sıcaklık sonucunda meydana gelen büzülme, asfalt zemininde don etkisi, su içeriğinde meydana gelen değişiklik, alt tabakada daha önce oluşmuş olan çatlakların yüzeye yansması ve bitümün yaşlanması olabilir(Şengöz ve Agar 2005). Bu çatlakları engellemek için; bağlayıcı seçimi doğru yapılmalı, agregası seçimi yapılırken su emme kapasitesinin düşük olmasına dikkat edilmeli, karışım içerisinde yüksek filler oranından kaçınılması gerekir (Asphalt Institute, 2014).



Şekil 6. Enine çatlaklar(Ertaş,2019)

Boyuna çatlaklar

Asfalt kaplaması üzerindeki trafiğin akış yönünde paralel uzanan çatlak şekilleridir. Boyuna çatlakların meydana gelme sebepleri ise şunlardır; yetersiz sıkıştırma sonucu dolguda meydana gelen oturmalar, drenajın yeterli olmaması, çevre ve iklim etkisi (don etkisi ve nem değişikliği), taşıma gücünün yetersizliği ile bundan meydana gelen oturmalar, boyuna ek yerlerinin yanlış inşası, yetersiz kalıplaşmadan meydana gelen dolgunun yatay hareketi (Arık 1998).



Şekil 7. Boyuna çatlaklar

Blok (Harita) çatlaklar

Boyuna ve enine çatlağın birleşip poligon şeklinde oluşturduğu çatlak tipine blok(harita) çatlaklar denir. Eğer müdahale edilmezse timsah sırtı çatlağa dönüşür (California Department of Transportation, 2001). Blok çatlaklarına sebep olan etkenler ise; taban zemininde olan şişme – büzülme etkisi, don etkisi, kaplamada oluşan yaşlanma sonucu

sertleşme ve kırılma sonucu kopmasıdır. Bunlara ek olarak ağır trafik yükü, sıcaklık değişimi ve kaplamanın olması gerekenden sıcak serilmesi de bu şekildeki çatlamaya sebep olur.

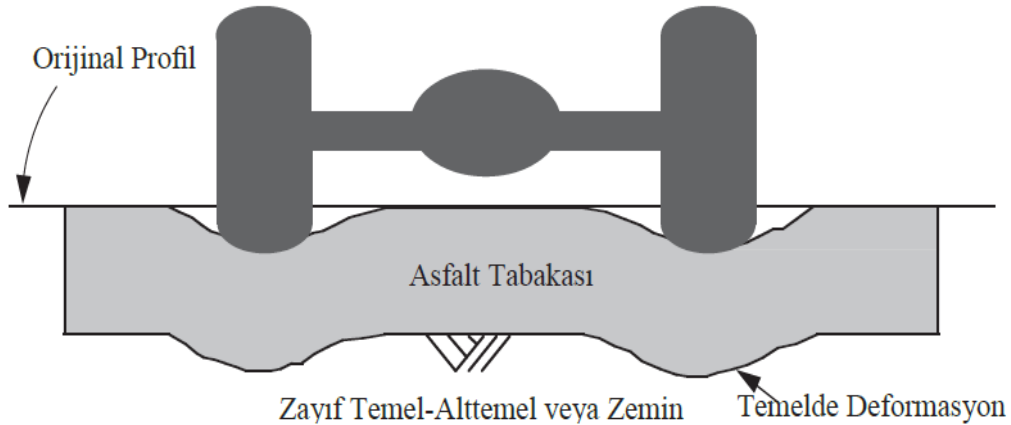


Şekil 8. Blok çatlakları

Tekerlek izinde oturmalar

Asfalt kaplamasında trafiğin akış yönüne paralel tekerleğin yola değme noktasında yol boyunca oluşan düşey kalıcı deformasyona denir. Oluk şeklindedir. Trafikteki ticari taşıtların artması, dingil ağırlığının fazla olması, çift teker yerine tek teker kullanımı, lastikteki iç basıncın fazla olması tekerlek izindeki oturma oluşumunun sebepleri olarak gösterilebilir (Uluçaylı ve Yavuz 2002).

Bu oturmalar araçların şerit değiştirme esnasında rahatlık ve güvenliğini tehlikeye atmaya sebep olmaktadır. Ayrıca oluk şeklindeki bu oturmalarda yağışlı ve soğuk mevsimlerde tekerleğin tabaka üzerinde kaymasına yol açıp fren mesafesini artırıp kazalara da yol açabilmektedir.



Şekil 9. Tekerlek izi oturma (Ertas 2019)

Tekerlek izinden dolayı meydana gelen oturmaların nedenleri;

- Yüksek sıcaklık ve düşük akışkanlıktaki bağlayıcı yüksek oranda bitüm içermesi sonucunda BSK katmanlarının stabilitesini yitirmesi
- Tabakaların yetersiz sıkıştırılması
- Üst tabakaların aşırı gerilmeler sonucunda kalıcı deformasyona uğraması
- Trafik yükleri sonucunda boşluk suyu basıncı ile doygunluğa ulaşan temel ve alt temel tabakalarının stabitesini kaybetmesi
- Yetersiz drenaj, taşıma kapasitesinin azalması
- Yeterli yanal desteğin sağlanamaması ve banket malzemesinin stabil olmamasıdır.



Şekil 10. Tekerlek izi oturması yol örneği (Avcı 2009)

Ondülasyon

Yol kaplama tabakasının bölgesel olarak yukarı doğru hareket etmesine ondülasyon denir. Üst tabakanın ve zeminin şişmesi sonucunda ortaya çıkar. Oluşma sebepleri; karışımın yetersiz stabiliteye sahip olmasından dolayı, serim sıkıştırma hataları, temeldeki stabilite bozukluğunun yüzeye yansması, trafik yükü sonucunda suya doygun temelin oluşması, trafik ışığı ve kavşaktaki trafik etkisi, tabakalar arasındaki yapıştırma tabakasının yanlış uygulanmasıdır.(Salta 2010)



Şekil 11. Ondülasyon yol örneği

Çukurlar

Yolun belirli kesimlerinde meydana gelen belli çaplardaki oyuklara denir. Çukurun oluşma sebepleri ise; yolun yanlış yapım tekniği, düşük kaliteli malzeme karışımı, üst yapı kalınlığının yetersiz olması ve karışımın soyulma ve segregasyona sebep olur. Yol imalatında bu sorunların ortadan kaldırılması bu tür yüzey bozukluklarını ortadan kaldırmaya yeterli olacaktır.



Şekil 12. Çukur yol örneği

Segregasyon, soyulma ve sökülmeler

İri agreganın sıcak karışımlardan farklı sebeplerden dolayı ayrılması sonucu meydana gelirler (Van de Ven 2009).

Bu sebepleri sıralayacak olursak; su ve trafiğin etkisi, sıkışmanın yetersizliği sonucunda boşluk yüzdesinin fazla olması, karışımındaki killi malzemelerin(agrega yüzeyinde ya da topak şeklinde karışımında) bulunması, imalat tekniğinin uygun olmaması, donma çözünmeye karşı dayanımı düşük agrega seçimi, yetersiz asfalt yüzdesi ve yaşlanma sonucu oluşan asfalt sertleşmesi şeklinde açıklayabiliriz.



Şekil 13. Segregasyon soyulma sökölme yol örneği(Ertaş 2019)

Asfalt Kaplamalarının Geri Dönüşümü

Ekonomik ömrünü tamamlamış ve kullanım amacına hizmet etmiş olan yol kaplamasının yoldan kazılıp farklı işlemlerden geçtikten sonra sıcak asfalt karışımında tekrardan kullanılmasına geri dönüşüm denir. Geri dönüşümde kazınmış olan malzeme ile yeni malzemeler ile karıştırılır. Bu işlem sayesinde yolun ekonomik açıdan da verimli olması sağlanmış olur. Ülkemizde gelişmekte olan ulaşım ağı da düşünüldüğünde ilerleyen yıllarda yol iyileştirme faaliyetlerini artacağını göstermektedir. Geri dönüşüm sayesinde ise hem yol yapım maliyetinin azalması hem de çevresel anlamda korunmaya da büyük katkısı olacaktır.(Yiğitler 2011)

Geri dönüşümde yapılan işlem ile asfaltın karışımında yeniden kullanılarak devamının sağlanması istenir. Asfalt bozulmuş olduğu halde geri kazanıldığında yeniden asfalt olarak değerini korur. Fakat geri dönüşümde kazınmış olup kullanılmak istenen asfaltın içerisindeki bitümlü bağlayıcının yaşlılık sebebiyle sertlik, elastiklik ve viskozitesine dikkat edilmelidir (Van de Ven 2009).

Asfalt kaplamasında geri dönüşüm ülkemizde yakın zamanda yaygınlaşmaya başlamıştır. Sebebi ise ülkemizdeki agregaya olan ihtiyacın çok rahat giderilmesi ve BSK kaplamalı yolların yeni yaygınlaşmasıdır. Yalnız yakın gelecekte ekonomik ömrünü tamamlayacak olan yollarla birlikte geri dönüşümün önemi de artacaktır.

Bitümlü sıcak karışımında yeniden kullanılacak olan kazınmış asfaltın getireceği yararlar (Güngör vd. 2008) :

- Geri kullanım ile birlikte getirmiş olduğu ekonomik kazanımlar elde edilir
- Malzeme ihtiyacının azalması doğrultusunda doğanın korunması ve atık sahalarının önüne geçilmesini sağlar
- Hazır bulunan kaplamanın üzerine yeni kaplama yapılarak kot yükselme sorununun engellenmesine imkan tanır.
- Geleneksel yapım tekniklerine bakıldığında enerji tasarrufunu sağlamaktadır.

Asfaltın geri dönüşüm yöntemleri

Asfaltta geri dönüşün yöntemi aslında yolda ve plentte geri dönüşüm olmak üzere iki başlık altında uygulanmaktadır. Fakat bununla birlikte Asfalt Geri Dönüşüm ve Rehabilitasyon Birliği tarafından yayınlanmış olan beş farklı geri dönüştürme yönteminin olduğu bilinmektedir (Sönmez vd. 2009).

Bunlar;

- Soğuk düzeltme,
- Sıcak geri dönüşüm,
- Sıcak yerinde geri dönüşüm,
- Soğuk geri dönüşüm,
- Tam derinlikten geri kazanma,

Asfaltta geri dönüşüm çeşidinin seçilmesinde yol üzerindeki bozulmanın tipi, şiddeti ile birlikte yoğunluğu etkili olmaktadır. Özetle bozulmanın türüne göre asfalttaki geri dönüşüm türünü belirleriz. Çünkü seçilen her geri dönüşüm çeşidi çeşitli bozulmaların hepsinde aynı etkinlikte değildir. Bozulma çeşidine göre seçilmesi gereken geri dönüşüm çeşitleri aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 2. Yolda Oluşan Bozulma Tipine Göre Seçilecek Düzeltme Metodu (Kök vd. 2011)

Kaplama bozulma tipi	Soğuk düzeltme	Sıcak geri dönüşüm	Sıcak yerinde geri dönüşüm	Soğuk yerinde geri dönüşüm	Tam derinlikli geri dönüşüm
Yüzey kusurları					
-sökülme	*	*	*		
-cilalanma	*	*	*		
Kalıcı deformasyon					
-Tekerlek izi-sığ	*	*	*		
-Tekerlek izi-derin		*		*	*
Trafikten kaynaklanan çatlaklar					
-Timsah sırtı		*		*	*
-Boyuna çatlaklar		*	*	*	*
-Kaplama kenarı çatlakları		*		*	*
-Yansıma çatlakları		*	*		
Trafikten kaynaklanmayan çatlaklar					
-Blok tipi çatlaklar		*		*	*
-Boyuna çatlaklar		*	*		
-Enine çatlaklar		*		*	*
Yamalar					
-Yüzeysel yamalar		*			*
-Derin yamalar		*			*
-Problemli temel/alttemel					*
Seyahat konforu/pürüzlülük					
-Genel olarak pürüzlü	*	*	*		
-Çukur	*	*	*		*

Soğuk düzeltme (Cold planing)

Soğuk düzeltme işlemi asfalt yol kaplamasının özel ekipman kullanılmasıyla istenilen yerin belirtilen derinlik ve enine eğimde yerinden kaldırılması işlemine denir. Bu işlem esnasında makinenin yıpranmasını azaltmak ve ömrünü uzatmak ayrıca toz durumunu ortadan kaldırmak için su kullanılır. Kullanılan bu su enjektör yardımıyla kesici ucun bulunduğu bölgeye iletilir. Bu düzeltme işlemi çukur, tekerlek izi vb. bozuklukları onarmak için kullanılır. Böylece yüzeyde iyileştirme tamamlanmış olur.

Soğuk düzeltmede asfalt yüzeyinin yerinden kaldırılması sonrası istenirse pürüzlü şekilde yol yüzeyi kullanılmak üzere trafiğe açılabilir. Hatta bazen bu pürüzlü yüzey yolun sürtünmesine artırıcı etkisi olup kayganlığını azaltır. İstenmesi durumunda yüzeyin yerinden kaldırılması sonrasında diğer geri dönüşüm yöntemleri ile müdahale edilebilir veya tabaka kaldırılıp temizlendikten sonra tack coat(yapıştırıcı) ile kaplanıp BSK teşkil edilebilir.



Şekil 14. Soğuk Düzeltme işlemi sonrası yol yüzeyi(Kaya 2011)

Soğuk düzeltme işleminin sağladığı faydalar ise;

- Yüzeydeki tekerlek izi oturmanın kaldırılarak yolun onarılması.
- Yol yüzeyinin enine ve boyuna eğiminin istenilen şekilde ayarlanması.
- İstenilmesi durumunda yoldaki drenajın değiştirilip yeniden modellenmesi.
- Yolun bozuk kesimlerinin yerinden kaldırılarak onarım işlemine ön hazırlık yapılması veya genişletme yeniden yapım için yol yüzeyinin tamamen kaldırılması.
- Yoldaki kayganlığın azaltılması için soğuk düzeltme işlemi uygulanarak yol yüzeyindeki sürtünme direncinin artırılmak istenmesi.
- Geri dönüşüm yöntemleri içerisinde ekonomik ve çevreyi daha az rahatsız etmesi (ARRA 2001).

Sıcak geri dönüşüm (Hot recycling)

Kullanılmış olan asfalt kaplamasına asfalt plentin de agrega ve bitüm malzemesinin eklenip karıştırılması sonucunda ortaya çıkan üretim şekline denir. Geri dönüşüm yöntemleri içerisinde dünyada en yaygın olanıdır. Isıtma işleminin plentte yapılması sıcak geri dönüşümden farkı olarak söylenebilir.

Sıcak geri dönüşümde kullanılacak olan malzeme (RAP) üretimi için soğuk düzeltme işlemi tercih edilmektedir.

Geri dönüştürülecek olan malzemenin (RAP) plente soğuk besleme ile verilmesi sıcak beslemeye kıyasla malzemeden daha az faydalanma olanağını verir. Sıcak besleme ile yapılmış olan plentlerin yatırım maliyeti yüksek olmasından dolayı genellikle soğuk besleme

plentleri tercih edilir. Fakat soğuk besleme yöntemi ekonomik görünsede uzun vadede daha ekonomik olan sıcak besleme yöntemidir.

Dünya ülkelerinde asfalt karışımında kullanılacak olan RAP yüzdesi değişiklik gösterir. Karışımındaki bu yüzde ülkelerin bu alanda yapmış olduğu çalışmalar ve teknolojik gelişmeye bağlı olarak artmaktadır. Ayrıca yapılan çalışmalar doğrultusunda RAP'nin bitümlü temel ve binder tabakalarının imalatlarında kullanılmakla kalmayıp, son kat olan aşınma tabakasında da kullanılması alanında ilerlemeler sağlanmıştır.

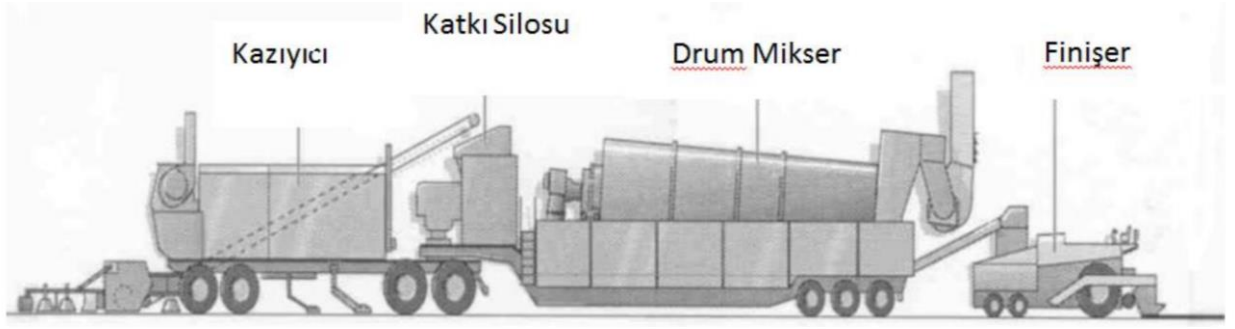
Taşıma, serme ve sıkıştırma uygulamasının bitümlü sıcak karışım ile geri dönüşümden geçen karışım arasında hiçbir fark yoktur. Ayrıca yapılan performans gözlemlerinde de kalite ve dayanım açısından bir fark yoktur. (ARRA, 2001).

Asfalt üretiminde kullanılan sıcak geri dönüşüm yöntemi ile enerjiden tasarruf sağlanır, doğal agrega kaynaklarının tüketimi engellenir ve bunların doğrultunda ekonomik fayda sağlanır (Ilıcalı vd. 2001).

Sıcak yerinde geri dönüşüm (Hot in-place recycling)

Sıcak yerinde geri dönüşüm işleminde kazıma işlemini gerçekleştiren makine kazıdığı asfaltı hemen gerisinde gelen asfaltı plent makinasına aktarır. Burada kazımış olduğu asfalt malzemesine bitüm ve katkı maddeleri eklenir. Daha sonrasında ise karışım belirli bir sıcaklığa ulaştırılır ve ardından gelen finişere bu karışımı aktarılır ve serme sıkıştırma işlemi gerçekleştirilir. Bu uygulamanın özelliklerinden biri geri dönüşümün tamamının sahada uygulanması ve kazılan asfaltın % 100' ünün geri dönüştürülmek için işleme girmesidir. Sıcak yerinde geri dönüşüm üç farklı şekilde seçilip yüzeye uygulanabilir. Bunlar; yüzeysel geri dönüşüm, yeniden karıştırma, yeniden kaplama ile yüzeysel geri dönüşümdür.

Yapılan sıcak geri dönüşüm işlemi ilk uygulanmaya başlandığında iyileştirme derinliği genellikle 20-50 mm iken günümüze gelindiğinde bu derinlik iş makinelerinde teknolojik gelişmeyle birlikte 75 mm' ye kadar yapılabilmektedir (ARRA 2001)



Şekil 15. Sıcak yerinde geri dönüşüm(Mazlum 2014)

Sıcak yerinde geri dönüşüm gerçekleştirilirken kazınma işlemi gerçekleştirilecek olan mevcut asfalt kaplaması ısıtma işlemleri gerçekleştirilerek yüksek sıcaklığa ulaştırılır. İstenilen sıcaklığa ulaştıktan sonra asfalt kaplaması istenilen derinliğe kadar kazılır. Daha sonra kazınan malzemeye ihtiyaç varsa agrega ve bitüm eklenerek yeniden homojen hale gelinceye kadar karıştırılır. Karıştırma işleminin ardından istenilen kalınlıkta yola serme ve sıkıştırılması yapılır. Zaman kaybı yaşanmadan ardı ardına gerçekleşen işlemler sebebiyle yolun trafiğe kapalı olma süresi diğer yöntemlere kıyasla daha kısadır. Bununla birlikte nakliye masrafları da minimumdur fakat kullanılan iş makinelerinin fazla büyük olmasından dolayı şerit kısıtlamasına gidilebilir.



Şekil 16. Yerinde sıcak geri dönüşüm uygulamalarından örnek (Salta 2010)

Soğuk geri dönüşüm (Cold in-place recycling)

Bu yöntemde iyileştirilmek istenen kaplamanın yüzeyinde sıcaklığa başvurulmadan, mekanik enerji kullanılarak gerçekleşen geri dönüşümdür. Kullanılan en yaygın ekipman tambur etrafında dizilmiş dişe sahip soğuk freze makinesidir. Sıcak yerinde geri dönüşüm

ekipmanları ile kıyaslandığında daha fazla enerji harcar ancak derinlik olarak daha fazla kesme kapasitesine sahip olduğu için toplamda daha az enerji harcar (Donn,2009).

Soğuk geri dönüşüm metodu kendi içerisinde iki alt başlıkta incelenir; yerinde soğuk geri dönüşüm ve plentte soğuk geri dönüşüm.

Soğuk yerinde geri dönüşüm uygulamasında bozulmuş olan kaplamanın ve bazı durumlarda temel tabakası da dahil edilerek kaldırılıp yeniden karıştırılıp tekrardan yola tekrar serilip sıkıştırılması işlemine denir. Yüksek mukavemetli olması bir temel olması istenirse asfalt ya da katkı maddeleri (kireç çimento) kullanılabilir. Bu geri dönüşüm metoduna kazınan malzemenin tamamı geri dönüştürülür. Ekipman olarak kamyon, asfalt kazıyıcı, kırma eleme ünitesi ve serim makineleri de kullanılır.

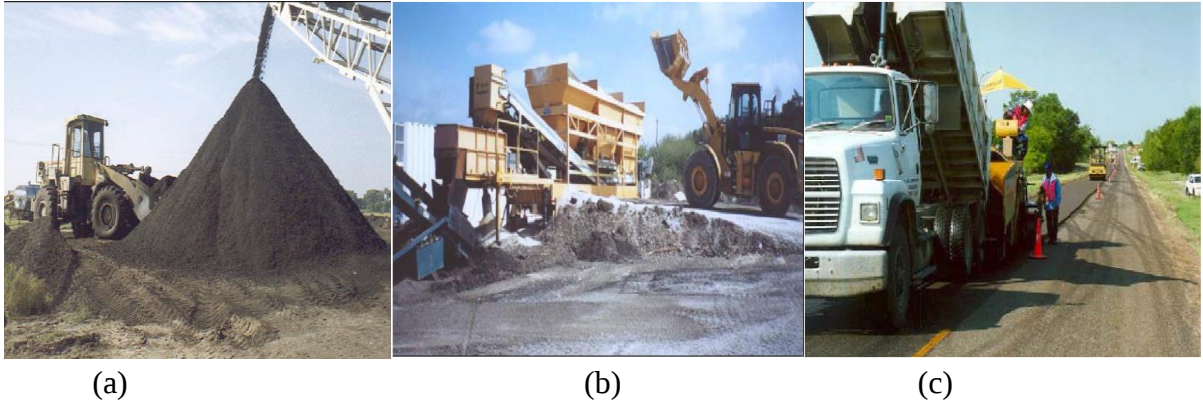
Uygulama gereği bu makinelerin birbirine yakın mesafede seyretmesi gerekir. Hacim olarak yer kaplayan makine oldukları için trafikteki manevralarına dikkat edilmesi gerekir ve gerektiği durumda şeritler de trafiğe kapatılmalıdır. Yerinde gerçekleşene işlem olduğu için nakliye maliyeti azdır. Hava durumundan kaynaklı sorunlar ise ihmal edilebilir.



Şekil 17. Yerinde soğuk geri dönüşüm uygulaması (Orhan 2012)

Plentte soğuk geri dönüşüm genelde asfalt yol kaplamalarında onarım işlemlerinde kullanılır. Bu yöntemde yoldan kazınan asfalt kaplaması tesise taşınarak sabit soğukluktaki plente aktarılır. Herhangi bir ısıtma işlemi gerçekleşmediği için plentte sıcak geri dönüşüm ile benzer uygulamalara sahiptir. Bu yüzden bitüm bağlayıcı olarak kullanılmaz. Bu işlemde en önemli detay karıştırma süresidir; uzun süren karıştırma emülsiyonun erken kesilmesine, yetersiz karıştırma ise agreganın yetersiz kaplamasına neden olmaktadır (Mallick 2005).

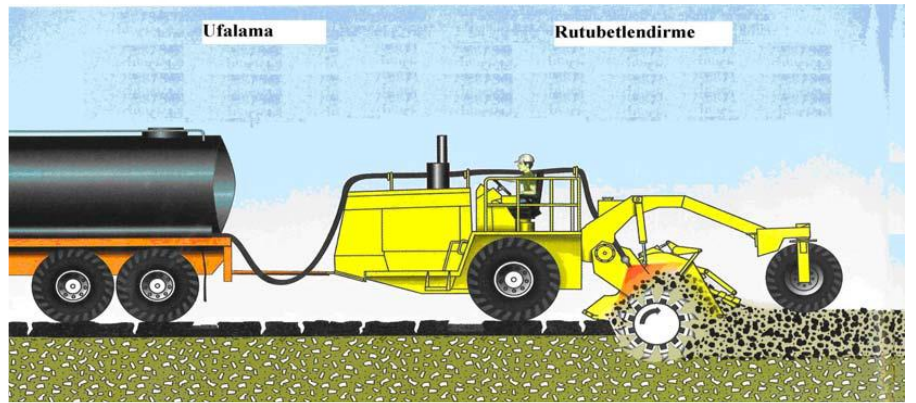
Plentte soğuk geri dönüşüm ile elde edilen karışım üretim sonrasında kullanılabilirdiği gibi ilerde meydana gelen çukur, yama bakım –onarım işlemlerinde kullanılmak üzere stoklanıp saklanmak şartıyla kullanılabilir.



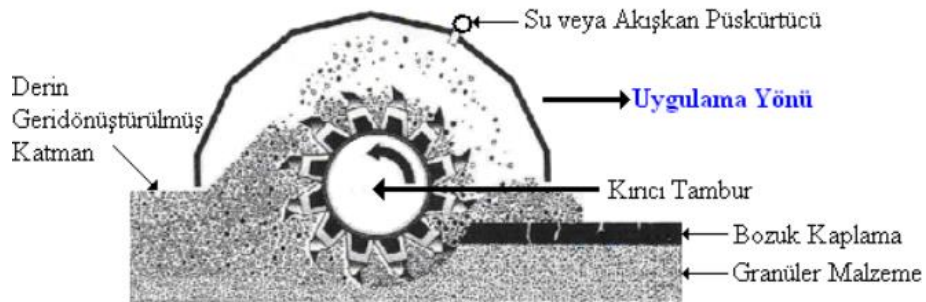
Şekil 18. Plentte soğuk karışım geri dönüşümü uygulamasının aşamaları (Salta 2010)

Tam derinlikten geri kazanma (Full depth reclamation)

Mevcut kaplamanın esnek kaplama bölümünün tamamının veya temel alttemel tabakasının istenilen ölçüde kaldırılması, sonrasında ise homojen karışım elde etmek için öğütülüp harmanlanıp yeniden yola serilmesi işlemine tam derinlikten kazanma denir. Yoldan kaldırılan malzemeye ihtiyaç duyulması halinde stabilizasyon ve gradasyonu sağlamak için kireç, uçucu kül, portland çimentosu, köpük asfalt vb. katkı malzemelerinden biri veya birlikte birkaçı ilave edilebilir. Bu işlemten sonra ise sırayla sıkıştırma, düzenleme ve bitümlü yüzey kaplaması yapılır. Tam derinlikten kazanma işleminde ısıl işlem uygulanmaz ve uygulanan derinlik kaplamanın türüne bağlı olarak 10-30 cm arasındadır. (İnci 2012)



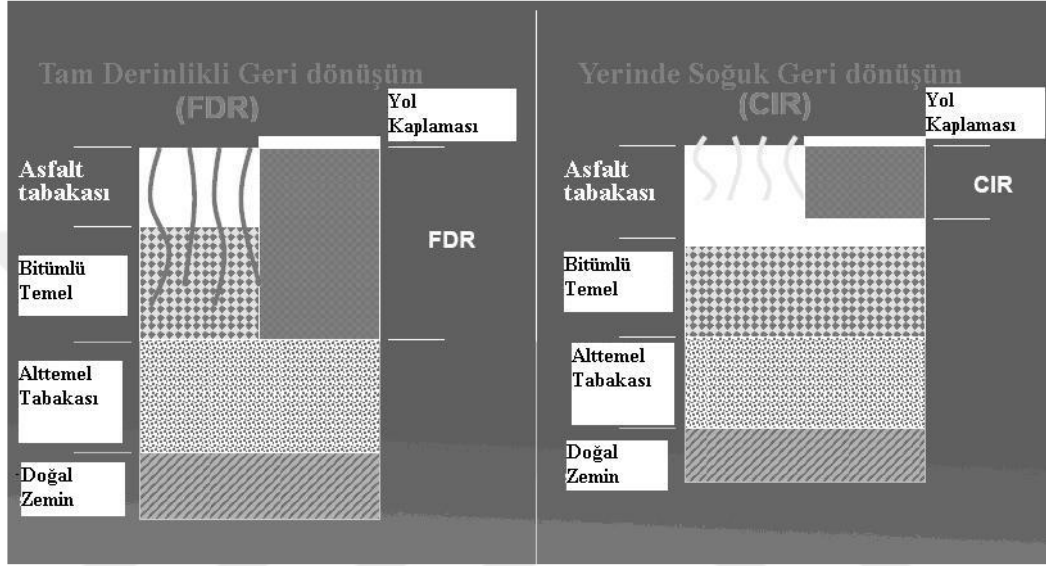
(a)



(b)

Şekil 19. Tam derinlikte geri kazanım işleminin uygulanması (Salta 2010)

Bu metod daha önce açıklamış olduğumuz yerinde soğuk geri dönüşümden en önemli farkı kaplamadaki bozulma ve çatlamların yol yüzeyinde kalmayıp temel seviyesine kadar inmesi durumunda uygulanmasıdır. Yol yüzeyinde belirlenen bu bozulma ve çatlama problemini gidermek için asfalt kaplama tabakalarının tamamı kaldırılarak bu metod uygulanmaya çalışılır. Aşağıdaki şekilde soğuk yerinde geri dönüşüm ve tam derinlikte geri kazanma yönteminin grafik üzerinde uygulandığı tabakalar ve grafik olarak kıyaslaması yapılmaktadır (Ed Kearney 2008).



Şekil 20. Soğuk Yerinde Geri Dönüşüm (CIR) ile Tam Derinlikli Geri Dönüşüm (FDR) yöntemlerinin grafik olarak karşılaştırması

Tam derinlikten geri kazanma yönteminin avantajlarını belirtecek olursak (ARRA, 2001)

- Agrega kullanımının azalması ile doğanın korunması,
- Geri dönüşüm metodları içerisinde daha az enerji tüketimi,
- Az ekipman sayısı ile işlemin gerçekleştirilmesi,
- Kaplamadaki bozulma, çukur ve yamaların onarımı,
- Nakliye maliyetlerinin az olmasıyla birlikte ekonomik oluşu,
- Sürüş kalitesini artırması,
- Önemli yapısal iyileşmeye imkan tanınması (temel alttemel),
- Drenaj sisteminin yeniden şekillenmesine imkan tanınması,
- Yerinde geri dönüşüme istinaden trafikteki aksamalara daha az sebep olması ve kullanıcı hoşnutsuzluğuna sebebiyet vermemesi,
- Geri kazanılan malzemeye katkı maddelere eklenerek yapısal anlamda iyileşmenin sağlanması.

Asfalt Geri Dönüşümüyle İlgili Yapılan Çalışmalar

Yol kaplamalarının yapımı kadar eskilere dayanan asfaltta geri dönüşümün, yoldan çıkarılan asfalt malzemesinin girişimciler tarafından malzeme elde etmek için veya otopark gibi yeni alanları açmak için kullanmış olmaları dahilinde bulunduğu düşünülmektedir.

Geçmişten günümüze geçen süreç içerisinde kaplama endüstrisinde asfaltın geri dönüşümü daha da önem kazanmıştır. Yeni asfalt karışımlarında geri dönüştürülmüş asfaltın kullanımı 1970'lerde büyük ölçüde önem kazanmıştır. Bunun sebebi ise 1973'de Arap petrolünde uygulanan ambargo ve bununla birlikte ham petrol fiyatının da yükselmesidir. Fiyatların yükselmesi sonucunda asfalt üretimindeki maliyeti azaltmak amacıyla asfalt geri dönüşüm endüstrisinde teknolojik gelişmelere yönelmiş ve asfalt kaplama maliyetlerini düşürmeye çalışmışlardır. Bu dönemde bulunan uygulamalar günümüzde halen kullanılmaktadır.

Aynı zamanda Türkiye ve tüm dünya ülkelerinde yol ağlarının gelişmesi, nüfusun artması, yerleşim yerlerini artması vb. durumlar doğrultusunda da hammadde ihtiyacının artması, doğal kaynakların hızla tükenmesi, yol yapım maliyetlerinin artması sebebiyle ülkeler yol yapımında geri dönüştürülmüş asfalt malzemesinin de kullanımına büyük önem vermeye başlamıştır.

1973'te Arap petrol ambargosunun etkisiyle ham petrol fiyatlarının yükselmesi, sıcak asfalt karışımlarında geri dönüştürülmüş asfalt kullanımının artmasına neden oldu. Ambargonun etkisiyle bağlayıcı fiyatlarının artması, asfalt endüstrisini yeni maliyet azaltma yöntemleri bulma zorunluluğuna yönlendirdi. Asfalt kaplama endüstrisi, asfalt bağlayıcı talebini düşürmeye yardımcı olan geri dönüşüm teknolojilerini geliştirerek veya iyileştirerek asfalt kaplama karışımlarının maliyetlerini düşürdü. Günümüzde hala kullanılan bazı uygulamalar, kaplama inşaatı ve iyileştirme operasyonlarının ayrılmaz bir parçası olarak varlığını sürdürmektedir.

Bu bölümde asfalt karışımlarında geri dönüşüm üzerine yapılmış olan çalışmalar araştırılmıştır.

Çubuk, (1990) yayınlamış olduğu makalesinde geri kazanılan RAP malzemesini %10, %20, %30, %40, %50 ve %60 oranlarında karıştırarak bitümlü temel tasarımı yapmıştır. Hazırlamış olduğu marshall numunelerine yapılan pratik özgül ağırlık deneyi sonuçlarından, RAP miktarının artmasıyla pratik özgül ağırlık değerinin arttığını ve hava boşluk değerinin azaldığını gözlemlemiştir. Asfalt Dolu Boşluk oranını ise tüm karışımlarda %50- %55 aralığındadır. Yapılan akma ve stabilite deneylerinde ise, stabilitenin karışımdaki RAP

miktarının artmasıyla arttığını gözlemlemiştir. maksimum stabilite ise %60 oranında RAP olduğu karışımda saptanmıştır

Taha ve diğ. (1999), yapmış oldukları çalışmada granüler temel tabakasında geri dönüştürülmüş asfaltın %10, alttemel tabakasında ise %60 ile sınırlı tutulması gerektiğini belirtmişlerdir.

Taha ve diğ. (2002), %0, %10, %20, %30 ve %100 oranında geri dönüştürülmüş asfalt kullanılan karışımlara, ağırlıkça %0, %3, %5 ve %7 oranında puzolanik çimento eklemişlerdir. Oluşan yeni karışımda yapılan deneyler sonucunda geri dönüştürülmüş asfaltın temel tabakası ve alttemel tabakasında agrega yerine kullanabileceğini belirtilmişler, çimentoyla stabilize edilen geri dönüştürülmüş asfaltın katkılı bitümlü sıcak karışımlarda temel tabakasında belirtilmiştir. Ancak geri dönüştürülmüş asfalt miktarının artırılmasıyla birlikte temel tabaka kalınlığının da arttırılması gerektiği belirtilmiştir.

Taha (2003), yapmış olduğu çalışmada geri dönüştürülmüş asfalt karıştırarak hazırlanmış olduğu karışımlarda çimento fırın tozu kullanarak sıkıştırma ve serbest basınç deneylerini uygulamıştır. Bulunan sonuçlar doğrultusunda en uygun temel tasarımında yaklaşık %15'lik çimento fırın tozu kullanımının yeterli olacağını belirtmiştir.

Güngör ve diğ. (2008) yapmış oldukları çalışmada; kazılmış asfalt kaplamasının yeniden kullanılması amacıyla "Sakarya Köprülü Kavşağı Gümüşova (17.Bölge Müdürlüğü Sınırı) Arası Otoyol ve Bağlantı Yolları Üstyapı İyileştirmesi ve Büyük Onarım İş'i" kapsamında yapılan çalışmaları aktarmışlardır. Yapılan çalışmada uygulanan metodun sıcak geri dönüşüm olarak belirtmişlerdir. Aşınma tabakasında elde edilen RAP malzemesi binder ve bitümlü temelde kullanılmıştır. Temelde %20 binderde ise % 10 oranında kullanılmıştır. Yapılan penetrasyon deneylerinde eski ve yeni karışım 50/70 penetrasyon sınıfını sağladığı gözlenmiştir. Bu sebeple gençleştirici katkı takviyesi yapılmamıştır. Yapılan deneyler sonucunda boşluk oranı, optimum bitüm içeriği yüzdesi, agrega arası boşluk yüzdesi, asfaltla dolu boşluk yüzdesi, akma ve stabilite sonuçlarının limit değerlerini sağladığı gözlenmiştir.

Kaya,(2011) yapmış olduğu çalışmada bitümlü karışımlarda geri dönüşümü, hangi çeşit tesislerde geri dönüştürüldüğünü, geri dönüşüm metodlarını, dünya ülkelerinde ve ülkemizde geri dönüşümün durumunu, çevresel etkisini ve maliyetini ele alarak anlatmıştır. Yapılan çalışma neticesinde yoldan kazılan asfaltın nerdeyse tamamının geri kazanılmasına, bu şekilde daha az hammadde kullanımına ve doğal kaynakların korunmasına bunların sonucunda ise asfalt üretim maliyetinin azalması gibi sonuçların elde edileceğini belirtmiştir .

Oylumoğlu (2012), yapmış olduğu geri kazanılmış asfalt betonunun ılık asfalt karışımında kullanımıyla ilgili çalışmalar yapmıştır. Bu çalışmalar kapsamında mekanik özelliklerini öğrenmek amacıyla Marshall, stabilite ve indirekt çekme deneylerini yapmıştır. Çalışmalar neticesinde elde edilen veriler doğrultusunda, geri kazanılmış asfalt içermeyen ılık asfalt karışımı ile geri kazanılmış asfalt karışımının benzer mekanik özellikler gösterdiği gözlemlenmiştir; sıcak asfalt ve ılık karışım asfalta karşın geri dönüşüm asfalt kullanımının maliyet anlamında daha avantajlı olduğu da belirtilmiştir.

Mazlum (2014) yapmış olduğu çalışmada ömrünü tamamlamış asfalt tabakalarının bitümlü sıcak karışımında tekrar kullanılabilirliği üzerine araştırmalar yapmıştır. Yapılan çalışmalarda değişik oranlarda kaplama karışım numuneleri hazırlamış ve bu numunelere çeşitli testler uygulamıştır. Bitümlü sıcak karışıma %0, %10, %25, %40 oranlarında yoldan kazılan asfalt malzemesi eklenmiştir. Uygulanan testler sonucunda karışım içerisinde oransal olarak kazılan asfalt malzemesi arttıkça stabilite değerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Hazırlanan tüm karışımlarda akma değeri olması gereken sınırlar içerisinde kalmakla birlikte en yüksek akma kontrol karışımında (%0) olduğu belirtilmiştir.

Arapoğlu (2015), asfalt kaplamaların geri dönüşümü ve maliyet üzerine çalışmalar yapmıştır. Farklı oranlarda RAP içeren hazırlamış olduğu karışımlar üzerinde maliyet incelemeleri yapmış ve karışımlarda RAP yüzdesi arttıkça maliyet bakımında daha uygun olduğunu gözlemlemiştir.

Seferoğlu ve diğ. (2015) yapmış olduğu çalışmada hazırlamış olduğu karışımlar içerisinde RAP seviyesi arttıkça karışımın yapışkanlığı bitüm sebepli artmıştır. Bunun neticesinde malzeme kolay sıkışır ve su muhtevası, maksimum kuru birim hacim de ağırlık azalmıştır. Hazırlamış olduğu karışımlarda CBR değerlerini %100 RAP için %26, %30 RAP - % 70 Agrega için %90, %100 agregada ise %143 bulmuştur.

Oruç ve diğ. (2017) binder tabakasının geri dönüşümü üzerine makale çalışması yapmıştır. Bu çalışma kapsamında agregada, bitüm ve RAP malzemesi içeren karışım hazırlanmıştır. Karışım içerisinde RAP oranı %0, %10, %25, %40 oranlarındadır. Marshall dizaynı sonrasında kesme ve akma değerleri üzerine değerlendirmede tüm karışımların hepsinin binder tabakası için belirtilen değerlere uygun olduğu belirtilmiştir. Karışıma katılan RAP oranı ile birlikte hava boşluğunun arttığını ancak RAP oranı arttıkça karışımın pratik yoğunluğunun ve stabilite değerinin düştüğünü belirlemiştir. Stabilite deneylerinde bulunan akma değeri ile hesap ettiği marshall oranının %10 RAP içeren karışımında en yüksek olduğunu ve RAP oranı arttıkça bu değer düşüğünü belirtmiştir. Yalnız %40 RAP içeren karışımın bile RAP içeriği bulunmayan karışıma göre daha yüksek olduğu açıklanmıştır.

MATERYAL VE METOT

Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada 70/100 penetrasyonlu bitüm, geri kazanılmış asfalt betou malzemesi, kenevir tohumu yağı, atık trafo yağı kullanılmıştır. Kullanılan malzemelerle ilgili bilgiler aşağıda mevcuttur.

Kullanılan bitüm 70/100 penetrasyonlu bitümdür.

Çalışmada kullanılan agrega ve filler Karayolları 16. Bölge Müdürlüğü 164. Şube Şefliğinden temin edilmiştir. Kalker esesli kırma taş agrega kullanılıp fiziksel özellikleri yapılan deneylerce belirlenip aşağıdaki tabloda verilmiştir.

Tablo 3. Agrega Fiziksel Özellikleri

Deneyler	Kaba Agreg	İnce Agreg	Filler
Hacim özgül ağırlığı	2,695	2,692	-
Zahiri özgül ağırlık	2,71	2,713	2,721
Su absorpsiyonu (%)	0,209	0,29	-

Taşocağından tedarik edilen kırmataşlar 4 farklı grup olarak elek analizine alınmış ve tabloda elde edilen gradasyonlar verilmiştir.

Tablo 4. Agregaların Elek Analizi

Kullanım oranları		14	18	30	38	100	Şartname Sınırları	
Elek no.		1.Grup	2.Grup	3.Grup	4.Grup	Karışım Gradasyonu		
inch	mm	19-25 mm	12-19 mm	5-12 mm	0-5 mm			Alt Sınır
1''	25	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100	100
¾''	19,1	51,9	100,0	100,0	100,0	93,2	80	100
½''	12,7	0,7	34,3	100,0	100,0	73,9	58	80
3/8''	9,52	0,6	1,0	81,9	100,0	62,2	48	70
No.4	4,76	0,5	0,4	13,2	100,0	41,2	30	52
No.10	2,00	0,5	0,4	2,9	72,2	27,3	20	40
No.40	0,42	0,4	0,3	2,0	29,6	10,5	8	22
No.80	0,177	0,4	0,3	1,5	21,08	7,4	5	14
No.200	0,075	0,3	0,2	0,6	15,4	4,6	2	7

Geri kazanılmış bitüm, Erzurum Karayollarının sökülmiş asfaltlarından temin edilmiştir. Atık asfalt betonu malzemesi, reflüks ekstraktör aletine yerleştirilerek trikloretilende çözünmesi sağlanmıştır. Elde edilen çözeltiden daha sonra trikloretilen buharlaştırılmış ve geri kazanılmış bitüm elde edilmiştir.

Tablo 5. Trikloretilen Özellikleri

Molekül Formülü	C_2HCl_3
Saflık	$\geq 99,5$
Yoğunluk	1,46-1,47 g/cm ³
Görünüm	Berrak
Kaynama Noktası	87°C
Erime Noktası	-86°C
Molar Kütle	131,79 g/mol
Asidite	0,0005 meq/gr
Alkalinite	0,0003 meq/gr



Şekil 21. Atık asfalt betonu malzemesi ve geri kazanılmış bitüm



Şekil 22. Reflüks ekstraktör aleti

Kullanılan Kenevir tohumu yağının bazı özellikleri tabloda verilmiştir.

Tablo 6. Kenevir Tohumu Yağı Özellikleri

Görünüm	Şeffaf berrak yağı
Renk	Sarıdan yeşile
Parlama Noktası	$>220^{\circ}\text{C}$
Erime Noktası	-8°C
Peroksit İndeksi	10 meq O_2/Kg oil
Çözünürlük	Suda çözünür değil, alkolde fazla çözünür değil, eterde çözünür.

Erzurum Aras Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi'nden atık trafo yağı temin edildi.

Tablo 7. Atık Trafo Yağı Özellikleri

Yoğunluk	$885,5 \text{ g/cm}^3$
Kinematik viskozite(40°C 'de)	$9,6 \text{ mm}^2/\text{sn}$
API Gravite	28,6
Kükürt	24,3 ppm
Parlama Noktası	$\geq 120^{\circ}\text{C}$
Akma Noktası	-43°C

Yapılan Deneyler

Penetrasyon deneyi

Penetrasyon deneyi TSE 118 EN 1426 ve ASTM D5 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Bitümün sertlik ve kıvamlılığını tain etmek için yapılan penetrasyon deneyinde, kıvamlılık arttıkça bitümün bağlayıcı özelliği de artmaktadır.

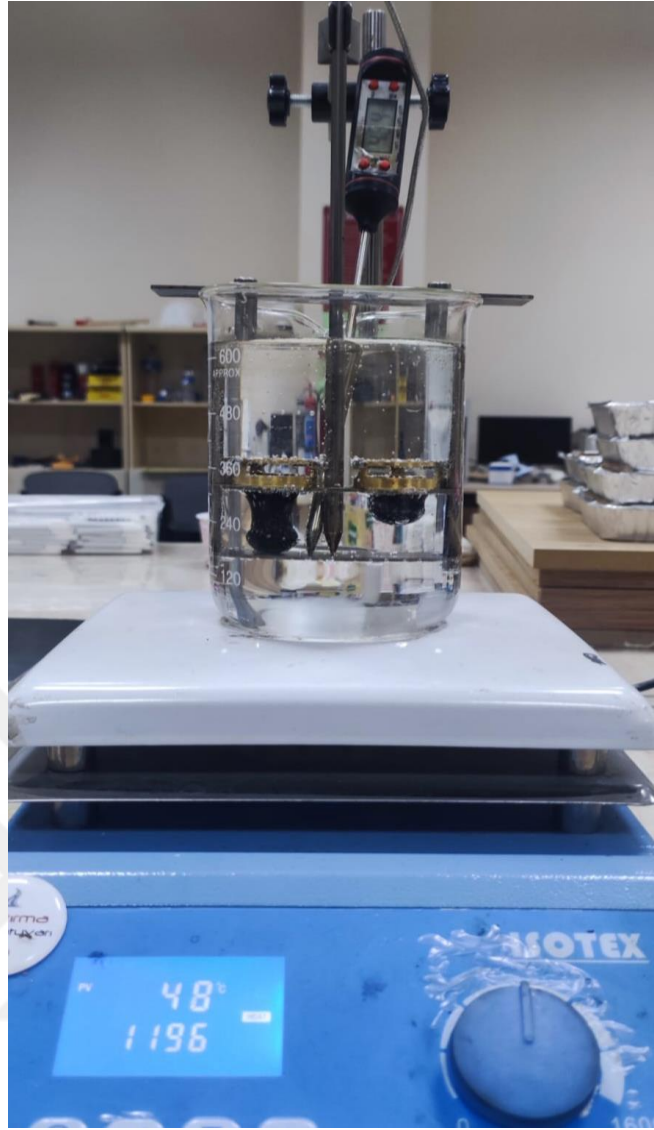
Penetrasyon değerini belirlemek için standartlara uygun olan iğnenin 25 derece sıcaklıkta, 100 gramlık ağırlık ile 5 saniye boyunca bitümlü bağlayıcı içerisine serbest bırakılır ve bitümlü bağlayıcı içine iğnenin batma miktarı penetrasyon değerini verir. Penetrasyon birimi 0,1 mm'dir (Şimşek 2022).



Şekil 23. Penetrasyon Deney Düzeneği

Yumuşama noktası deneyi

Yumuşama noktası deneyi TS EN 1427 ve ASTM D36 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Deneyin amacı bitümlü bağlayıcının yumuşama sıcaklığını belirlemektir. Yumuşama noktası deney düzeneği standart halkaların içine bitüm numunesi dökülür üzerine standart ağırlıkta bilyeler yerleştirilir. Daha sonra deney düzeneği 5 derecelik su banyosuna yerleştirilir ve dakikada beş derece ısıtılır. Deney numunesi düzeneğin tabanına değdiği zaman deney tamamlanmış olur.



Şekil 24. Yumuşama noktası deney düzeneği

Parlama noktası deneyi

Parlama noktası deneyi TS EN ISO 2592 ve TS 1171 standartlarına uygun olarak yapılmıştır. Deneyin amacı bitümün alevle teması sonucunda sürekli yanmadığı fakat bitüm buharının tutuştuğu sıcaklığı bulmaktır. Deneyin yapılabilmesi için bitümün belirli bir akışkanlıkta olması gerekir. Bunun için bitüm 140-170 dereceye kadar ısıtılır ve deney kabının çentikli bölümüne kadar bitüm doldurulur. Hazırlanana numune deney düzeneğine yerleştirilir. Deney esnasında dakikada 5-6 derece arasında sıcaklık artarak gözlem yapılır.



Şekil 25. Parlama noktası deney düzeneği

Taguchi yöntemi

Tam faktöriyel deney tasarımlarında bir faktör değiştirilirken diğer tüm faktörler sabit tutulur. Bu durum yapılması gereken deney sayısını artırır ve pratikte uygulanmasını olanaksız hale getirir. Ayrıca faktörler arası iç etkileşim mevcutsa, geleneksel deney tasarımına göre elde edilen en elverişli şartlar, gerçek en elverişli şartlar olmayabilir (Bayrak 2007). Taguchi kendi adıyla anılan deney tasarımında, geleneksel deney tasarımlarından farklı olarak, aynı anda birden fazla faktörün göz önünde tutulmasıyla daha az deney yapıp en elverişli sonuçların elde edilmesini sağlar (Dhannoon 2017).

Deneyler sonucunda alınan veriler kullanılarak S/N değerleri en büyük en iyi (the bigger the better) merkeze alınarak aşağıda verilen denklem yardımıyla hesaplama yapılmıştır (Bayrak 2002).

$$S/N_L = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{Y_i^2} \right]$$

Burada;

S/N_L : Performans istatistiği

n: Bir deney kombinasyonunda yapılan tekrar sayısı

Y_i : i. Deneyin performans istatistiği

S/N yi maksimum yapan parametreler en büyük en iyi yöntemine göre optimum kabul edilir fakat tagucci metodunda optimum yapan parametre seviyeleri deneyi yapılmamışsa optimum şartlara karşılık gelen parametre değeri aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır.

$$Y_t = \mu + X_i + e_i$$

Burada;

μ : performans değerinin genel ortalaması

X_i : deneydeki parametre – seviye kombinasyonunun sabit etkisi

e_i : i. Deneydeki rassal hata

Marshall deneyi

Marshall deneyi asfalt betonunda kullanılacak optimum bitüm miktarını ve asfalt karışımlarının stabilite ve akma değerlerini belirlemek için kullanılır. Asfalt karışımında kullanılacak dane boyutu dağılımı, agrega ve bitüm yüzdesi hesabı, biriketlerle ilgili hesaplar ve boşluk oranı tespiti için de Marshall deneyi kullanılır. Marshall cihazı numunenin dayanımının bittiği ana kadar yükleme yaparak hazırlanan numunenin deformasyon ve yükleme grafiklerini çizmektedir. Çizilen grafikler yorumlanarak numunenin akma ve stabilite değerleri belirlenir. Karışım tasarımları için dünyada kullanılan en yaygın yöntemdir. Marshall deneyinin avantajları sıralanacak olursa;

- Yapılan deneyde test cihazının numunenin bütününe gerilme uygulaması
- Deneyin uygulamasının hızlı ve kolay olması
- Deney esnasında kullanılacak malzemelerin taşınabilir olması
- Deney sonuçlarının gerçek sonuçlara yakın değerler ortaya koyması

Deneyin yapılışı:

1. Numunelerin hazırlanması: Numuneler oda sıcaklığında en az bir gece dinlendirilir ve uzunlukları ölçülür. Ardından, numunelerin havada, suda ve doygun-yüzey kuru ağırlıkları tartılır.
2. Numunelerin sıcaklığının ayarlanması: Numunelerin deney için uygun sıcaklığa getirilmesi için iki seçenek sunulmuştur.

- Su banyosu: Numuneler, 30-40 dakika su banyosunda bekletilerek uygun sıcaklığa getirilir.
 - Etüv: Alternatif olarak, numuneler 2 saat etüvde bekletilerek uygun sıcaklığa getirilebilir.
3. Sıcaklık ayarı: Asfalt betonlu marshall briketlerinin sıcaklıklarının sabit tutulması için 60 dereceye su banyosu ve etüvün sıcaklığı ayarlanır.
 4. Deney Marshall numunesinin çelik halkanın iki segmenti arasına yerleştirilmesiyle başlar. Ardından, numunenin üzerine bir akma ölçer konularak sıfırlanır. Yükleme işlemi dakikada 50.8 mm hızla başlar ve en yüksek yüke kadar devam eder. En yüksek yük ölçülür, akma ölçer boşaltılır ve numunenin akma değeri kaydedilir.
 5. Marshall biriketin su banyosundan çıkarılmasıyla, en yüksek yükün belirlenmesi arasında geçen zaman 30 saniyeyi aşmamalıdır. Eğer marshall numunesinin yüksekliği 63.5 mm'den farklı ölçülür ise, Marshall Stabilite düzeltme katsayıları kullanılarak yüke düzeltme faktörü uygulanır.
 6. Deney sırasında, üst segman sabitken alt segmanın yükleme hızı 50.8 mm/dk olarak belirlenmiştir. Basınç değeri yükseldikçe, stabilometrede görülen değer artar, en yüksek seviyesine ulaşır ve daha sonra azalmaya başlar, sonunda Marshall numunesi kırılır. Bitümlü karışımın stabilitesini belirlemek için stabilometrede görülen en yüksek değer kullanılır. Bu değer, toplam yük miktarına denk gelen "Marshall Stabilitesi" olarak adlandırılır.
 7. Çökme veya hareket miktarı kırılma anında ölçülür, çıkan değere "Akma" denir. Marshall stabilite deneyi ile ayrıca hazırlanan numunelerin, boşluk oranı, birim ağırlığı, bitüm ve agregası karışımının agregası boşluğu oranı hesaplanır.(Umar ve Agar, 1985).

Marshall Karışım Tasarımı, bir dizi işlemi içerir. İlk olarak, uygun agregası seçilir ve ardından bitüm belirlenir. Sonrasında, numuneler özenle hazırlanır ve yoğunluk ile hava boşluğu değerleri belirlenir. Daha sonra, Marshall Stabilometresi kullanılarak stabilite ve akma değerleri ölçülür. Son adımda ise, optimum bitüm miktarı titizlikle belirlenir.

Marshall stabilite deney numuneleri hazırlanırken; her bir briket için 1150 gram agregası kullanılır ve agregası ağırlığının %3,5 %4 %4,5 %5 %5,5 %6 %6,5 oranda bitüm kullanılarak 7 set Marshall numunesi düzenlenir. Farklı bitüm oranlarındaki setler için en az üç marshall biriketi hazırlanır. Bitüm yüzdesi iki farklı şekilde belirlenir. Bunlar karışımındaki

bitümün ağırlıkça yüzdesi ve agrega ağırlığına göre bitüm yüzdesidir. Deney numuneleri yüksekliği 63.5 ± 1.27 mm olmalıdır.

Marshall deney numuneleri hazırlanırken aşağıdaki işlem sırası takip edilir:

1. Farklı bitüm oranlarındaki her set için üçer numune hazırlanır. Her set için önceden hesaplanmış oranlarda granülometriye sahip agrega tartılır ve karıştırılır. Ardından, 1150 gram agrega karışımı, her biri farklı kaplara yerleştirilir ve etüvde 24 saat süreyle 165 derecede tutulur.
2. Deneyde kullanılacak bitümde etüve yerleştirilip 165 dereceye getirilir.
3. Deneyde kullanılacak araç-gereç (spatula, kürek, briket kapları, vb.) 165 °C'lik etüvde ısıtılır.
4. Agrega, ısıtılmış karıştırma kabına 160 °C'ye kadar ısıtılarak aktarılır ve homojen bir şekilde karıştırılır. Sonrasında, hazırlanan agreganın ortasında çukur açılarak deney grubuna uygun olan miktarda bitüm eklenir.
5. Hazırlanan agrega bitüm karışımı homojen olarak karışması için mikser yardımıyla karıştırılır.
6. Hazırlanan karışım kalıba aktarılır. Kalıp içerisindeki karışım 45,7 cm yükseklikten düşen 4,536 kg ağırlığındaki sıkıştırma tokmağıyla 75 vuruş yaparak sıkıştırılır. Daha sonrasında, kalıp ters çevrilerek numunenin diğer yüzüne de aynı işlem uygulanır.
7. Sıkıştırılmış olan numunelere tek tek numara verilir ve kalıptan çıkartılırken bozulma olmaması için soğumaya bırakılır.
8. Soğutma işlemi sonrasında ise kriko yardımıyla numuneler kalıptan çıkartılır ve düz bir yüzeye konulur. Soğuması için bir gece bekletilir.



Şekil 26. Kalıplanmış numuneler

Briketlerin yüksekliği 63,5 mm'dir ve bu yükseklik standart olarak dayanım değerlendirmesi için kullanılır. Standart briket yüksekliğine denk gelen katsayı 1 olarak kabul edilir. Ancak, briket yüksekliği 63,5 mm'den farklıysa kat sayı yardımıyla düzeltme uygulanır. Briketin stabilitesi ile briketin yüksekliğine bağlı olarak değişen katsayının çarpımı, 63,5 mm yüksekliğindeki standart brikete göre düzeltilmiş stabilite değerini verir.

Marshall deneyinde, her biriketten üç ayrı değer okunur. Bulunan değerlerin ortalaması alınarak numune yüksekliği olarak belirlenir. Bulunan tüm değerler not edilir.

Marshall briketinin hacmi hesaplanırken, doğgun yüzey-kuru ağırlığından, sudaki ağırlığı çıkarılır. İlk olarak, briketler havada tartılır ve ağırlıkları kaydedilir. Daha sonra, numune su havuzuna konulur ve su içindeki ağırlığı ölçülür. Suyu doğgun hale gelen numune sudan çıkartıldıktan sonra, sadece yüzeyindeki su kurulanır ve doğgun yüzey-kuru ağırlığı tartılıp kaydedilir. Numunenin hacmi; doğgun yüey kuru ağırlığından, numunenin sudaki ağırlığının çıkarılması ile bulunur.

Marhall numunelerinin hava boşluğu değerlerini ve yoğunluğunu bulmak için, kalıplardan çıkarılan numunelerin boyutları ve çapları kumpas kullanılarak ölçülür. Böylece numunelerin kuru ağırlık ile doğgun yüzey kuru ağırlık değerleri belirlenir. Sonrasında, numunelerin hacimleri tartılır ve hesaplanır. Bu hesap sonucunda, Marshall tablosu yardımıyla Marshall numunelerinin yoğunluk ve boşluk oranları hesaplanır.

$$G_{mb} = \frac{A}{B-C}$$

Burada:

G_{mb} = Sıkıştırılmış numunenin özgül ağırlığı

A = Kuru numunenin havadaki ağırlığı (g)

B = Numunenin kuru yüzey doğgun ağırlığı (g)

C = Sudaki numunenin ağırlığı (g)

Karışımın maksimum özgül ağırlığı ASTM D2041/D2041M-11 standartlarına göre aşığıdaki denklem yardımıyla hesaplanmaktadır:

$$G_{mm} = \frac{A}{A-(B-C)}$$

Burada:

G_{mm} = Maksimum özgül ağırlık

A = Gevşek karışımın havadaki ağırlığı (g)

B = Su doldurulmuş piknometre ve gevşek karışımın ağırlığı (g)

C = Su dolu piknometrenin ağırlığı (g)

İçerisinde farklı oranlarda bitüm bulunan karışımların en yüksek özgül ağırlıklarının hesaplanmasını belirlenen bitüm yüzdesi için Gmm değerinin bilinmesi sağlamaktadır. Agregaya yığınının efektif özgül ağırlığı belirlidir, bitüm emme potansiyeli içeriğindeki bitüm miktarına bağlı değildir. Agregaya efektif özgül ağırlığı (Gse) aşağıdaki denklemle hesaplanır:

$$G_{se} = \frac{P_{mm} - P_b}{\left(\frac{P_{mm}}{G_{mm}}\right) - \left(\frac{P_b}{G_b}\right)}$$

Burada:

P_{mm}: gevşek karışımın toplam yüzdesi = 100

P_b: Karışım içerisindeki asfalt yüzdesi

G_{mm}: Karışımın maksimum özgül ağırlığı

G_b: Bitüm özgül ağırlığı

Herhangi bir bitüm yüzdesi ile hazırlanan karışımın maksimum özgül ağırlığı (Gmm) aşağıdaki denklem yardımıyla hesaplanır:

$$G_{mm} = \frac{P_{mm}}{\left(\frac{P_s}{G_{se}}\right) + \left(\frac{P_b}{G_b}\right)}$$

Burada:

P_s: Karışımındaki agregaya yüzdesi

G_{se}: Agregaların efektif özgül ağırlığı

Sıkıştırılmış BSK içeriğindeki bitümle kaplanmış agregaların arasında meydana gelen hava kabarcıklarına, hava boşluğu denir. Asfalt kaplamanın içerisindeki hava boşluğu ile kaplama durabilitesi ve yoğunluğu birbiriyle ilişkilidir. Bitümlü sıcak karışımlarda yoğunluk arttıkça, hava boşluğu azalır. Karışım içerisindeki toplam hava boşluğu oranı (VTM) denklem yardımıyla bulunur:

$$VTM = \frac{G_{mm} - G_{mb}}{G_{mm}} \times 100$$

Burada:

VTM = Karışım toplam hava boşluk oranı

G_{mm} = Karışım maksimum özgül ağırlık

G_{mb} = Sıkıştırılmış numune özgül ağırlığı

Mineral agregalar arasındaki boşluk, sıkıştırılmış karışımın agregalarının tanecikleri arasındaki boşluk alanı hacmidir. VMA bitümlü sıcak karışımın durabilitesini etkileyen çok

önemli bir parametredir. VMA, bitüm ve hava boşluğu ile dolu olan alanların tümünü kapsamaktadır ve karışımın toplam hacminin bir yüzdesi olarak ifade edilmektedir. VMA aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$VMA = 100 \left[1 - \frac{G_{mb} (1 - P_b)}{G_{sb}} \right]$$

Burada:

VMA = Mineral agregalar arasındaki boşluk yüzdesi

Gsb = Agregaların karışımının özgül ağırlığı

Gmb = Sıkıştırılmış numunenin özgül ağırlığı

Pb = Karışımındaki asfalt yüzdesi

Sıkıştırılmış olan karışım içerisindeki agregaların parçacıkları arasındaki bitümle dolu boşluk ifade etmektedir. Karışımın içindeki VFA ihtiyacının amacı, mineral agregalar arasındaki en yüksek boşluğu ve buna bağlı olarak asfalt içeriğini sınırlamaktır. VFA yüzdesi şöyle hesaplanır:

$$VFA = \frac{VMA - VTM}{VMA} \times 100$$

Burada:

VFA = Karışımındaki bitüm ile dolu boşluk (%)

VMA = Mineral agregalar arasındaki boşluk (%)

VTM = Toplam karışımın boşluk oranı

Marshall stabilometresi ile akma ve stabilite sonuçları tespit edilir. Numunenin düşey deformasyonuna akma değeri eşdeğerdir. Cihazdan okunan değerler not alınır. Stabilite ölçümü, 63,5 mm yüksekliğe sahip numuneler için doğru sonuçlar verir, ancak farklı boyutlarda bulunan her bir numune için düzeltme faktörleri kullanılır. Stabilite ve akma değerleri bu düzeltme sonucunda şartnameye uygunluğu kontrol edilip incelenir.

Bütün hacimsel parametrelerin, stabilite ve akma değerlerinin belirleyerek optimum bitüm miktarı bulunmaya başlanır. bulunan bu değerlerden %4 hava boşlupuna karşılık gelen bitüm miktarı optimum bitüm miktarı olarak belirlenir. Asfalt yüzdesi ve boşluk oranı grafiğinde %4 boşluk sağlayan bitüm yüzdesinin etkisiyle oluşan VMA, VFA, stabilite ve akma değerlerinin şartnameye uygunluğu kontrol edilir. Tüm parametreler belirlenen sınırlar içindeyse, optimum bitüm miktarı bulunmuş olur. Karayolları Teknik Şartnamesi'nde yer alan Aşınma Tip-1 gradasyonu için Marshall stabilite deneyi kriterleri Tablo da bulunmaktadır.

Tablo 8. Marshall Stabilite Deneyi Kriterleri

Tasarım Kriteri	Deney Standartı	Aşınma Tip-1
Sıkıştırma, her bir yüzey için darbe sayısı	TS EN 12697-30	75
Stabilite (kg)	TS EN 12697-34	900
Boşluk (%)	TS EN 12697-8	3-5
VFA (%)	TS EN 12697-8	65-75
VMA (%)	TS EN 12697-8	14-16
Akma (mm)	TS EN 12697-34	2-4

Marshall stabilite deneyi için optimum bitüm oranı bulunurken aşağıdaki tabloda bulunan denklemler kullanılır.

Tablo 9. Optimum Bitüm Yüzdesi İçin Formül Tablosu

Kısaltma	Açıklama	Formül
<u>Wa</u>	Agregaya göre seçilen bitüm %'si	$Wa = (WB/WA) \times 100$
<u>Wb</u>	Karışıma göre seçilen bitüm %'si	$Wb = [(WB/WA + WB)] \times 100$
<u>WA</u>	Toplam agregaya ağırlığı (1150gr)	
<u>WB</u>	Bitüm ağırlığı (agregaya göre)	
<u>Whava</u>	Havadaki kuru ağırlık	Tartımlar sonucu elde edilen değerler
<u>Wsu</u>	Sudaki ağırlık	Tartımlar sonucu elde edilen değerler
<u>Wdoygun</u>	Doygun-yüzey kuru ağırlık	Tartımlar sonucu elde edilen değerler
<u>V</u>	Numunenin hacmi	$V = Wdoygun - Wsu$
<u>Dp</u>	Numunenin pratik hacim özgül ağırlığı	$Dp = Whava / V$
<u>Dport</u>	Numunelerin ort. pratik hacim özgül ağırlığı	$Dport = (Dp1 + Dp2 + Dp3) / 3$
<u>Dt</u>	Numunenin Teorik Max. özgül ağırlığı	$Dt = 100 / [(100 - Wb/Gse) + (Wb/Gb)]$
<u>Vh</u>	Numunedeki boşluk yüzdesi	$Vh = [(Dt - Dport) / Dt] \times 100$
<u>Vb</u>	Numunedeki efektif bitüm hacmi %'si	$Vb = (Pbe \times Dport) / Gb$
<u>Va</u>	Numunedeki agregaya hacmi %'si	$Va = 100 - (Vh + Vb)$
<u>Vma</u>	Agregalar arasındaki boşluk %'si	$Vma = 100 - Va = (Vh + Vb)$
<u>Vfa</u>	Vma'nın bitümle dolu boşluk %'si	$Vfa = (Vb / Vma) \times 100$
<u>Pbe</u>	Agrega ağırlığına göre efektif bitüm %'si	
<u>Gsb</u>	Agrega hacim özgül ağırlığı	$Gsb = 100 / [(\%K / Gk-h) + (\%I / Gi-h) + (\%F / Gf-z)]$
<u>Gsa</u>	Agrega zahiri özgül ağırlığı	$Gsa = 100 / [(\%K / Gk-z) + (\%I / Gi-z) + (\%F / Gf-z)]$
<u>Gse</u>	Agrega efektif özgül ağırlığı	$Gse = (Gsb + Gsa) / 2$
<u>%K</u>	Karışımındaki kaba agregaya %'si	
<u>%İ</u>	Karışımındaki ince agregaya %'si	
<u>%F</u>	Karışımındaki filler %'si	

ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, geri kazanılmış bitüm, atık trafo yağı ve kenevir tohumu yağı farklı sıcaklıklarda, 30 dakikalık sabit sürede ve 3000 rpm sabit karıştırma hızında, 70/100 penetrasyonlu saf bitüm ile taguchi metoduna göre belirlenen parametrelerde karıştırılarak numuneler elde edilmiştir. Elde edilen bitüm numunelerinin kimyasal ve fiziksel özellikleri, yapılan penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası ve marshall stabilite deneyleri ile araştırılmıştır.

Numunenin Hazırlanması

Deneyler taguchi metodu L9 ortogonal dizisi parametre ve seviyeleri dikkate alınarak tasarlanmıştır. Tabloda verilen değerler kullanılarak 9 farklı numune hazırlanmıştır.

Tablo 10. Karışım Parametreleri

Deney No	Atık Trafo Yağı (%)	Kenevir Tohumu Yağı (%)	Geri Kazanılmış Bitüm (%)	Sıcaklık (°C)
1	0	0	0	150
2	0	0.5	20	165
3	0	1	40	180
4	0.5	0	20	180
5	0.5	0.5	40	150
6	0.5	1	0	165
7	1	0	40	165
8	1	0.5	0	180
9	1	1	20	150

Penetrasyon Deneyi ve Sonuçları

Karışım parametrelerine göre hazırlanan bitüm iki ayrı penetrasyon kalıbına dökülmüş ve iki ayrı numune hazırlanmıştır. Bu numuneler 25°C olan su banyosunda 1,5 saat bekletildikten sonra alınarak deneye tabi tutulmuştur. Numunelerde üç farklı okuma yapılmıştır. Deneylerden elde edilen penetrasyon değerleri ve L9 ortogonal dizisine göre Taguchi Yöntemi ile hesaplanan S/N değerleri Tablo 11’de verilmiştir. Penetrasyon değerini maksimum yapan en büyük en iyi performans istatistiği kullanılmıştır.

Tablo 11. Penetrasyon Deney Sonuçları ve S/N Değerleri

Deneyler	1.Okuma (0,1 mm)	2.Okuma (0,1 mm)	3.Okuma (0,1 mm)	Ortalama (0,1 mm)	S/N
1	76,8	76,4	76,7	76,63	37,688
2	55,4	57,5	58,9	57,27	35,159
3	46,4	39,4	43,4	43,07	32,683
4	58	54,2	57	56,40	35,026
5	60,3	58,5	58,5	59,10	35,432
6	94,2	95,2	95,3	94,90	39,545
7	71,6	65,5	66,6	67,90	36,637
8	84	84	84,7	84,23	38,509
9	84,6	83,3	84,1	84,00	38,486

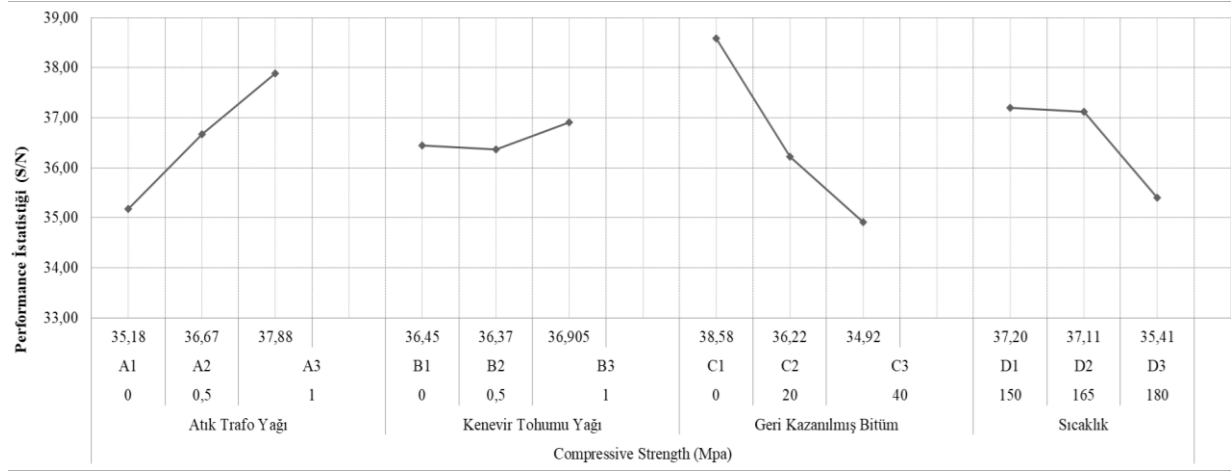
Tablo 12. Penetrasyon Ortalama S/N Etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	Atık Trafo Yağı	Kenevir Tohumu Yağı	RAP	Sıcaklık
1.Seviye	35,177	36,45	38,581	37,202
2.Seviye	36,668	36,367	36,224	37,114
3.Seviye	37,877	36,905	34,917	35,406

Penetrasyon için optimum seviyeler Tablo 13 te verildiği üzere A3, B3, C1 ve D1 olarak bulunmuştur. Optimum şartlarda beklenen penetrasyon değeri 106,035, bu değer beklenen S/N değeri 40,509 dur. Penetrasyona en yüksek etkiye sahip parametreler sırasıyla geri kazanılmış bitüm, atık trafo yağı, sıcaklık ve kenevir tohumu yağı olmuştur. Sonucu doğrulamak amacıyla ilgili değerler dikkate alınarak doğrulama deneyi yapılmıştır. Yapılan deney sonucunda 97 (0,1mm) penetrasyon değeri bulunmuştur. Bu penetrasyon değerinin S/N karşılığı 39,735 olup bu sonuç %95 güven aralığında 39,682 / 41,336 değerleri arasında çıkmıştır. Bu sonucun güven aralığında kaldığı görülmektedir.

Tablo 13. Penetrasyon Performans Tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N'e olan katkıları
Atık Trafo Yağı	A3	1,0303
Kenevir Tohumu Yağı	B3	0,331
RAP	C1	2,007
Sıcaklık	D1	0,628
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		4,269
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		36,574
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N)/(0,1mm)		40,509 / 106,035
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (0,1mm)		39,735 / 97
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		39,682 / 41,336



Şekil 27. Penetrasyon istatistikleri

Karışım içerisindeki geri kazanılmış bitüm oranı arttıkça bitümün penetrasyon değeri azalmış, kenevir tohumu yağı ve atık trafo yağı katkıları arttıkça penetrasyon değeri yükselmiştir.

Yumuşama Noktası Deneyi ve Sonuçları

İlk olarak, yumuşama noktasının belirlenmesi amacıyla alınan iki numune, 5°C'ye soğutulularak numunelerin deney sıcaklığı ayarlanmıştır. Katkısız bitümün yumuşama noktası 45,95°C olarak belirlenmiştir. Penetrasyon deneyine göre, atık trafo yağı ve kenevir tohumu yağının ilavesi bitümün yumuşamasına neden olmakta, geri kazanılmış bitüm ilavesinin ise bitümün yumuşama noktasını azalttığı görülmektedir. Yumuşama noktası sonuçları ve S/N değerleri Tablo 14 de görülmektedir. S/N değerleri hesaplanırken yumuşama noktası deney sonuçlarını en küçük sonuçlar verecek şekilde en küçük en iyi performans istatistiği seçilmiştir.

Tablo 14. Yumuşama Noktası Deneyi Sonuçları

Deney No:	1.Bilye(°C)	2.Bilye(°C)	Ort. Yumuşama(°C)	S/N
1	45,9	46	45,95	-33,246
2	48,4	49,5	48,95	-33,795
3	55,4	56,3	55,85	-34,94
4	48,9	49,3	49,1	-33,822
5	51,9	52,1	52	-34,32
6	44	44,1	44,05	-32,879
7	49	50,2	49,6	-33,91
8	44,8	45,5	45,15	-33,093
9	45,1	45,2	45,15	-33,093

S/N sonuçları bulunduktan sonra yumuşama noktası optimum seviyesini bulmak için hesaplanan ortalama S/N sonuçları Tablo 15’de verilmiştir.

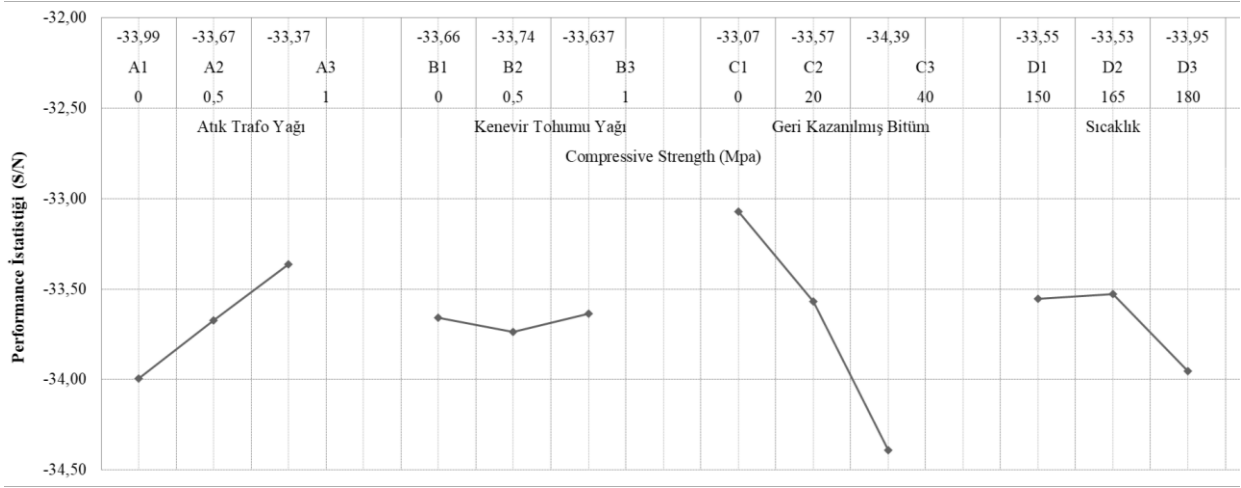
Tablo 15. Yumuşama Noktası Ortalama S/N Etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	Atık Trafo Yağı	Kenevir Tohumu Yağı	RAP	Sıcaklık
1.Seviye	-33,994	-33,659	-33,073	-33,553
2.Seviye	-33,674	-33,736	-33,57	-33,528
3.Seviye	-33,365	-33,637	-34,39	-33,952

Yumuşama noktası için optimum seviyeler Tablo 16 da görüldüğü üzere A3, B3, C1 ve D2 olarak bulunmuştur. Yumuşama noktası üzerinde en etkili parametre 0,605 değeri ile C1 katkı maddesi geri kazanılmış bitüm olmuştur. Bunu 0,313 değeri ile atık trafo yağı, 0,150 değeri ile sıcaklık ve 0,041 değeri ile kenevir tohumu yağı izlemiştir. Optimum şartlarda beklenen değer 42,72 bunun S/N değeri -32,613 tür. Doğrulama deneyi sonucu 43,4 bulunmuştur bu sonucun S/N değeri -32,751 bu sonuçlar % 95 güven aralığında -32,765 / -32,461 değerleri arasında kaldığı görülmüştür.

Tablo 16. Yumuşama Noktası Performans Tahminleri

Faktörler	Seviye	S/N'e olan katkıları
Atık Trafo Yağı	A3	0,313
Kenevir tohumu yağı	B3	0,041
RAP	C1	0,605
Sıcaklık	D2	0,15
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		1,109
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		-33,678
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N)/(°C)		-32,613 / 42,72
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (°C)		43,4 / -32,751
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		-32,765 / -32,461



Şekil 28. Yumuşama noktası istatistikleri

Karışım içerisindeki geri kazanılmış bitüm oranı arttıkça bitümün yumuşama noktası değeri azalmış, kenevir tohumu yağında ise gözle görülür bir değişiklik olmamış olup ve atık trafo yağı katkıları arttıkça yumuşama noktası değeri yükselmiştir.

Marshall Deneyi Sonuçları

Karışımında kullanılan optimum bitüm oranını belirlemek için agrega miktarı sabit tutularak agrega ağırlığının %3,5 ila %6,5 oranında bitüm eklenmiş ve her karışım için üç numune dökülmüştür. Toplamda 21 adet numune hazırlanmıştır. Marshall stabilite testine tabi tutulan numunelerin stabilite ve akma sdeğerleri belirlenmiş ve aşağıdaki tabloda verilmiştir. Şekil 29 ve Şekil 34 deki grafiklerden yararlanılarak gerekli hesaplamalar yapılmış olup boşluk oranının %4 karşılık geldiği ve stabilitenin en yüksek olduğu değerin bitüm oranının %4,61 olduğu görülmüştür.



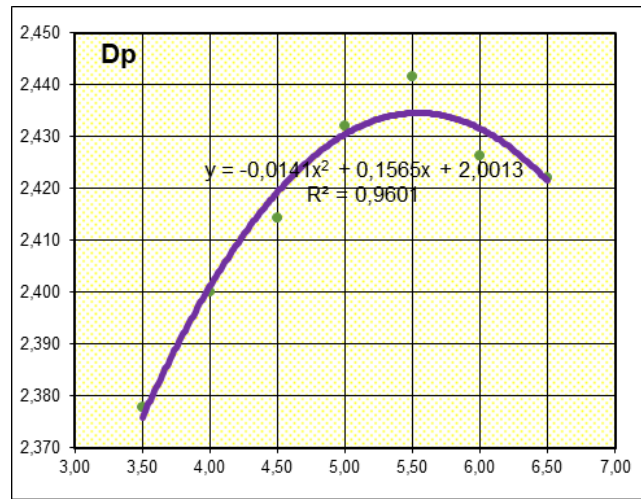
Şekil 29. Marshall numuneleri

Tablo 17. Marshall Stabilité Tablosu

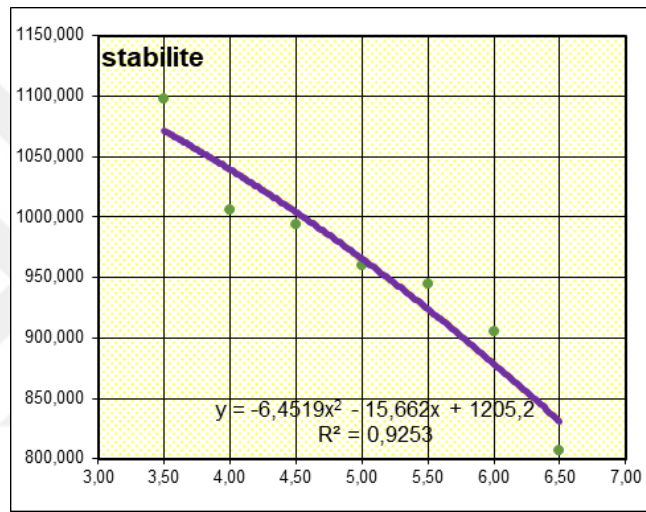
No	BITÜM		Sıcaklık °C	YÜKSEKLİKLER,mm				Havada Ağırlık,g		Sudaki Ağırlık,g		Doy.Yüz Ağırlık,g	Hacim cm³	Hacim Özg. Ağırlı Dp	Maks. Teo. Özgü. Ağ. Dt	% Boşluk Vh	% V.M.A	Asf. Dol Boşluk Vf	Akma mm	Stabilite kg	Düz. lim. Faktörü	Düz. lim kg	MQ					
	Wa,%	g		1	2	3	ortim	A	C	B	V																	
1	3,50	40,3	160	63,1	63,1	62,9	63,0	1181,8	694,2	1190,4	496,2	2,382							2,23	1171	1,011	1184	530,856					
2	3,50	40,3	160	63,6	63,3	63,5	63,5	1185,5	692,7	1194,5	501,8	2,362							2,02	1065	0,999	1064	526,498					
3	3,50	40,3	160	62,8	63,0	63,1	63,0	1182,3	692,5	1187,4	494,8	2,389							2,09	1031	1,013	1044	499,739					
4	4,00	46,0	160	62,0	62,4	62,6	62,3	1183,9	691,3	1186,8	495,5	2,389			2,563	7,22	14,75	51,0	2,11				1097	519,21				
5	4,00	46,0	160	62,2	62,1	62,1	62,1	1186,2	692,7	1188,7	496,1	2,391							2,50	956	1,030		984	393,415				
6	4,00	46,0	160	62,0	62,2	62,4	62,2	1186,5	691,7	1182,3	490,3	2,420							2,12	940	1,035		973	459,146				
																			2,72	1027	1,033		1061	390,028				
7	4,50	51,8	160	62,3	63,2	63,4	63,0	1195,8	696,8	1197,3	500,3	2,390			2,545	5,68	14,37	60,5	2,45				1006	411,308				
8	4,50	51,8	160	61,5	61,3	61,2	61,3	1191,2	701,2	1192,5	491,4	2,424							2,78	831	1,013		841	302,585				
9	4,50	51,8	160	61,5	61,1	61,4	61,3	1189,7	701,1	1190,7	489,8	2,429							2,55	1039	1,058		1100	431,259				
																			2,66	983	1,058		1040	391,153				
10	5,00	57,5	160	61,5	61,3	61,6	61,5	1192,3	703,4	1193,7	490,5	2,431			2,526	4,43	14,26	68,9	2,66				994	373,137				
11	5,00	57,5	160	61,3	61,4	61,7	61,5	1187,6	699,8	1188,6	488,8	2,429							2,81	950	1,054		1002	356,357				
12	5,00	57,5	160	61,5	61,2	61,4	61,4	1192,1	703,5	1192,8	489,3	2,436							3,64	845	1,055		892	244,985				
																			3,16	932	1,057		985	311,725				
13	5,50	63,3	160	60,8	60,8	61,0	60,9	1194,2	706,7	1194,5	488,0	2,447			2,509	3,05	14,05	78,3	3,21				960	299,415				
14	5,50	63,3	160	60,8	60,7	61,1	60,9	1192,6	704,5	1192,9	488,2	2,443							4,39	905	1,073		971	221,27				
15	5,50	63,3	160	61,1	61,2	61,2	61,2	1192,5	703,6	1193,4	489,6	2,435							3,85	860	1,073		923	239,759				
				61,1	61,2	61,2	61,2	1192,5	703,6	1193,4	489,6	2,435							4,38	884	1,063		940	214,491				
16	6,00	69,0	160	60,7	60,4	60,5	60,5	1180,6	696,6	1181,2	484,6	2,436			2,492	2,00	14,12	85,8	4,21				945	224,538				
17	6,00	69,0	160	61,6	61,6	61,3	61,5	1195,1	703,3	1195,7	492,4	2,427							4,41	832	1,083		900	204,177				
18	6,00	69,0	160	62,0	62,5	61,7	62,1	1195,4	701,7	1196,6	494,9	2,416							4,63	904	1,054		953	205,938				
																			4,47	831	1,038		863	193,042				
19	6,50	74,8	160	62,1	62,0	62,3	62,1	1203,9	707,4	1204,4	497,0	2,4			2,475	1,96	15,06	87,0	4,50				906	201,096				
20	6,50	74,8	160	61,8	62,1	61,7	61,9	1200,3	705,5	1200,7	495,2	2,424							4,31	747	1,035		773	179,287				
21	6,50	74,8	160	61,3	61,6	61,3	61,4	1191,5	699,4	1191,6	492,2	2,421							4,74	769	1,044		802	169,229				
				61,3	61,6	61,3	61,4	1191,5	699,4	1191,6	492,2	2,421							4,34	800	1,055		844	194,522				
												2,422	2,458		1,47	15,61		90,6	4,46				806	180,879				
														ŞARTNAME ŞARTLARI (4-6)				(13-15)		(60-75)		(2-4)		max1.4		min750		

Tablo 18. Optimum Bitüm Değeri Marshall Stabilité Tablosu

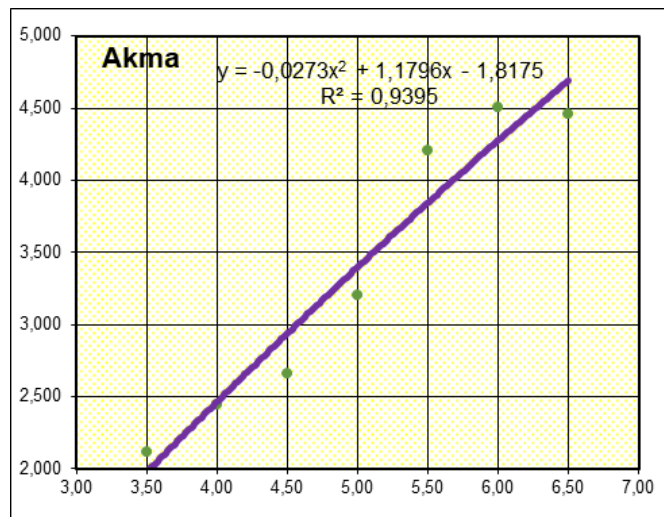
No	Bitüm		Sıcaklık °C	Yükseklikler,mm							Havada Ağırlık,g	Sudaki Ağırlık,g	Doy.Yüz. Ağırlık,g	Hacim cm³	Hacim Özg.Ağırlık Dp	Maks.Teo. Özgül Ağ. Dt	% Boşluk Vh	% V.M.A	Asf.Dol Boşluk Vf	Akma mm	Stabilite kg	Düzltm. Faktörü	Düzeltilen Stabilite kg	MQ											
	W _a ,%	g		1	2	3	ortm																												
1A	4,61	53,0	160	61,4	61,3	61,3	61,3	61,3	62,6	1183,6	695,0	1185,7	490,7	2,412	2,476	2,85	12,04	76,4	3,14	3,52	1618	1,058	1712	486,4049											
	4,61	53,0	160	61,7	61,6	61,2	61,5	62,4	1180,5		692,2	1183,3	491,1	2,404		2,95	1309	1,053	1379		467,4254														
	4,61	53,0	160	60,7	61,6	60,7	61,0	62,3	1165,8		682,3	1167,8	485,5	2,401		2,95	1258	1,068	1344		455,6596														
2A	4,61	53,0	160	62,5	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	1172,1	685,4	1180,5	495,1	2,367	2,476	4,36	13,41	67,5	3,03	3,03	1156	1,030	1030	339,8023											
	4,61	53,0	160	62,5	62,4	62,3	62,4	62,4	1180,5		685,9	1181,2	495,3	2,368		2,52	1028	1,028	1057						398,404										
	4,61	53,0	160	62,3	62,4	62,3	62,3	62,3	1174,7		686,3	1182,2	495,9	2,369		4,22	1064	1,030	1096						419,3249										
3A	4,61	53,0	160	62,3	62,3	62,3	62,3	62,3	62,3	1166,9	680,0	1173,8	493,8	2,363	2,476	4,36	13,41	67,5	3,03	3,03	1156	1,030	1030	350,3696											
	4,61	53,0	160	62,5	62,6	62,6	62,6	62,6	1180,7		688,0	1187,2	499,2	2,365		3,76	1154	1,023	1181						314,1104										
	4,61	53,0	160	62,8	62,8	62,8	62,8	62,8	1175,4		684,7	1182,6	497,9	2,361		2,19	1051	1,017	1069						487,9444										
4A	4,61	53,0	160	62,5	62,6	62,6	62,6	62,6	62,6	1181,1	687,2	1186,7	499,5	2,365	2,476	4,57	13,60	66,4	3,12	3,12	1002	1,023	1026	368,0118											
	4,61	53,0	160	62,0	62,2	62,1	62,1	62,1	1183,4		692,5	1188,2	495,7	2,387		3,36	1182	1,036	1224						304,3121										
	4,61	53,0	160	61,2	61,0	61,1	61,1	61,1	1162,4		681,0	1165,7	484,7	2,398		2,42	1054	1,065	1122						463,7752										
5A	4,61	53,0	160	61,6	61,6	61,5	61,5	61,6	61,6	1187,5	696,1	1189,0	492,9	2,409	2,476	3,75	12,85	70,8	3,05	3,05	1297	1,051	1363	328,4799											
	4,61	53,0	160	61,9	62,0	61,9	61,9	61,9	1179,7		690,6	1183,1	492,5	2,395		3,82	1305	1,041	1358						355,4698										
	4,61	53,0	160	61,9	61,8	61,7	61,8	61,8	1181,8		691,1	1184,1	493,0	2,397		4,16	1263	1,045	1319						317,144										
6A	4,61	53,0	160	61,0	61,1	61,0	61,0	61,0	61,0	1184,2	697,5	1185,5	488,0	2,427	2,476	3,05	12,22	75,0	4,04	4,04	1489	1,067	1589	333,0919											
	4,61	53,0	160	61,1	61,0	61,0	61,0	61,0	1181,3		691,9	1181,7	489,8	2,412		3,11	1489	1,067	1499						510,909										
	4,61	53,0	160	61,0	60,9	60,9	60,9	60,9	1184,0		698,0	1184,9	486,9	2,432		3,79	1400	1,070	1498						856,6691										
7A	4,61	53,0	160	62,1	62,2	61,8	62,0	62,0	62,0	1182,2	690,1	1186,2	496,1	2,4	2,476	2,13	11,39	81,3	2,88	2,88	1174	1,038	1219	530,2352											
	4,61	53,0	160	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0	1186,6		694,8	1189,2	494,4	2,400		2,97	1172	1,039	1218						357,4475										
	4,61	53,0	160	62,1	62,4	62,2	62,2	62,2	1179,1		688,9	1182,9	494,0	2,387		2,75	1205	1,032	1244						409,9749										
8A	4,61	53,0	160	61,3	61,6	61,4	61,4	61,4	61,4	1181,1	692,6	1183,6	491,0	2,390	2,476	3,48	12,61	72,4	3,04	3,04	1288	1,055	1227	403,0843											
	4,61	53,0	160	61,6	61,8	61,7	61,7	61,7	1176,5		684,4	1180,1	495,7	2,373		2,97	1288	1,055	1359						457,7178										
	4,61	53,0	160	61,8	61,8	61,8	61,8	61,8	1175,5		685,2	1178,8	493,6	2,381		2,37	1015	1,047	1064						448,7816										
9A	4,61	53,0	160	61,8	61,8	61,8	61,8	61,8	61,8	1175,5	685,2	1178,8	493,6	2,381	2,476	3,61	12,73	71,6	2,80	2,80	1047	1,045	1094	358,6887											
	4,61	53,0	160	62,9	63,0	63,0	63,0	63,0	1183,2		688,8	1188,3	499,5	2,4		3,28	1054	1,013	1172						419,1937										
	4,61	53,0	160	62,0	62,1	61,6	61,9	61,9	1181,2		691,3	1185,1	493,8	2,392		2,14	978	1,042	1067						325,4337										
9C	4,61	53,0	160	61,1	61,3	61,4	61,3	61,3	61,3	1168,7	682,1	1172,6	490,5	2,383	2,476					2,74	1086	1,060	1152	412,7974											
																										70,3	1079	394,4396							
				şartname sınırları										şartname sınırları																					
				(13-15)										(4-6)										(60-75)		(2-4)									
				max1.4																															
				min750																															



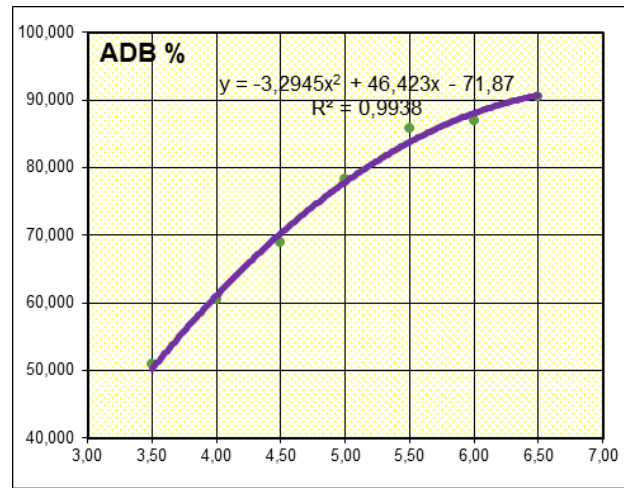
Şekil 30. Dp - Bitüm% grafiği



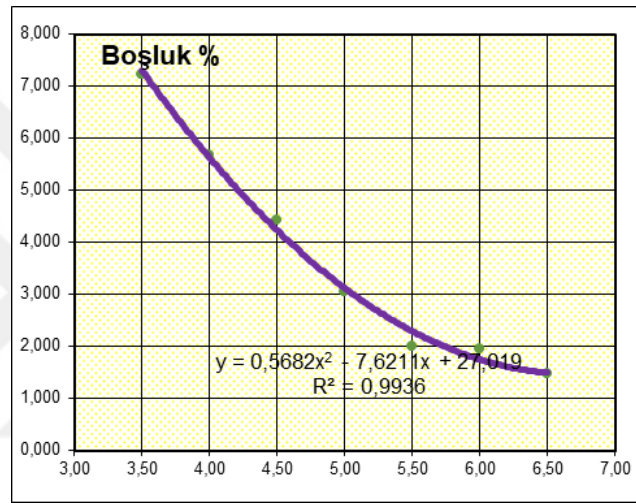
Şekil 31. Stabilité- Bitüm% si grafiği



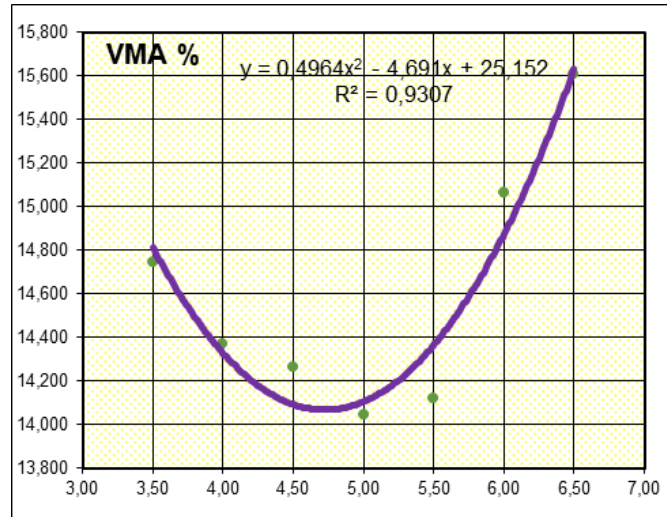
Şekil 32. Akma - Bitüm% grafiği



Şekil 33. ADB - Bitüm% grafiği



Şekil 34. Boşluk- Bitüm% grafiği



Şekil 35. VMA - Bitüm% grafiği

Taguchi Yöntemi ile elde edilen sonuçlar ve stabilite üzerindeki ortalama S/N etkileri aşağıdaki tabloda verilmiştir. En büyük en iyi performans istatistiği tercih edilerek stabiliteyi

maksimum yapan optimum seviyeler Tablo20 de bakıldığında A2, B1, C1, D1 olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan doğrulama deneyinin sonucunda 1455kg stabilite değeri elde edilmiştir. Bu sonuca karşılık gelen S/N değeri 63,257'tir. Bu değer %95 güven seviyesinde 62,906 ile 64,872 arasındadır. Stabiliteye etki eden en büyük faktör 1,048 değeri ile geri kazanılmış bitümün yaptığı anlaşılmaktadır. Bunu daha sonrasında atık trafo yağı, sıcaklık ve kenevir tohumu yağı sırasıyla takip etmiştir.

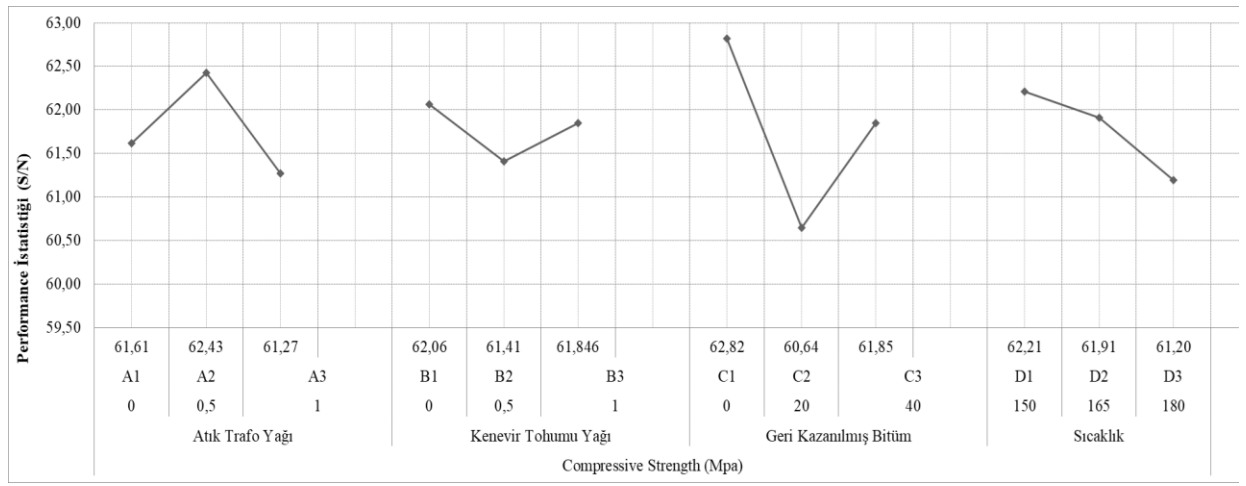
Tablo 19. Marshall Ortalama S/N Etkileri

Ortalama S/N Etkileri				
	Atık Trafo Yağı	Kenevir Tohumu Yağı	RAP	Sıcaklık
1.Seviye	61,614	62,062	62,82	62,213
2.Seviye	62,43	61,408	60,644	61,907
3.Seviye	61,272	61,846	61,852	61,195

Tablo 20. Marshall Performans Değerleri

Faktörler	Seviye	S/N'e olan katkıları
Atık Trafo Yağı	A2	0,658
Kenevir tohumu yağı	B1	0,29
RAP	C1	1,048
Sıcaklık	D1	0,441
Tüm Faktörlerin Katkısı (S/N)		2,437
Ortalama Performans İstatistiği (S/N)		61,772
Optimum Şartlarda Beklenen Değer (S/N)/(kg)		63,919 /1570,182
Doğrulama Deneyi Sonucu (S/N) / (kg)		63,257 / 1455
Güven Aralığı ($\alpha=95\%$) (S/N)		62,906 / 64,872

Stabilite bitümlü kaplamalarda bozulmalara karşı koyduğu en yüksek yükü; akma değeri ise bu yük değerine ulaştığında oluşan düşeyde meydana gelen bozulmayı belirtmektedir (Geçkil, AKSAĞAN, vd., 2021). Stabilite değeri atık trafo yağı katkı maddesinin %0,5 oranına kadar artmış, daha yüksek oranlarda ise azalmıştır. Kenevirde ise karışımda % 0.5 oranında azalmış olup, % 1 oranında katıldığında artış gözlemlenmiştir. Elde edilen stabilite değerlerinde saf bitümle hazırlanan numunenin stabilite değerinden daha yüksek olan stabilite değeri sadece 6 nolu deneyde görülmüştür. Bu deneyde geri kazanılmış bitüm kullanılmıyıp % 0.5 atık trafo yağı ve % 1 oranında kenevir tohumu yağı kullanılmıştır.



Şekil 36. Marshall istatistik grafiği

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmanın amacı geri kazanılmış bitümün, bitkisel yağ olan kenevir tohumu yağı ve atık bir yağ olan atık trafo yağı ile gençleştirilmesi ve yeniden yol inşaatında kullanımının incelenmesidir. Bununla birlikte bitümü modifiye etmek için kullanılan parametrelerin optimizasyonunu yapmaktır.

Bu tez çalışmasında, geri kazanılmış bitümün gençleştirilmesi ve yeniden kullanımı için kenevir tohumu yağı, atık trafo yağı ile etkisi araştırılmıştır. Modifiye edilen bitümün optimum atık trafo yağı ve kenevir tohumu yağı miktarını belirleyebilmek için Taguchi Optimizasyonu kullanılmıştır. Bu kullanımın amacı ise katkı oranının, karıştırma sıcaklığının, karıştırma süresinin ve karıştırma hızının optimum oluşumunu seçmektir. Kullanmış olduğumuz Taguchi metoduna göre üç farklı performans istatistik durumu vardır. Bunlar en büyük en iyi, en küçük en iyi ve nominal en iyidir. Yapmış olduğumuz çalışmada ise duruma göre penetrasyon deneyi ve marshall deneyinde en büyük en iyi, yumuşama noktası deneyinde en küçük en iyi performans istatistiği seçilerek sonuçlar elde edilmiştir.

Eğer bu çalışmada Taguchi Optimizasyonu kullanmamış olsaydık yapmış olduğumuz her bir deney için (penetrasyon, yumuşama noktası, parlama noktası, Marshall stabilitesi) 81 adet deney yapmış olmamız gerekecekti. Fakat Taguchi optimizasyonu kullanarak her bir deney için 9 deney yapılmıştır. Bu durumda ise toplamda $4 \times 9 = 36$ deney yapılarak optimum seviye seçilmiştir.

Çalışmada 70/100 penetrasyonlu saf bitüme, ağırlıkça %0, %0.5, %1 oranlarında atık trafo yağı ve kenevir tohumu yağına; ağırlıkça %0, %20, %40 oranlarında geri kazanılmış bitüm eklenmiştir. Modifiye bitümlerden 150°C, 165°C, 180°C sıcaklıklarda ve 30 dakikalık sabit sürede, sabit 3000 RPM karıştırma hızında olmak üzere toplamda 9 grup numune oluşturulmuş ve yapılan deneylerden ulaşılan sonuç ve değerlendirmeler aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

- Yapılan penetrasyon deneyinde artan yağ oranıyla penetrasyon değerinin arttığı ,geri kazanılmış bitüm oranı artırıldığında ise penetrasyon değerinin düştüğü gözlemlenmiştir.
- Geri kazanılmış bitümün olmadığı atık trafo yağı ve kenevir tohumu yağının bulunduğu 6 ve 8 nolu deneylerde;

6 nolu deneyde atık trafo yağı oranı % 0.5 ve kenevir tohumu yağı oranı ise % 1 iken penetrasyon değeri 94.90

8 nolu deneyde ise atık trafo yağı oranı % 1 ve kenevir tohumu yağı oranı ise % 0.5 iken penetrasyon değeri 84.23 çıktığı gözlemlenmiştir.

Yapılan Taguchi metoduna göre penetrasyon değerini maksimuma çıkaran optimum seviyeler sırasıyla A3, B3, C1 ve D1 olarak bulunmuştur. Penetrasyon sonuçları üzerinde en yüksek etkiye sahip parametreler sırasıyla geri kazanılmış bitüm, atık trafo yağı, sıcaklık ve kenevir tohumu yağı olmuştur. Karışım içerisinde geri kazanılmış bitüm seviyesi arttıkça penetrasyon değeri düşmüş, atık trafo yağı arttıkça penetrasyon değeri artmış, karıştırma sıcaklığı arttıkça penetrasyon değeri düşmüş ve kenevir tohumu yağı arttıkça penetrasyon değeri artmıştır. Yapmış olduğumuz deneylerde penetrasyon sonuçları 43,07- 94,90 (0,1mm) aralığında olduğu gözlemlenmiştir.

Bitümün test sıcaklığındaki kıvamının bir göstergesine penetrasyon denir. Sonuç olarak yüksek penetrasyon değerine sahip bitüm daha yumuşak veya daha akışkan olur, daha düşük penetrasyon değerine sahip bitüm ise daha sert veya daha viskozdur (Błażejowski vd., 2014). Soğuk iklim bölgelerinde çatlama ihtimaline karşı koymak amacıyla yüksek penetrasyon sonucuna sahip bağlayıcılar kullanılmaktadır. Daha sıcak iklim bölgelerinde ise tekerlek izi oluşma ihtimaline karşın düşük penetrasyon sonucuna sahip bağlayıcılar kullanılır (Mirza vd., 2011).

Yumuşama noktası deney sonuçlarının en küçük en iyi performans seviyeleri A3, B3, C1 ve D2 olarak bulunmuştur. Atık trafo yağı yumuşama noktası üzerinde artışa sebep olmuş, kenevir tohumu yağı %0,5 seviyesine kadar artmış %1 seviyesine kadar azalmış üç seviyenin sahip olduğu değerler arasında çok büyük bir fark gözlenmemiştir. Geri kazanılmış bitüm yumuşama noktası üzerinde azaltıcı etkiye sahip olurken, sıcaklık yumuşama noktası değeri üzerinde 150 derece ve 165 derece arasında hemen hemen hiç fark oluşmamış fakat 180 derece doğru yumuşama noktası değerlerinde azalma gözlenmiştir. Yapılan deneylerde yumuşama noktası değerleri 44,05 derece ile 55,85 derece değerleri arasında bulunmuştur.

Karayolları Genel Müdürlüğünün Bitümlü karışımlar laboratuvar çalışmaları modifiye bitüm fiziksel özelliklerine göre parlama noktası 220 dereceden yüksek çıkmıştır. Bu nedenle kenevir tohumu ve atık trafo yağıyla modifikasyonun güvenlik açısından bir sakınca görülmemiştir.

Marshall sonucunu maksimum çıkaran optimum seviyeler sırasıyla A2, B1, C1, D1 olduğu bilinmektedir. Marshall sonucu atık trafo yağı katkı maddesinin %0,5 oranına kadar artmış, daha yüksek oranlarda ise azalmıştır. Buna karşın kenevir tohumu yağında ise tam tersi durum gözlemlenmiştir % 0.5 oranına kadar azalmış olup daha yüksek oranlarda ise artış olduğu görülmektedir. Geri kazanılmış bitümde ise karışım içerisinde %20 seviyesine kadar

Marshall stabilite deęerlerinde dūřūře sebep olurken %40 oranına doęru ilerlerken ise artıř gōr÷lmektedir. Bu artıř %0 seviyesindeki Marshall stabilite deęerini geęmemiřtir. Karıřtırma sıcaklıęının artması marshll stabilite deęerinde dūřūře sebep olmuřtur. Yapılan deneylerde stabilite deęerleri 1030kg – 1529kg aralıęında bulunmuřtur.

Yapılan ön inceleme deneylerinde Atık trafo yağı ile kenevir tohumu yağı %7 oranında kullanılmıştır. Bu deneylerde %40 RAP kullnılmış ve RTFOT deneyi ile de yaşlandırılmıştır. Elde edilen sonuçlardan penetrasyon değerleri 200 1/cm değerinin üzerine çıktığı gōr÷lmüşt÷r. Bu sonuçlardan, yağların yukarıda verilen oranlarda kullanılmasının bit÷m÷ çok yumuşattığı dolayısıyla Marshall stabilitesini de dūř÷rd÷ę÷ tespit edilmiştir. Dolayısıyla kullanılan yaę oranları dūř÷r÷lerek yeniden tasarım yapılmıştır. Yapılan yeni tasarımdan elde edilen sonuçlara gōre, verilen deney tasarımında geri kazanılmış bit÷m÷m trafik hacmi fazla yolmayan yollarda kullanılabileceği dūř÷n÷lmektedir.

KAYNAKÇA

- Arapoğlu, A. S. (2015). *Bozulmuş asfalt kaplamaların geri dönüşüm maliyet analizi ve optimum geri kazanım mesafesinin araştırılması*. (Yüksek Lisans tezi). Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.
- ARRA, 2001, Asphalt Recycling and Reclaiming Association Basic Manual
- Asphalt Institute, The History of the Asphalt ,Annual Magazine 2002
- Avcı, E., 2009. Sıcak İklimli Bölgelerde Kullanılan Asfalt Betonu Karışım Değişkenlerinin Kaplama Tabakası Performansına Etkisi. Y.L. Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Bayrak, O.Ü., 2002. Uçucu Kül Ve Silis Dumanı İçeren Yol Betonu Karışımlarının Bazı Mekanik Özelliklerinin Taguchi Metodu İle Optimizasyonu. Y.Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bayrak, O.Ü., 2007. Rijit Üstyapı Tasarımına Yeni Bir Yaklaşım. Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- Bitümlü malzemeler laboratuvar el kitabı a.f.keçeciler g. Akkol a. Gümrükçüoğlu a.f.gökçe araştırma daire başkanlığı ankara 1988 sayfa 10
- California Department of Transportation, 2001. Felexible pavement rehabilitation manual, USA, 154
- Çetin, S., 2007. Afyon Karahisar Bölgesi Volkanik Kayaçlarının Sıcak Karışım Asfalt Kaplamalarında Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması, A.K.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Y.L. Tez. Afyon
- Çubuk, K., 1990. Use of reclaimed asphalt pavement as a bituminous base course, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Dhannoon H. A., (2017). Irak karayolları için Taguchi yöntemi kullanarak geri kazanım asfalt malzemeleri ile binder tabakası tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta
- Ed Kearney P. E, 2008, A carier In recycling, NYSDOT, Asfalt Enstitüsü, Gorman Bros. Inc., Wirtgen America Inc. ve Consultant Sunum: ARRA 32.Yıllık Toplantısı, Şubat 22,
- Ertaş, M.A., 2019, Asfalt Betonu Aşınma Tabakalarında Kazınmış Asfalt Kaplama MalzemelerininYeniden Kullnım Etkinliğinin ve Performansının Araştırılması, Y.L. Tezi, Aksaray
- Güngör, G., Orhan, F., Kaşak, S., Dost, Y., 2008, “Kazılmış Asfalt Kaplamaların Yeniden Kullanılması”. Ulaştırma Ve Altyapı Bakanlığı Karayolları Genel Müdürlüğü.
- Harold, R., Paul, P. E., Chris, P. E., 1995 Pavement distress, Technical Assistance Report, Louisiana Transportation Research Center, Louisiana, 12-16.
- <https://www.kgm.gov.tr/sayfalar/kgm/sitetr/kurumsal/yolagi.aspx>
- İlcalı, M., Eren, K., Özen, H., Sönmez, İ., Tayfur, S., 2001. Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT yayınları, İstanbul.
- İlcalı M, Tayfur S, Özen H, Sönmez İ, Eren K, 2001. Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT yayınları, İstanbul
- İlcalı, M., Tayfur,S., Özen, H., Sönmez ,K., 2001. Asfalt ve Uygulamaları,Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın Merkezi Başkanlığı,Seçil Ofset, 280, İstanbul.

- İnce, M. 2012, Asfalt kaplama yol üstyapılarında oluşan bozulmaların araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun
- Karcasu, M. 2016. Yol Üstyapı Deneyleri, Eskişehir.
- Kaya, B., 2011, Bitümlü Karışımların Geri Dönüşümü, Çevresel Etkileri ve Maliyet Analizi, Y.L Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul
- KGM, “Devlet ve İl Yolları Envanteri”,
- Kök B.V., Kuloğlu N., Yılmaz M., 2011, ‘Karayolu Esnek Üstyapı Malzemelerinin Geri Dönüşümünde Köpük Asfalt Yönteminin Kullanılması’, Y.L Tezi, Elazığ
- Kök, B.V., Yılmaz, M., Kuloğlu, N., 2012. Asfaltın Bitüm ve Bitümlü Sıcak Karışımların Mekanik Özelliklerine Etkisi. İMO Teknik Dergi, 2012(371), 5813-5826.
- Kurtis, K., 2003, “Asphalt and asphalt concrete”, Georgia Institute of Technology, Atlanta Georgia, 14-18.
- Mallick, B.R., 2005. Lecture notes, a 3-day workshop on recycling and other pavement rehabilitation methods, IIT Kanpur, 8-10th February, 58-350
- Mazlum, M.S., 2014, Ekonomik Ömrünü Tamamlamış Asfalt Kaplamaların Kazınarak Bitümlü Sıcak Karışımlarda Yeniden Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Y.L Tezi, Trabzon
- Orhan, F., 2005. “Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları”, Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara, 10-24.
- Orhan, F., 2012. Asfaltın yerinde soğuk yeniden kullanım, asfaltta geri dönüşüm teknikleri ve uygulamaları semineri, Ankara
- Oruç, Ş., Yılmaz, B. ve Mazlum, M.S., 2017. Geri kazanılan asfalt kaplamaların sıcak asfalt karışımlarda yeniden kullanılabilirliğinin araştırılması, Fırat Üniversitesi Mühendislik ve Bilim Dergisi, 30, 1, 87-93.
- Oylumluoğlu, J. 2012, “The Utilization Of Recycled Asphalt Concrete With Warm Mix Asphalt”. 2
- Salta, İ., 2010. Bitümlü karışımların geri dönüşüm yöntemlerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ., Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Seferoğlu, A.G., Seferoğlu, M.T., Akpınar, M.V., 2015. Yol Aşınma Tabakasının Geri Dönüşüm Malzemesi Olarak Ulaşım Üstyapısında Kullanılabilirliğinin Araştırılması. 2nd International Sustainable Buildings Symposium, 28-30 May, Ankara]
- Sönmez, İ., Deniz, M.T., Tayfur, S., Özen, H., Yıldırım, S.A., Eren, B.K., Modifiye Katkı Maddelerinin Bitümlü Sıcak Karışıma Etkisi Ve Performans Üstünlükleri. 334-348.
- Sönmez, İ., Günay, E., Kara, M., Topçu, A., Yıldırım, S.A. ve Kavaklı, B., 2009, Eski Asfalt Kaplamaların Geri Dönüştürülmesi ve Bitümlü Sıcak Karışımlarda Yeniden Kullanımı, İstanbul
- Şengöz, B., Agar, E., 2005, “Asfalt film kalınlığının bitümlü karışımların yaşlanmasına etkisi”, TÜ Dergisi, 4 (1), 71-82.
- Şimşek, A., 2021, Grafen ile Modifiye Edilmiş Bitümlerin Optimizasyonu, Y.L. Tezi, Erzurum
- Taha, R. , Ali, G., Basma, A. & Al-Turk, O. (1999). Evaluation of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate in Road Bases and Subbases. 7th Int. Conf. on Low Volume Roads, Transportation Research Board, 1652, 1, (s. 264-269). Washington, DC
- Taha, R. 2003. Evaluation of Cement Kiln Dust-Stabilized Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate Systems in Road Bases, Transportation Research Record: Journal of Transportation Research Board, 1819, 11-17

- Taha, R., Al-Harthy, A., Al-Shamsi, K. & Al-Zubeidi, M. (2002). Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases. Journal of Materials in Civil Engineering,14(3), 239-245
- Tunç, A., 2004, “Esnek Kaplama Malzemeleri Elkitabı”, Asil Yayın Dağıtım Ltd. Sti., Ankara, 54.
- Uluçaylı, M. ve Yavuz, A., 2002. Asfalt El Kitabı, İsfalt Bilimsel Yayınlar, İstanbul, 2, 570
- Umar, F. ve Ağar, E., 1985. Yol üstyapısı, 3. baskı, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Ünlü, F., 2019, İstanbul’da Kazınmış Asfalt Kaplamaların Binder Tabakasında Yeniden Kullanılabilirliğinin Araştırılması, YL Tezi, itü,İstanbul
- Van den bergh, W. ve Van de Ven, M., 2009. Hot recycling of asphalt: experiences in Flandersand the Netherlands Proc, Netherland.
- Varol, H., 2019. Geri Kazanılmış Asfalt Betonunun Bitümlü Temel Tabakasında Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Y.L. Tezi, İstanbul
- Yayla, N., 2014, Karayolları Mühendisliği,Birsen Yayın Evi, 17

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı:	Merve Nur KURT
Doğum tarihi:	
Doğum Yeri:	
Uyruğu:	
E-mail:	
Eğitim	
Lise:	Erzurum Mehmet Akif Ersoy Anadolu Lisesi
Lisans:	Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği
Yüksek lisans:	Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri. Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Yabancı Dil Bilgisi	
İngilizce:	Orta
Üye Olunan Mesleki Kuruluşlar	