

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



TRABZON



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ



Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünce

Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : / /

Tezin Savunma Tarihi : / /

Tez Danışmanı :

Trabzon

ÖNSÖZ

Bu Çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı yüksek lisans tezi olarak hazırlanmıştır. Yüksek lisans eğitimim boyunca bana değerli vaktini ayıran, tez aşamasında tez çalışmam boyunca hiçbir zaman yardımını esirgemeyen, bilimsel olarak ve kişiliğiyle kendisini örnek aldığım saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Atakan AKSOY'a ve değerli hocam Doç. Dr. Erol İSKENDER'e içtenlikle teşekkür eder saygılarımı sunarım.

Tüm hayatım boyunca bana daima destek olan, aldığım her kararda yanımda olup desteklerini esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi ve minnettarlığımı sunarım.

Nazlı Gül ARAZ

Trabzon 2022

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Asfalt Kaplamalarda Bitüm Yüzdesine Ve Sıcaklığa Bağlı Olarak Marshall Deneyi Parametrelerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım_Prof. Dr. Atakan AKSOY’un sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 10/03/2022

Nazlı Gül ARAZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VII
SUMMARY	VIII
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	IX
TABLolar DİZİNİ.....	XI
SEMBOLLER DÜZENİ	XII
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Çalışmanın Amacı	2
1.3. Konunun Özgeçmişi	2
1.4. Karayolu Üstyapısı	8
1.4.1. Rijit Üstyapılar	9
1.4.2. Yarı Rijit Üstyapılar	10
1.4.3. Esnek Üst Yapılar.....	10
1.5. Bitümlü Sıcak Karışımlar	11
1.5.1. Bitümlü Sıcak Karışımların Uygulama Alanları	12
1.5.2. Bitümlü Sıcak Karışımların Özellikleri	13
1.5.3. Bitümlü Sıcak Karışımların Dizaynı	15
1.6. Sıcaklık Faktörü İrdelenmesi.....	15
1.7. Bitüm Miktarı Tayini (ASTM D2172).....	16
1.8. Marshall Testi Deneyi	17

2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR	18
2.1.	Kullanılan Malzemeler	18
2.2.	Asfalt Çimentosuna Uygulanan Deneyler	19
2.2.1.	Penetrasyon Deneyi	20
2.2.2.	Yumuşama Noktası Deneyi	21
2.2.3.	Düktilite Deneyi	22
2.2.4.	Çözünürlük Deneyi	23
2.2.5.	Parlama Noktası Deneyi	24
2.2.6.	Özgül Ağırlık Deneyi	25
2.3.	Agrega Örneklerine Uygulanan Deneyler	26
2.3.1.	Elek Analizi Deneyi (ASTM C136, ASTM C117)	26
2.3.2.	Los Angeles Aşınma Deneyi (ASTM C131, AASHTO T96, TS EN 1097-2).....	27
2.3.3.	Hava Tesirlerine Karşı Dayanım Deneyi (AASHTO T104, TS EN 1367-1).....	28
2.3.4.	Cilalanma Deneyi (TS EN 1097-8)	28
2.3.5.	Özgür Ağırlık ve Absorpsiyon Deneyi (ASTM C127, TS EN 1097-6)	29
2.3.6.	Yassılık İndeksi Deneyi (BS 812)	30
2.4.	Karışım Tasarımı	31
2.4.1.	Stabilite ve Akma Değerlerinin Tespiti	41
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	42
3.1.	Deney Sonuçları	44
3.1.1.	Agrega Deney sonuçları	44
3.1.2.	Seçilen Gradasyon	45
3.2.	Karışım Tasarım Sonuçları.....	46
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
5.	KAYNAKÇA	70
6.	EKLER	74

ÖZGEÇMİŞ

ÖZET

ASFALT KAPLAMALARDA BİTÜM YÜZDESİNE VE SICAKLIĞA BAĞLI OLARAK MARSHALL DENEYİ PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ

Nazlı Gül ARAZ

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Atakan AKSOY
2022, 73 Sayfa, 7 Sayfa Ek

Asfalt kaplamalar imal edilirken hem çevreye yaydığı zararlı gazları hem de karışımı istenilen sıcaklığa getirmek için sarf edilen enerjiyi azaltmak yıllarca irdelenmiştir. Bu çalışmada aşınma tabakası tip 1 A ya göre dizayn edilmiş yoğun gradasyonlu asfalt kaplamalar için optimum bitüm içeriğimiz olan %5,1 değerinin 3 kademe altı ve üstünde (4,8-4,9-5-5,10-5,20-5,30-5,40) oranlarında 143 °C ve 137 °C sıkıştırma sıcaklığında briketler hazırlanmış ve bunlara Marshall stabilite testi uygulanmış akma ve stabilite değerleri irdelenmiştir. Çalışma sonucunda 143°C sıkıştırma sıcaklığı 137°C sıkıştırma sıcaklık değerine göre daha yüksek Marshall stabilite değeri verdiği akma değerleri açısından bakıldığında ise optimum bitüm oranından daha yüksek artan değerlerde bitüm oranının artmasıyla akma değerleri artmakta olduğu ve 143°C sıkıştırma sıcaklığı 137°C sıkıştırma sıcaklık değerine göre daha düşük akma değerleri verdiği gözlemlenmiştir. Çalışmada Marshall stabilitesi, Marshall akması, Hava boşluğu, Mineral agregalar arası boşluk, Asfaltla dolu boşluk, Marshall stabilitesi/Marshall akma oranları irdelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Asfalt Kaplamalar, Sıkıştırma Sıcaklığı, Boşluk Analizi, Mekanik Özellikler, Stabilite

Master Thesis

SUMMARY

INVESTIGATION OF MARSHALL TEST PARAMETERS DEPENDING ON BITUMEN PERCENTAGE AND TEMPERATURE IN ASPHALT COATINGS

Nazlı Gül ARAZ

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Atakan AKSOY
2022, 73 Pages, 7 Pages Appendix

When producing asphalt pavements, reducing both the harmful gases emitted to the environment and the energy consumed to bring the mixture to the desired temperature have been examined for years. In this study, the optimum bitumen content of 5,1% for dense grade asphalt pavements designed according to wearlayer type 1 is 3 levels be low and above (4.8-4.9-5-5.10-5.20-5,30-5,40) briquettes were prepared at 143 °C and 137 °C compression temperaturesand Marshall stability test was applied to them, yield in gand stability values were examined.As a result of the study, it was found that the compression temperature of 143°C gave a higher Marshall stability value than the compression temperature value of 137°C; Intems of yield values, it has been observed that the yield values increase with the increase of the bitumen ratio at higher values than the optimum bitumen ratio, and the compression temperature of 143°C gives lower yield values than the compression temperature value of 137°C.In the study, Marshall stability, Marshall flow, Airgap, Space between mineral aggregates, Space filled with asphalt, Marshall stability/Marshall flow rates were examined.

Key Words: Asphalt Pavements, Compaction Temperature, Gap Analysis, Mechanical Properties, Stability

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Üstyapı tabakaları ve türleri [31].....	9
Şekil 2. Esnek üstyapı ve asfalt kaplama.....	11
Şekil 3. Asfalt çimentosu.....	18
Şekil 4. Granüler agrega malzeme.....	19
Şekil 5. Penetrasyon deney aleti ve deneyin yapılışı.....	20
Şekil 6. Yumuşama noktası deneyi yapılırken bir kare	21
Şekil 7. Düktilite Deneyi; bitümün kopmadan uzayış şekli	22
Şekil 8. Trikloretilende çözünürlük deneyi	24
Şekil 9. Parlama Noktası Deneyi.....	25
Şekil 10. Elek analizi gerçekleştirildikten sonra boyutlara göre sınıflandırılmış hali.....	26
Şekil 11. Los Angeles aşınma deneyi yapılırken bir kare	27
Şekil 12. Donma deneyi için soğutucu şekildeki gibi izlenilmekte.....	28
Şekil 13. Cilalanma Deneyi Aleti ve Uygulama Aşaması.....	29
Şekil 14. Özgül ağırlık ve absorbsiyon deneyi	30
Şekil 15. Yassılık indeksi deneyi deney aparatı ve yapılış anı	31
Şekil 16. Eleme işlemi yapılarak ocaktan gelen malzemenin boyutlarına ayrılması	32
Şekil 17. Malzeme elendikten sonra boyutlarına göre tepsilenmesi	33
Şekil 18. Daha önceden belirlenen granülometriye göre agregaların poşetleme işlemi.....	34
Şekil 19. Etüve konularak 24 saat kurumaya bırakılan numuneler	35
Şekil 20. Bitüm içeriği tartı üzerindeki sıcak agregaya eklenmesi.....	36
Şekil 21. Bitüm ile karıştırıldıktan sonra sıkışmaya hazır hale gelen numuneler	37
Şekil 22. Lazer Termometre ile sıcaklık değerlerinin belirlenmesi.....	38
Şekil 23. Kriko sonrası numaralandırılan numuneler	39
Şekil 24. Marshall Stabilite Test cihazı	40
Şekil 25. Seçilen agrega gradasyonu ve şartname sınırları	46
Şekil 26. Değişen bitüm yüzdelere göre 143°C de ortalama stabilite değerleri.....	46
Şekil 27. Değişen bitüm yüzdelere göre 137°C de ortalama stabilite değerleri.....	47
Şekil 28. Değişen bitüm yüzdelere göre 143°C de ortalama akma değerleri.....	48
Şekil 29. Değişen bitüm yüzdelere göre 137°C de ortalama akma değerleri.....	48

Şekil 30. %4.8 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği	49
Şekil 31. %4.9 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği	49
Şekil 32. %5 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği	50
Şekil 33. %5.1 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği	50
Şekil 34. %5.2 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği	51
Şekil 35. %5.3 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği	51
Şekil 36. %5.3 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği	52
Şekil 37. %4.8 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği	53
Şekil 38. %4.9 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği	53
Şekil 39. %5 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği	54
Şekil 40. %5 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği	54
Şekil 41. %5.2 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği	55
Şekil 42. %5.3 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği	55
Şekil 43. %5.4 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği	56
Şekil 44. %4.8 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği	57
Şekil 45. %4.9 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği	57
Şekil 46. %5 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği	58
Şekil 47. %5.1 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği	58
Şekil 48. %5.2 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği	59
Şekil 49. %5.3 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği	59
Şekil 50. %5.4 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği	60
Şekil 51. %4.8 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği	61
Şekil 52. %4.9 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği	61
Şekil 53. %5 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği	62
Şekil 54. %5.1 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği	62
Şekil 55. %5.1 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği	63
Şekil 56. %5.3 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği	63
Şekil 57. %45.4 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği	64
Şekil 58. Ortalama Marshall Stabilite değerleri	65
Şekil 59. Ortalama Marshall Akma değerleri	65
Şekil 60. Ortalama değerlere göre 143°C ve 137°C için MQ= S/A grafikleri	66
Şekil 61. Ortalama değerlere göre 143°C için MQ= S/A grafiği	67
Şekil 62. Ortalama değerlere göre 137°C için MQ= S/A grafiği	67

TABLÖLAR DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. Agrega Özellikleri.....	44
Tablo 2. Optimum bitüm içeriği tayini için Marshall dizaynı sonuçları	44
Tablo 3. Seçilen agrega gradasyonuz	45
Tablo 4. Farklı sıcaklık ve bitüm oranlarında eklenmiş numunelerin ortalama Marshall Stabilite ve Akma değerleri	64



SEMBOLLER DÜZENİ

D	Asfalt briket örneğinin çapı
V _h	Hava boşluğu
V _f	Asfaltla dolu boşluk
P	Maksimum yük
W	Bitüm içeriği
DP	Briketin hacim özgül ağırlığı
DT	Briketin maksimum teorik özgül ağırlığı
% İ	İnce agreganın ağırlıkça yüzdesi
% K	Kaba agreganın ağırlıkça yüzdesi
G _{sb}	Agrega karışımının hacim özgül ağırlığı
G _{sa}	Agrega karışımının zahiri özgül ağırlığı
% F	Mineral fillerin ağırlıkça yüzdesi
VMA	Agregalar arası boşluk

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Ülkemizde en çok tercih edilmekte olan üstyapı çeşidi esnek üstyapıdan oluşmaktadır. Esnek üstyapılar; kaplama, temel ve alt temel şeklinde üç katmandan oluşur. Kaplama tabakasında bitüm ve agreganın karışmasıyla elde edilen bitümlü sıcak karışım (BSK) kullanılmıştır. BSK kaplamalar, belli bir gradasyon aralıklarına sahip agregayla, belirlenen oranda ayarlanmış bitümle belli sıcaklıkta olan asfalt plentinde karılmasıyla elde edilir. Sıcak karışım içerisinde büyük oranda bulunan agreg; karışımın içsel sürtünme direnç ve dayanımını sağlarken, asfalt çimentosu da agregalar arasındaki boşlukları doldurarak tanelerin birbiriyle daha iyi aderansını ve trafik yüklerine karşı karışımın dağılarak kopmasını önlemekte olup, ayrıca düzgün bir yüzey sağlayarak sürüş konforunu artırmaktadır [1,2,3,4].

Canlıların sağlığına özellikle solunum yollarında uğrattığı hasar kanıtlanmış olan ve çevreye verilen zararın en aza indirmek için yapılan çalışmalar sonucunda, BSK üretimi ve serimi işlemi yüksek sıcaklıklar içerisinde yapılmasından çevreye ve canlı sağlığı için daha az zarara uğrattığı kanıtlanan ve dolayısıyla; enerji tüketimi bakımından daha fazla ekonomik ve ergonomik çözümler üreten Ilık Asfalt Karışımı (IKA) teknolojisi ortaya çıkmıştır. İlk çalışmada 1956 senesinde Lova üniversitesinde üretilen IKA teknolojisi ile alakalı araştırmalar, çalışmalar ülkemizde henüz ilk aşamalarında [4,5,6,7].

IKA teknolojisinde, çeşitli katkı maddeleri yardımıyla asfalt viskozitesinin azaltılması, işlenebilirliği iyileştirmeyi amaçlamaktadır [8]. Böylece BSK'ya göre daha düşük ısıda kullanım kolaylığı, enerji tasarrufu ve çevresel faydalar sağlanmaktadır [9]. BSK'ya göre çok fazla avantajlara sahip olan IKA teknolojisinde, araştırmalar henüz çok yeni olduğu için uygulamada BSK kadar fazla olarak kullanılmamaktadır. Bu sebeple tasarım metotları bakımından sıcak karışım asfalt da dikkate alınmasının önem arz ettiği belirtilmelidir [4,5,6,7].

Litaratür çalışmaları irdelendiğinde bu konuyla ilgili yapılmış bir çalışma olmadığı dolayısıyla konunun özgün olduğu ve literatürdeki optimum bitüm içeriği tayini için

Marshall stabilite testi deneyleri sonuçlarına göre Marshall stabilite değerleri optimum bitüm değerinden daha düşük değerlerde daha yüksek Marshall stabilite değerleri çıkması beklenmektedir.

Optimum bitümden daha düşük civar bitüm değerlerinde daha yüksek stabilite elde edilmesi daha rijit bir karışımı, daha yüksek bir bitüm içeriğinde daha düşük bir stabilite değeri de daha esnek bir karışımı işaret etmektedir. Ayrıca bitüm içeriği arttıkça akma değerlerinin de artması beklenmektedir.

1.2. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı asfalt kaplamalar imal edilirken gerekli sıcaklığın sağlanması için sarfedilen enerjinin azaltılmasının böylece çevreye duyarlı üretimin gerçekleştirilmesinin yolunun açılmasının mümkün olup olmadığının araştırılması, ayrıca daha düşük sıkıştırma sıcaklıklarında gerekli mekanik ve fiziksel özelliklerin sağlanıp sağlanmadığının irdelenmesidir.

1.3. Konunun Özgeçmişi

Marshall gücünün Marshall çıktısı Marshall oranı (MQ) olarak adlandırılır. Bu oran asfaltın deformasyonlara olan direncinin ve rijitliğinin bir göstergesi olmaktadır. Marshall katsayısının sonucu, modifikasyona uğratılmış karışımın numunelerinin deformasyona karşı direncini değerlendirmek amacıyla kullanılır. Daha fazla bir MQ değeri, fazla sert bir karışım ve yüksek olasılıkla fazla kararlı bir karışım eldesini gösterir. Konak, S.D., farklı darbe sayıları ile hazırlanan karışımların Marshall tokmak kullanılarak Marshall katsayılarının belirlenmesi, elde edilen katsayılar kullanılarak regresyon analizi sonuçlarına dayalı bir model oluşturulması ve hata oranlarının incelenmesini çalışmıştır. Optimal bitümü, 75 vuruş kullanılarak Marshall yöntemiyle belirlemiştir. Marshall oranlarını, optimum bitüm içeriği için farklı darbe sayılarına (her 2 tarafta 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 darbe) sahip karışımlar hazırlayarak hesaplamıştır. Stabilite değerleri 45 vuruştan 65 vuruşa yükseldiği ve 65 vuruştan sonra kademeli olarak 75 vuruşa kadar da

düştüğünü görmüştür. Sıkıştırma enerjisi 60-65 vuruş düzeyinde uygun olduğunu kabul etmiştir. Karışımların debileri 65 vuruşa kadar yükselirken 65-75 vuruşa azaldığını tespit etmiştir. Buna bağlı olarak MQ değerleri 45 atımdan 65 atım arasında düşmüş ve 65-75 atım arasında yükseldiğini görmüştür. Excel programıyla hazırladığı briketlerin Vuruş sayısı-MQ, H_{ort} -MQ, D_p -MQ, V_f -MQ sonuçları arasındaki ilişkiyi veren korelasyonları ve R^2 değerlerini bulmuştur. Oranları kullanılarak elde ettiği MQ değerleri ile deney sonucunda elde ettiği MQ değerlerini karşılaştırılarak hata oranları bulmuştur [10].

Kalıcı deformasyon, asfalt karışımları için önemli bir kırılma mekanizmasıdır. Styrene-Butadiene- Styrene (SBS) modifiyeri ve sönmüş kireç kombinasyonuna sinerjetik gelişme denmektedir. Asfalt kaplamalarda sinerjetik etki incelenerek ve sönmüş kireç ile kullanılan SBS modifiyerinin sıcak karışım asfalt performansına etkisi, performans değerlendirme yöntemlerinden Marshall Oranı kullanılarak seçilen örnekler üzerinde belirlenmek istenen çalışmada, SBS'nin modifikasyonu laboratuvar koşullarında gerçekleştirilmiştir. Karışımındaki dolgu içeriği %1 oranında azaltılmış ve yerine sönmüş kireç eklenmiştir. Çalışma için katkısız kontrol briketleri, sönmüş kireçli briketler ve %2,4 ve %6 SBS modifiyeli 48 briket hazırlanmıştır. Deneylerde kullanılan numuneler Marshall yöntemine göre hazırlanmış olup, kontrol ve modifiye karışımlar için özdeş briketler yapılmıştır. Hasar sistemi belirlendikten sonra hazırlanan briketlere tokmak uygulanmıştır. Marshall katsayıları elde edildikten sonra sinerjetik bir performans çalışması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlardan; Marshall katsayısının sinerjetik performans değerlendirmesinin bir göstergesi olmadığına inanılmaktadır [11].

Mermer atıklarından üretilen agregalar ile bölgede asfaltta kullanılan tanık agregaların özelliklerini karşılaştırmak için bir çalışma yapılmıştır. Bu amaçla agregalar üzerinde standart kaplama testleri, Marshall stabilitesi testleri ve dolaylı çekme mukavemeti testleri yapılmıştır. Marshall tasarımı üzerinde uygulanan dayanım ve akma dayanımı testlerinin sonuçlarına göre Mermer atığı en fazla stabilite değerini elde edilmiştir. Tüm karışımlardaki stabilite değeri spesifikasyon limitinin üzerinde bulunmuştur. Mermer atığı karışımından elde edilen yüksek akış ve stabilite değerleri, mermerden yapılan kaplamaların performansının en az kalker kökenli kayalardan yapılanlar kadar iyi olacağı sonucuna varılmıştır [12].

Asfalt betonunun çeşitli sıcaklıklara ve bekleme sürelerine maruz bırakılarak Marshall stabilitesinin belirlendiği çalışmada, Devlet Karayolu D100-11 kesiminde 65 adet

asfalt betonu karot numunesi alınmıştır. Çekirdek numunelerdeki temel fiziksel özellikler ve bitüm miktarı belirlendikten sonra 170 °C (referans sıcaklık), 30, 40 ve 50 °C'de 1.5, 3, 4.5 ve 6 saat tutularak Marshall stabilite testleri yapılmıştır. Numunelerin ana fiziksel özelliklerine, bitüm miktarına, sıcaklığa ve bu sıcaklıklara maruz kalma süresine dayalı deneysel olarak elde edilen Marshall kararlılık değerlerini tahmin etmek için uyarlanabilir bir sinirsel bulanık mantık yaklaşımı kullanılarak bir tahmin modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen değerlendirme modelinin sonuçları ile elde edilen deneysel değerler karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak modelin öngördüğü Marshall kararlılık değerleri ile deneysel olarak çıkan değerler arasında çok yüksek bir korelasyon tespit edilmiştir [14].

Asfalt beton kaplamaların ana deforme edici gerilmesi tekerlek izi problemi olarak adlandırılan kalıcı deformasyondur. Tekerlek izi; tekrarlı sünme testleri, tekerlek izi gibi metodlarla araştırılır. Bununla; Marshall yöntemi (ASTM D 1559), tekerlek izi problemlerini değerlendirmek için stabilite ve akış hızını kullanabilir. Yapılan çalışmada; bu sıkıştırma enerjisindeki değişimin bir fonksiyonu olarak Marshall oranının irdelenmiştir. Optimal bitüm, 75 vuruş sayısı ile Marshall metoduyla belirlendi. Marshall katsayıları, optimum bitüm içeriği için farklı sıkıştırma enerjilerine (her iki tarafta 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75 darbe) sahip karışımlar hazırlanarak hesaplanmıştır. Stabilite değerleri, yaygın olarak kullanılan vuruş sayısına bağlı olarak 45 vuruştan 65 vuruşa kadar çıkmakta ve 65 vuruştan sonra kademeli bir şekilde 75 vuruşa düşmektedir. 50-60 vuruşluk bir sıkıştırma enerjisi kabul edilebilir. Daha yüksek darbe sayılarında artan stabilite, karışımdaki kireçtaşı agregalarındaki hasarlarla bağdaşabilir. Karışımlardaki akma miktarları 65 vuruşa kadar yükselirken 65-75 vuruşta azalmaktadır. Sıkıştırılma enerjisindeki 75 vuruş sayısına bakıldığında yani ağır trafik koşullarında düşünüldüğü zaman stabilite/akma oranının azalmış olması; tekerlek izi direncindeki bir artış olarak yansımaları beklenirken bu beklentinin ne yazık ki başarısız olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebinin ise, sıkıştırma enerjisi seviyesinde, karışımdaki kaba agregaların kırılabilme ihtimalinin olması olarak düşünülmektedir [17].

Asfalt kaplamalar için; artmakta olan trafik hacimlerinde, kamyon ve treyler dingil yüklerinde daha yüksek lastik basınçlarıyla, gelişmekte olan asfalt rafineri teknolojisine bağlı olarak bağlayıcının azalan yapıştırma kabiliyeti sebepleriyle daha büyük gerilmelere maruz kalmaktadırlar. Asfalt kaplamalar için, en önemli ve en çok gözlemlenen zarar veren gerilmelerden birisi kalıcı deformasyon hasarı olup, tekrarlı yüklemeler ile kaplama

yapısındaki her bir tabakada oluşan kalıcı deformasyonların yığılması şeklinde gözlemlenebilmektedir. Tekerlek izi (kalıcı şekil değiştirme), yorulma ve düşük sıcaklık çatlakları gibi bozukluklar ile suya olan duyarlılığa sebep olmaktadır. Asfaltın düşünülen servis ve konfor düzeyinin sağlanması da büyük ölçüde sıcak karışımlarda kullanılan asfalt çimentosu özelliklerine bağlıdır. Bu açıdan irdelendiğinde, kaplamayı oluşturan malzemelerden birisi olan asfalt çimentosunun modifikasyonu ve sönmüş kireç katkılı karışımların kullanımı yolun performansını arttırmak için en sık kullanılan metotlar olmuştur. Yapılan çalışmada deneylerde, katkısız (kontrol), %2 sönmüş kireç, %4 sönmüş kireç, %2 sönmüş kireç +%5 SBS ve %4 sönmüş kireç + %5 SBS katkılı sıcak karışım asfaltlar hazırlanmıştır. 100 mm ve 150 mm çapa sahip briketler hazırlanarak marshall yöntemi ile optimum bitüm içeriği belirlenmiştir. Geleneksel Asfalt Betonu gradasyonu kullanılmış ve 75 vuruş uygulanarak sıkıştırma yapılmıştır. Karışımların mekanik özellikleri Marshall stabilitesi testiyle belirlenmiştir. Deney sonuçları üzerinde değerlendirmeler Marshall oranı (MQ) metodu ile hesaplanmıştır [18].

Niğde-Adana karayolunun yapımında Marshall stabilite testleri kullanılarak yapılan çalışmada, Testlerden elde edilen sonuçlar, yapay sinir ağları kullanılarak modellenmiştir. Asfalt karışımı numunelerine yapılan Marshall stabilite testinde; yapay sinir ağları yöntemine göre, agreganın ağırlığına göre asfalt çimentosu yüzdesine, karışımdaki bitüm yüzdesine, hacimsel özgül ağırlığa ve boşluk değerlerine bağlı olan Marshall stabilite değeri kullanılmıştır. Deney sonucu elde edilen tahmin modeli daha önce elde edilen deneysel sonuçlarla test edildiğinde, yapay sinir ağları modeli ile tahmin edilen Marshall kararlılık değerleri ile deneysel olarak elde edilen değerler arasında güzel bir ilişki olduğu saptanmıştır [19].

Marshall Sıcak Karışım Metodu, silindirik bir numunenin yan yüzeylerini Marshall test teçhizatı ile yükleyerek plastik akışa karşı olan direncin ölçülmesi ve stabilitenin bulunması işlemine dayanmaktadır. Marshall yöntemi; Sıvı petrol asfaltı, asfalt çimentosu, katran veya 25 mm'ye kadar partikül boyutuna sahip agregalar için kullanılır. Bu yöntem, bitümlü karışımların laboratuvar hesabında kullanılır. Marshall karışımında kullanılacak numuneler, standartlarda belirtilen koşullarda hazırlanarak maksimum yük ve akış testlerine tabi tutulur. Hazırlanan numuneler üzerinde yoğunluk ve boşluk oranı gibi karakteristik özellikler belirlenmelidir. Marshall deneylerinde kullanılan numuneler, diğer yöntemlerle hazırlanan bitüm karot numuneleri veya asfalt yoldan alınan numuneler

kullanılarak maksimum verim ve yük değerleri bulunabilir. Fakat sonuçlar Marshall yöntemi ile elde edilen sonuçlardan farklılık gösterebilir. Stabilite değerleri, standartta verilen düzeltme faktörleri ile çarpılarak düzeltilip düzeltilmiş stabilite değerleri hesap edilir. [15]

Marshall stabilite deneyi, ASTM D 1559 (Marshall deney cihazı ile bitümlü sıcak karışımların plastik akmaya karşı direnci) kısmında detaylıca bulunmaktadır [21].

Günümüzde çeşitli ürünlerin yapımında ortaya çıkan atıkların geri kazanılması önem arz etmektedir. Yapılan çalışmada mermer tozu, uçucu kül, fosfo-jips ve cam tozu gibi endüstriyel atıkların asfalt kaplama karışımlarında dolgu maddesi olarak %7 ile %0 arasındaki değerlerde kullanılması durumları değerlendirilmiştir. Optimum bitüm oranını belirlemek için asfalt bağlayıcı oranları %3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 ve 6.5 miktarında kullanılmasıyla Marshall stabilite numuneleri üretilmiştir. Hazırlanan briketler üzerinde Marshall stabilite testi uygulanarak optimum bitüm yüzdesi belirlendi. %4,9'luk optimum bitüm yüzdesini elde etmek için çeşitli oranlarda % taş tozu - % endüstriyel atık dolgu maddesi kullanılarak hazırlanmış numunelere Marshall stabilite testi uygulanmıştır. Fabrika atıklardan elde edilen dolgu maddelerinin kullanımı ile bitümlü karışımlarda stabilite ve akışkanlık indekslerindeki değişimi incelenmiştir. Marshall stabilite sonuçlarına göre fabrika atık dolgu maddesinin en uygun oranı %4 kaya tozu - %3 endüstriyel atık dolgu maddesi olduğu görüşmüştür. %0 kaya tozu - %7 endüstriyel atık doldurucu oranında bile şartname limitleri sağladığı da tespit edilmiştir [22].

Bitümlü karışımlar esas olarak hem kaba hem de ince agregalar, mineral filler ve bitümden oluşur, bunlar ayrı olarak ısıtılır, uygun şekilde karıştırılır ve trafikten gelen ağır tekerlek yüklerine dayanabilecek güçlü ve dayanıklı kaplama karışımı elde etmek için öngörülen prosedüre göre sıkıştırılır. Marshall testleri, bitümlü karışımların karakterizasyonunda kullanılan basit ve düşük maliyetli testlerdir. Bitümlü karışımlar üzerinde Marshall deneylerinden elde edilen Marshall stabilitesi ve akma değeri gibi kullanılan parametreler, bir dereceye kadar karayolu bitümlü kaplamanın performansı ile ilgilidir [23].

Marshall testi, standart bir laboratuvar sıkıştırma enerjisi ile sıkıştırılmış bir asfalt karışımının mukavemetini ölçmek için temel amaç noktasında yaygın olarak kullanılıyordu. Bu test aynı zamanda tasarım asfalt içeriğini optimize etmek için Marshall

karışımı tasarım prosedürünün bir parçası olarak ve asfalt karışımlarının kalite kontrolünde de kullanılır. Temel olarak iki özellik belirlenir. Bunlar numunenin kırılmadan önce taşıyacağı maksimum yük (Marshall stabilitesi olarak bilinir) ve kırılma oluşmadan önce numunenin deformasyon miktarıdır (Marshall akması olarak bilinir) [24].

Asfalt betonu kaplamaların stabilitesinin karışımın rijitliğine, bitüm içeriğine, bitümün yumuşama noktasına, bitümün viskozitesine, agreganın gradasyon derecesine, inşaat pratik uygulamasına, trafik ve iklim koşullarına bağlı olduğu belirtilmektedir [25].

Marshall Metodu, Ekvator ve diğer ülkelerde sıcak karışım asfalt için tasarım ve kontrol rehberi olmaya devam etmektedir. Sıcak karışım asfalt tasarım yönteminin amacı, laboratuvar sonuçlarını gerçek saha performansı ile ilişkilendirmektir. Sıcak karışım asfalt aşağıdaki hedefler göz önünde bulundurularak geliştirilmiştir: i) tekerlek izi direnci, (ii) yorulma çatlama direnci; (iii) düşük sıcaklıkta çatlama direnci; (iv) dayanıklılık; (v) neme karşı direnç; (vi) kayma direnci ve vii) işlenebilirlik. Laboratuvar karışım tasarımı sırasında bu kriterler dikkate alınmalıdır. Superpave gibi diğer tasarım yöntemleri, ek zaman ve para yatırımı gerektiren malzemelerin karakterizasyonunda ki yüksek talebi nedeniyle henüz yaygın olarak kullanılmamaktadır. Yapılan bir çalışmada, sırasıyla inşaat sürecinde elde edilen sıcak karışım asfalt parametrelerinin ve inşaat 30 ve 60 gün sonra çıkarılan karotlarda ölçülen aynı parametrelerin analizini ve karşılaştırması yapılmıştır [26].

İnşaat 30 ve 60 gün sonra alınan karotların analizine dayanarak, sıcak karışım asfaltın yaşlanmasıyla agreganın gradasyonu, karışım alanı yoğunluğu, VA, VMA ve VFA'yı önemli ölçüde değiştirmediği açıkça görülmüştür. Ancak karotlardan elde edilen Marshall akması bilgilendirici bir parametre olarak değerlendirilmeli ve üstyapı çalışmalarını onaylamak veya reddetmek için kullanılmaması gerektiği savunulmaktadır. Ek olarak, kalite kontrol sürecinin yalnızca Marshall Testi sonuçlarına dayandırılmaması tavsiye edilerek; tekerlek izi ve çatlama testlerinin sonuçları da faydalı bilgiler sağlayabileceği düşünülmektedir. Bu bağlamda, kamu kuruluşlarının sıcak karışım asfalt işlerinin en iyi performansını garanti altına almak için test prosedürlerini ve spesifikasyonlarını güncellemeleri önemli olacağı düşünülmekte olup ayrıca tavsiye olarak, uygulanan inşaat teknikleri de kalite kontrol sürecinde dikkate alınması önerilmiştir [26].

Ilık beton asfalt karışımın belirtilen Marshall Metodu, asfalt çimentosu ve mineral agrega olmak üzere iki malzemeyi seçmek ve orantılamak için rasyonel bir yaklaşım eğilimindedir. Bunlar, ihtiyaç duyulan asfalt betonunun şekli ve yapısı hakkında belirli özelliklere karar vermek için kullanılır. Marshall testi, karışım-asfaltın akma erimesine karşı bir dayanıklılık veya stabiliteye karar vermek içindir. Marshall tasarım prosedürü, asfaltın optimum seviyesini elde etmeyi amaçlar. Marshall testinin tahmin ettiği seviye doğruluğunun garanti edilmesinde, günümüzde herhangi bir hesaplama yöntemi kullanılarak herhangi bir agrega karışımı beton asfalt verisi kullanılarak birçok araştırma yapılmıştır. Araştırmalar için Marshall stabilitesi, Marshall akması ve Marshall oranı tahminini tahmin etmek için en iyi bireysel yöntemin Yapay Sinir Ağı (YSA) olarak bilindiği özetlenebilir [27].

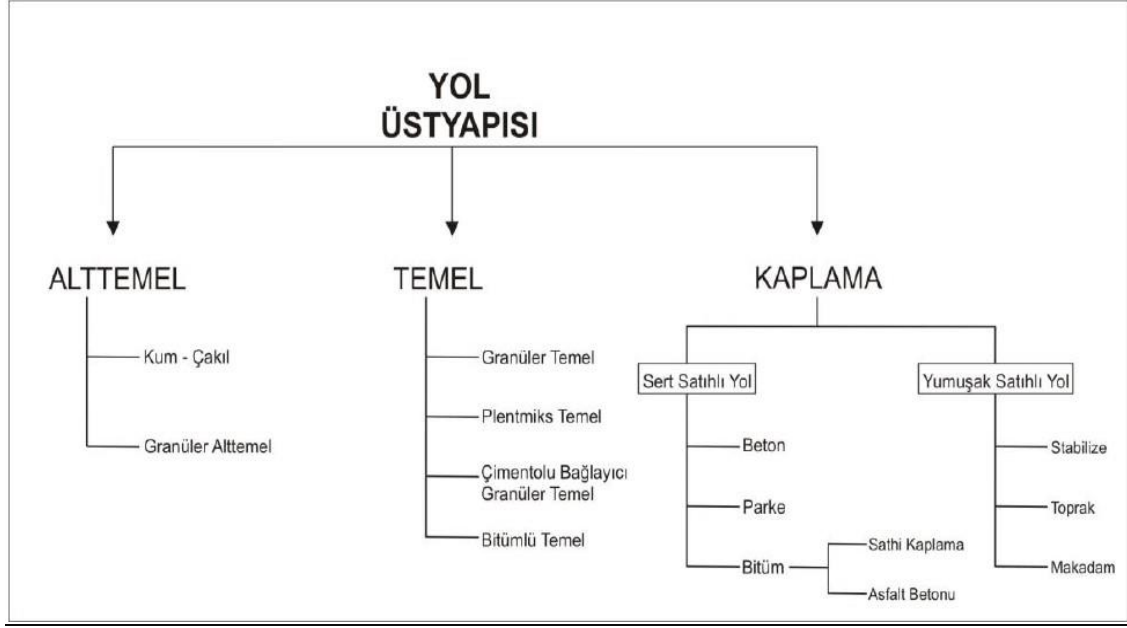
1.4. Karayolu Üstyapısı

Yoldan gelen trafik yüklerini, temelin taşıma gücünü geçmeyecek şekilde taban yüzeyine dağıtarak taşıyan kaplama katmanlarından oluşan kısımdır. Yoldaki yüklere dayanabilmesi için alt temel, temel ve kaplama katmanlarından oluşan parçalar yapılır. Doğal katmanlardan oluşan ve genellikle kırmataş, çakıl, kum, silt ve kil malzemelerden oluşan altyapı üzerine uygulanan katmana alttemel katmanı denir. Doğal kum, çakıl, silt, kil ve bitümlü karışımlar gibi malzemelerden oluşan, trafikle doğrudan temas etmeyen, üstyapı ile temel arasına yerleştirilen tabakaya temel tabakası denir [28].

Temel tabakası üzerinde yapılan ve trafiğin direkt temas ettiği, bitümlü karışımlar, beton, parke vb. kullanılarak yapılan tabakaya ise kaplama tabakası denir. Taşıtlarda sürüş konforu ve emniyeti sağlamak amacı ile yapılmaktadır [29].

Trafik dingil yükleri sebebiyle meydana gelen çekme ve basınç gerilmelerinin en yüksek seviyede olması kaplama tabakasının üstyapının diğer tabakalarına göre daha fazla miktarda bir esneklik modülüne sahip olmasını istemektedir. Kaplama tabakalarının yüksek ısılarda deformasyon gerilmelerine ve düşük ısılardaki gevrek kırılmalara karşı dayanıklı olması istenmektedir [30].

Üstyapılarda; kaplama tabakasında kullanılan malzemelerin niteliklerine, türlerine ve yapım yöntemlerine göre Rijit Üstyapı (Beton yol), Esnek Üstyapı (Asfalt yol) ve Yarı Rijit Üstyapı olmak üzere üç kısımda incelemek mümkündür. Üstyapı türüne karar verilmesi işleminde taban zemini, trafik, çevresel faktörler, ekonomik sebepler göz önüne alınmalıdır [31].



Şekil 1. Üstyapı tabakaları ve türleri [31].

1.4.1. Rijit Üstyapılar

Bu tip kaplamada yol yüzeyi beton ve donatılı betondan (betonarme) oluşur. Taban zemininin iyi bir mukavemete sahip, ağır veya çok ağır trafiğe maruz kalmaması durumlarda beton tabakası kullanılır. Bu durumda betonu üst tabakada veya temel ya da alt temel katmanlarına üzerinde yerleştirilebilir. Beton kaplamada basınç gerilmesi yüksek olduğundan trafik yükünün oluşturduğu deformasyona çok maruz kalmadan yüzeyde oluşan basınç ve kayma gerilmeleri alt tabakaları aktarılmaktadır. Bu tip kaplamada, beton plakası zamanla deforme olup ve alt katmanda gerilme meydana gelir. Ortaya çıkan

gerilme, beton gerilme mukavemetinden yüksek ise beton çatlar ve kırılır. Bu nedenle, bu tür kaplamalar güçlendirilmiş bir şekilde tasarlanır ve uygulanır. Rijit kaplamada, beton tabakanın kalitesi ve mukavemeti yüzeyin yük taşıma kapasitesini belirler ve taban zemin mukavemetindeki değişiklikler daha az rol oynar [32].

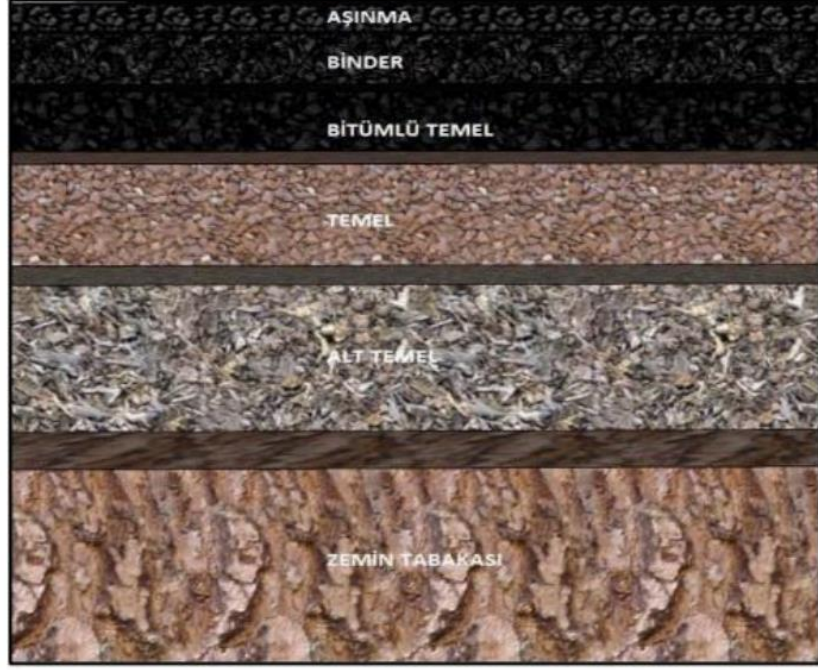
1.4.2. Yarı Rijit Üstyapılar

Yarı rijit üstyapılar, taban zemini üzerine granüler temel veya alttemel tabakası yerine, çimentolu bağlayıcı granüler temel veya çimentoyla karılmış alttemel serilerek yapılan üstyapılardır. Bu serimin üzerinde bitümlü temel, binder ve aşınma tabakaları inşa edilir. Trafik yoğunluğu çok yüksek otoyollarda bu tür üstyapılar kullanılmaktadır [33].

1.4.3. Esnek Üst Yapılar

Asfalt beton kaplama katmanlarının oluşturduğu kaplamaya "esnek kaplama" denir. Esnek üstyapı, tesviye yüzeyi ile yakın temas halinde olan ve trafik yüklerini üstyapı, temel ve alt zemin katmanları aracılığıyla alt zemine dağıtan bir üstyapı şeklidir ve stabilitesi kullanılan agreg a ve bitümlü bağlayıcının özelliklerine bağlıdır.(yapışma, tane sürtünmesi ve kohezyon) [2].

Rijit olmayan kaplamalarda, en üstteki katman, aşınma tabakasıdır. Aşınma tabakası, trafiğin güvenli ve rahat olmasını sağlayan, güvenlik için gerekli olan kesme mukavemetini sağlayan, trafiği engellemeyen pürüzsüz ve rahat bir yüzey tabakası sağlayan bir katmandır. Ayrıca aşınma tabakaları, araçlardan su sıçratmayacak ve kaldırım da su birikintilerini oluşturmayacak drenaj işlevine sahip olmalıdır [30]. Şekil 2’de bir esnek üstyapı kesiti verilmiştir.



Şekil 2. Esnek üstyapı ve asfalt kaplama

Üstyapıda bulunan tabakalarda olan malzemeler farklı özellikler taşımaktadır. Alttemel ve temel tabakalarında granüler türünde malzemeler tercih edilirken, kaplama tabakasındaysa, özellikleri sıcaklığa ve yükleme hızına bağlı olan, viskoelastik davranış göstermekte olan bitümlü karışımlar kullanılmaktadır [28].

1.5. Bitümlü Sıcak Karışımlar

Bitümlü karışımlar, kullanım amacı yönüyle, yolun trafik yoğunluğu ve üretim metodlarına göre çok farklı özelliklerdedirler. Asfalt kaplamalar genelde; karışım tipi kaplamalar yani bitümlü sıcak karışımlar ve sathi kaplamalar olarak iki grupta sınıflandırılırlar. Bu sınıflandırma dışında, kullanılan asfaltın cinsine bağlı olarak; Soğuk karışımlar ve sıcak karışımlar olmak üzere 2 grupta da toplanabilirler. Soğuk kaplamalarda bitümlü bağlayıcı olarak, sıvı petrol asfaltlarla da emülsiyon asfaltlar kullanılır. Sıcak kaplamalardan ise 140°C-170°C'ye kadar ısıtılmış bitümlü bağlayıcılar (modifiye bitüm)

kullanılır. Bakım ve onarım malzemesi olarak kullanılan rod -miks bir soğuk karışım türüdür ve yolda hazırlanabilirler. Soğuk karışımları asfalt plantte de üretmek mümkün olmaktadır [13]

1.5.1. Bitümlü Sıcak Karışımların Uygulama Alanları

Genellikle asfalt, asfalt, kaldırım veya asfalt olarak bilinen asfalt betonu, yolların ve otoparkların yapımında kullanılan kompozit bir yapı malzemesidir. Bu madde, petrol arıtmanın bir yan ürünü, asfalt betonu bitüm ve agregası karışımıdır. Asfalt betonunda asfalt betonu, agregası parçalarını birbirine bağlayan bir tür yapıştırıcı görevi görmektedir.

Arnavut kaldırımlı sokakların döşenmesi yayılım süresi sekizinci yüzyıla kadar Bağdat'a kadar götürülebilse de, 20. yüzyılın ilk otomobilleri halkın kullanımına sunulana kadar süreçte gerçek bir değişiklik olmadı. 1901 yılında Edgar Purnell Hooley, asfalt betonu adı verilen ve günümüz asfalt betonunun öncüsü haline gelen malzemenin patentini almıştı. Asfalt, Huli'nin malzemenin kısa adı, modern asfalt betonu reçine içermese de asfalt betonu anlamına gelir.

Tarihsel olarak, asfalt betonu, 1940'ların başlarında İngiliz savaş gemilerinin kurşun geçirmezliğini de içeren çeşitli amaçlar için kullanılmıştır. Asfalt betonu, geminin dış gövdesine yapıştırılan çelik bir taban plakası üzerine kalın bir tabaka halinde uygulandı. Asfalt betonunun bu kullanımına plastik zırh deniyordu ve o zamanın zırh delici mermilerini durduracak kadar etkiliydi [34].

1.5.2. Bitümlü Sıcak Karışımların Özellikleri

Bitümlü sıcak karışımların fiziksel ve mekaniksel özellikleri 8 alt başlıkta toplanabilir;

1. Stabilité
2. Rijitlik
3. Dayanıklılık (Durabilite)
4. Yorulma mukavemeti
5. Esneklik
6. Geçirimsizlik
7. Kayma Direnci
8. İşlenebilirlik

Stabilité,

Sıcak karışım asfalttan yapılan yollar, trafik yükü altında deformasyona karşı dayanıklı ve dayanıklıdır. Stabilité değerleri çok yüksek olan sıcak karışım asfaltlar gevrek davranış sergiledikleri ve bu nedenle istenilen esnekliği göstermedikleri için tercih edilmemektedir. Aksi halde stabilité değerleri çok düşük olan asfalt karışımları, düşük dayanım ve rijitlik değerlerine sahip oldukları için tercih edilmemektedir. Marshall tasarım yöntemi (ASTM D 1559) kullanılarak geleneksel asfalt betonu tasarlanarak stabilité değerleri belirlenebilir.

Bu, sıcak karışım asfaltın yükleme süresi ile termal etkinin neden olduğu gerilmeler ve şekil değiştirmeler arasındaki ilişki olarak adlandırılır. Sıcak karışımlar yapısal olarak viskoelastik ve termoplastik malzemeler olduğundan, mekanik özellikleri Stiffness Modeli kullanılarak belirlenir. Rijitlik, yükleme hızının artması veya süresinin azalması ile artar, sağlanan ısı miktarındaki artışla azalır ve karışımın yoğunluğunun azalması ve asfalt penetrasyon derecesinin artmasıyla azalır. Sıcak karışım asfaltların rijitlik değerleri dolaylı çekme testi (AASHTO T 283) kullanılarak belirlenir.

Durabilite,

Sıcak bitümlü karışımların taşıma yükleri ve çevre koşulları altında aşınmaya karşı gösterdiği dirençtir. Asfalt miktarı arttıkça bu direnç artar, kırılğan asfalt ve daha kalın bir tabaka oluşturur, tabaka soyulmasına karşı yüksek direnç gösterir, iyi sıkıştırma ve yoğun tane dağılımı sağlar. Optimum bitüm miktarına ulaşmayan karışımlarda kullanıldığında mukavemet azalır.

Yorulma,

Kaplamadaki yorulma çatlaklarının çekme dayanımını aşmadan kaplamanın çekme dayanımının başladığı andaki yük uygulamasının maksimum değeri olarak tanımlanır. Sertliği yüksek kaplamalarda yorulma mukavemeti değeri de bu oran ile ilişkilidir ve yüksek bir değere sahiptir. Kaplama gradasyonu ve asfalt oranı arttıkça yorulma mukavemeti artar ve buna bağlı olarak eğilme gerilmesi azalır. İdeal bitüm oranına sahip olmayan karışımların yorulma mukavemeti gerçek değeri yansıtmamakta ve azalmaktadır.

Esneklik,

Asfalt kaplamalar zamanla yüklere maruz kaldığından zeminde yağış meydana gelir. Esneklik, bu çökellere karşı çatlaklarda oluşturdukları eğilme yeteneği olarak tanımlanabilir. Özellikle soğuk iklime sahip bölgelerde üstyapı tasarımında esneklik önemli parametrelerden biri olarak düşünülmelidir.

Geçirimsizlik,

Asfalt kaplamalarda kabul edilebilir sınırlar içinde su ve havanın varlığı tespit edilir. Kaplamanın geçirimsizlik derecesi arttıkça kaplamadaki boşluklar su ile doluyor ve özellikle donma-çözülme sonrası taneler arasında kaplamayı olumsuz etkileyen tahribat meydana geliyor. Aşınma tabakasının geçirimsizliğinin istenilen düzeyde sağlanabilmesi için boşluk oranının %3-5 olması istenir.

Kayma Direnci,

Kayma direnci, araçların hareket halindeyken fren yaparken güvenli bir şekilde durabilmesi ve aynı zamanda güvenli bir şekilde hareket edebilmesi nedeniyle bir araç ile yol yüzeyi arasındaki sürtünme kuvveti olarak tanımlanır. Örneğin kırmataş gibi agrega kullanılarak yüzey pürüzlülüğünün artırılması yol yüzeyinin kayma direncini artırır.Yol

yüzeyinin pürüzlülüğünün artırılması kayma direncini arttırırken buna bağlı olarak sürücü için sürüş konforu azalır.

İşlenebilirlik,

İşlenebilirlik, sıcak karışım asfaltın uygulama sırasında sıkıştırılma kolaylığı olarak tanımlanır. Aslında bu, agregaların harekete karşı direncidir. İşlenebilirliği zayıf olan karışımlar heterojendir ve yeterli sıkıştırma göstermediği için stabilite değerleri düşüktür. İşlenebilirlik, agreganın gradasyonuna, agreganın yüzey yapısına, oluşturulan karışımın sıcaklığına, asfaltın penetrasyon hızına ve karışımdaki agreg miktarına bağlı olarak değişmektedir [35].

1.5.3. Bitümlü Sıcak Karışımların Dizayını

Karayolu taşımacılığında kullanılan en yaygın malzemelerden biri asfalttır. Asfalt üretiminde en çok kullanılan karışım sıcak karışım bitümdür. Sıcak karışım bitüm, agreg (93-97) ve bitümün (3-7) 140-160°C sıcaklıkta, asfalt beton santralinde uygun oranlarda karıştırılmasıyla elde edilir. Otoyollarda esnek tip üst yapı örtüsü olarak kullanılır. Esnek üst yapı ile rijit üst yapı arasındaki en büyük fark, esnekliği ile üzerindeki yükü absorbe etmesidir. Bsk'nin en büyük özelliği stabil, dayanıklı ve esnek olmasıdır [15].

Marshall Metodu Agregaların iyi bir karışım ve işlenebilirlik için kurutulup ısıtıldıktan sonra bir tesiste agreg ve bitümün karıştırılması ve asfalt bağlayıcının uygun akışkanlık elde etmesi için ısıtılmasıyla hazırlanan karışımlara sıcak karışım bitüm denir.

1.6. Sıcaklık Faktörü İrdelenmesi

Bu, hem uygulama hem de çalışma koşullarında bitümün sertleşmesine ve kırılgan hale gelmesine neden olan çok karmaşık bir problemdir. Bu olayın kaplama kalitesinin bozulmasında çok önemli bir etkisi vardır. Bitümdeki asfaltların stabilitesi ve koloidal

yapısı, yaşlanma ile doğrudan ilişkilidir [16]. Bitümlü bağlayıcıların ısı değişimleri, hava, nem ve ışık etkisi altında mühendislik özellikleri. Bu koşullar altında bitümlü bağlayıcı sertleşir.

Sertleşme; oksidasyon (çoğunlukla oksijen eklenmesiyle, ancak hidrojen kaybıyla birlikte elektron kaybını içeren bir süreç), buharlaşma (daha hafif bileşiklerin kaybı), tiksotropi (bir jelin çalkalama veya diğer bir sonucu olarak bir sola izotermal dönüşümü) mekanik değer), sinerez (sinerez) (jel veya jel gibi bir maddeden bir sıvıdan ayırma jeli) ve polimerizasyon (tekrarlanan yapısal birimlerde büyük moleküllerin oluşumu) ayrı reaksiyonlar olarak ilerler. Kural olarak, bağlayıcının çalışma koşulları altında kürlenmesi büyük ölçüde oksidasyon ve uçuculuktan kaynaklanır.

Tiksotropi, sinerez ve polimerizasyon süreçlerinin daha az verimli olduğuna inanılmaktadır [20].

Bitüm bileşimindeki değişikliklere bağlı yaşlanma; Yağlı bitüm bileşiklerinin buharlaşma veya gözenekli agrega tarafından absorpsiyon yoluyla kaybolması, atmosferik oksijenin neden olduğu reaksiyonlar sonucunda kimyasal bileşimde değişiklik(kök neden) ve tiksotropik etkiler (sterik sertleşme) moleküler konfigürasyonlarda ortaya çıkar.

Bitümün bileşiminde oluşan değişme nedeniyle ortaya çıkan yaşlanma; bitümün yağlı bileşiklerinin uçarlılık (volatilization) ile ya da boşluklu agrega tarafından emilerek kaybolması, atmosferik oksijen nedeniyle oluşan reaksiyonlarla kimyasal bileşimde değişim (ana neden) ve tiksotropik etkilerle (sterik sertleşme) moleküler yapılanma şekillerinde gerçekleşmektedir.

1.7. Bitüm Miktarı Tayini (ASTM D2172)

Bitümlü karışımlarda bitüm miktarının tayini şu amaçlarla yapılır;

- Üretim sırasında karışımdaki bitümün tasarım değerine karşılık gelip gelmediğinin belirlenmesi,
- Karışımdaki agreganın gradyanının belirlenmesi,

- Aşınmış kaplamalardan alınan maçalarda bitümün miktar ve gradasyonun belirlenmesi ve olası nedenlerinin araştırılması.

Karışımından veya kaplamadan alınan numune küçük bir spatula ile çıkarılacak kadar yumuşak değilse bir tepsiye alınır ve $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'de yumuşaması için fırında tutulur.

Deneyler, bir santrifüj veya ısıtılmış cam çıkarıcı kullanılarak gerçekleştirilebilir. Bir santrifüj çıkarıcı ile deneyim daha hızlı sona erer, ancak dolgu kaybı büyüktür. Isıtıcı ile bir cam çıkarıcı ile deney yaklaşık 2-4 saat sürer, ancak dolgu kaybı daha azdır.

Ayrıca asfalt analiz cihazı ile dolgu kaybı olmadan TS EN 12697-1 test standardına göre bitüm miktarı belirlenebilir ve testten elde edilen bitüm-etilen karışımı alınır. TS EN 12697-3 test standardına uygun döner evaporatör cihazı kullanılarak bitüm geri kazanılabilir ve üzerinde gerekli testler yapılır. [13].

1.8. Marshall Testi Deneyi

Marshall testi, sıcak karışım bitümün laboratuvar tasarımı için Marshall hesaplama yöntemi uygulanarak gerçekleştirilir. Marshall tasarımında, asfalt karışımı yaklaşık 63,5 mm yüksekliğinde ve 101,6 mm çapında numuneler üretmek için ısıtılır, karıştırılır ve sıkıştırılır. Hazırlanan numuneler Marshall elektrikli el aletinde test edilerek stabilite ve akma dayanımı değerleri belirlenir; pratik özgül ağırlığı, Marshall katsayısını, bitümle doldurulmuş boşluk katsayısını, boşluk katsayısını, agregalar arasındaki boşluk katsayısını belirler. Testler sonucunda, trafik yüklerine doğrudan maruz kalan sıcak karışım bitümün aşınma tabakasında kullanılmak üzere istenilen tip ve gradasyona göre optimum bitüm içeriği belirlenir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

2.1.Kullanılan Malzemeler



Şekil 3. Asfalt çimentosu

Bitüm birçok sektörde geniş kullanım alanına sahip akmaya karşı direnci oldukça fazla olan bir hidro-karbon atığıdır. Bu özellikleri bitümün yalıtım malzemesi olarak temel ve bodrumlarda, çatı kaplamalarında, boru kaplamaları ve boya uygulamalarında kullanılmasını sağlamaktadır.



Şekil 4. Granüler agrega malzeme

Tane boyutu 4mm den daha küçük olan agregalar ince agrega daha büyük olanlar yani elekten geçemeyip üstte kalanlar ise iri agrega olarak isimlendirilirler. İri agregalara örnek olarak konkasörlerde kırılan kırma taşlar söylenilebilir. İnce agregaya örnek olarak kum söylenilebilir. Hem iri agrega hem de ince agrega içeren yığınlara ise tüvanan denmektedir.

2.2. Asfalt Çimentosuna Uygulanan Deneyler

Yol yapımında kullanılacak asfalt çimentosunun şartnamelerde istenen özelliklere sahip olduğunu doğrulamak için bir dizi standart test ile özellikleri belirlenir. Bu özellikler, kaplamanın durumu ve dayanıklılığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir.

2.2.1. Penetrasyon Deneyi

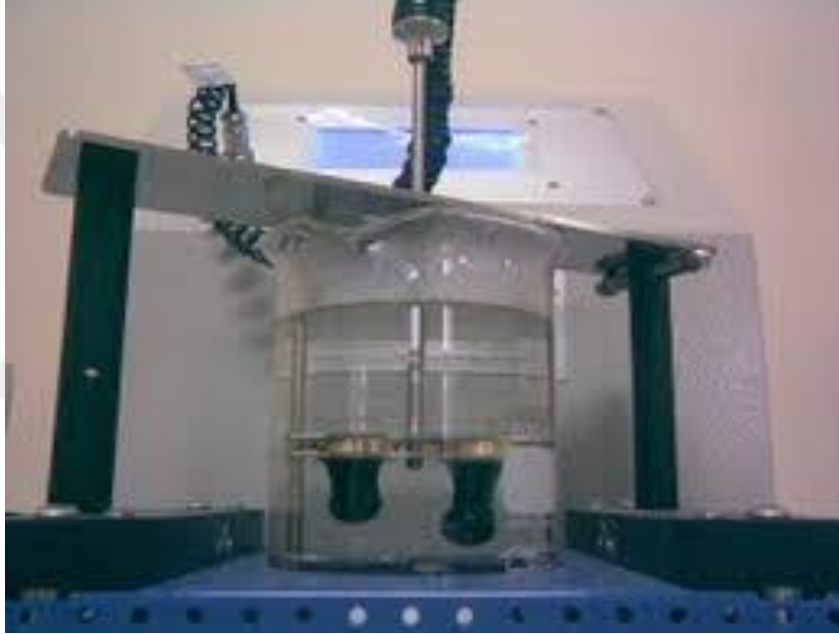
Penetrasyon Testi Bitüm bağlayıcının sertliği veya kıvamı belirlenir. Bir iğnenin belirli bir yük altında standartlara göre bir süre asfalta dikey batırıldığı mesafe 0,1 mm olarak verilir. Sonuç ne kadar yüksek olursa, bitüm o kadar yumuşak olur.



Şekil 5. Penetrasyon deney aleti ve deneyin yapılışı

2.2.2. Yumuşama Noktası Deneyi

Asfaltların viskozitesi, sıcaklık değişimlerinden daha fazla etkilenir. Asfaltların bu özelliklerine ısı duyarlılığı denir. Farklı işlenmemiş petrol rollerden yapılan asfaltların sıcaklık değişimlere göre farklı hassasiyetleri vardır. Asfaltın sıcaklık değişimlerine duyarlılığını ölçmenin en kısa ve en kolay yolu, halka ve bilye yöntemini kullanarak yumuşama noktasını bulmaktır.



Şekil 6. Yumuşama noktası deneyi yapılırken bir kare

Yumuşama noktası, bitümlü malzemenin su banyosuna yerleştirilmiş standart çaplı bir bilye ile standart bir kalıpta belirli bir hızda ısıtılarak yumuşatılmış malzeme zemine değdiği anda ölçüm aletinde gözlenen sıcaklıktır.

Yapılan deneyde gerekli standartlar dikkate alınarak kap 5°C'ye soğumuş distile su ile doldurulmuştur. Numuneli halka özel yerine yerleştirildikten sonra küre suya

daldırılmıştır. -2 ile 80 °C arasında bölünmüş termometre, civa odasının ucu halkanın alt yüzeyi ile aynı seviyede ve halkadan 0,5 cm uzakta olacak şekilde banyoya asıldı.

15 dakika boyunca 5°C'de sabit tutulan su banyosunun daha sonra uygun maşa kullanılarak top halkadaki numunenin ortasına yerleştirildi. Daha sonra 3 dakika süreyle banyonun suyu dakikada 5°C'lik bir oranda ısıtıldı. Sıcaklık yükseldikçe yumuşayan malzeme kabın dibine değdiğinde termometreden okunan değer yumuşama noktası olarak kaydedilmiştir.

2.2.3. Düktilite Deneyi

Esneme veya büzülme anlamına gelir. Bu, asfalt çimentolarının önemli özelliklerinden biridir. Uzaması yüksek asfalt çimentoları, düşük düktil değerlerine sahip asfalt çimentolarına göre daha üstün yapışma özelliğine sahiptir. Düktilite değerleri çok yüksek olan asfaltlar ise sıcaklık değişimlerine daha duyarlıdır. Bu nedenle çeşitli asfaltların düktil değerleri sınırlıdır.



Şekil 7. Düktilite Deneyi; bitümün kopmadan uzayış şekli

Standart formda yapılmış bir numunenin belirtilen test koşulları altında kırılmadan gerebileceği miktarın belirlenmiş değeridir. İlgili standarda göre test için asfalt çimentosunun ısıtılıp akması sağlanarak, 280 µm'lik bir elekten süzülerek ve Vazelin uygulanmış kalıbına dökülerek 3 adet süneklik numunesi hazırlanmıştır.

Oda sıcaklığında ve 30 dakika 250°C'lik su banyosunda duran numuneler fazla kısımları kesilerek sıcak spatula ile ve daha sonra 250°C'lik banyoda 1,5 dakika daha bekletilerek düzeltilmiştir ve saat tutulmuştur. Plakadan ayrılan ve kalıp kenarlarından çıkarılan numuneler hızlı bir şekilde süneklik fikstürüne yüklendi ve kırılana kadar dakikada 5 cm hızla çekildi. Numuneler kırıldığında cihazın kenarındaki cetvelden cm cinsinden uzama miktarları okunmuş ve bu üç numunenin ortalaması alınarak asfalt kalıntısının sünekliği bulunmuştur.

2.2.4. Çözünürlük Deneyi

Çok az mineral madde içeren veya hiç içermeyen bitümlü bağlayıcıların organik çözücüler olan benzen, trikloretilen ve karbon disülfid gibi içindeki çözünürlüğünü tespit etmek için yapılan testtir. Bitüm, en az %99 trikloretilende çözünür olmalıdır.



Şekil 8. Trikloretilende çözünürlük deneyi

2.2.5. Parlama Noktası Deneyi

Alevle temas eden bir madde buharı geçici olarak için yandığı ancak yanmasının sürmediği en düşük sıcaklıktır. Bir maddenin parlama noktasının uygulama sırasında o malzemeyi ısıtırken oluşabilecek tutuşma ve yangın tehlikelerini önlemek için çok önemlidir.



Şekil 9. Parlama Noktası Deneyi

Asfalt çimentosunun parlama noktası genellikle Cleveland Open Cup yöntemi ile belirlendi. Küçük bir kaba yerleştirilen asfalt çimentosu, sıcaklığını dakikada 15°C artırmak için ısıtıldı. Zaman zaman numunenin yanına 4 mm çapında küçük bir alev getirildi. Numune yüzeyinde herhangi bir noktada alev görüldüğünde okunan sıcaklık, asfaltın parlama noktasıdır.

2.2.6. Özgöl Ağırlık Deneyi

Yoğunluğu, 25 derecede havadaki hacminin, aynı sıcaklıkta ve aynı hacimdeki havasının alınmış damıtılmış suyun ağırlığında oranıdır. Özgöl ağırlık genellikle piknometre yöntemi kullanılarak belirlenir.

2.3. Agrega rneklerine Uygulanan Deneyler

2.3.1. Elek Analizi Deneyi (ASTM C136, ASTM C117)

Asfalt kaplamalarda karışma katılacak olan agregaların tane boyut dağılımını belirlemek için aşağıda açıklığı verilen delikli elek araçları kullanılmaktadır.



Şekil 10. Elek analizi gerçekleştirildikten sonra boyutlara göre sınıflandırılmış hali

Agreganın tane boyutu dağılımını bulmak için yapılan deneydir. Test sonucunda bulunan gradasyon sınıflandırma için kullanılır, gradasyonun şartnameye uygunluğu kontrol edilir ve agregaların karışım oranları hesaplanır.

Agreganın maksimum tane boyutuna göre aşağıda verilen miktarlarda kareleme yöntemi veya bölge temsilcisi kullanılarak alınır ve 110 °C 5 °C sıcaklıktaki bir fırında veya havada kurutulur.

Kurutulan numune tartıldıktan sonra 200 No'lu elekten yıkanır. Yıkanan numune bir etüvde 110o -50C'de kurutulur. Malzemenin %100'ünü geçiren eleklerden başlayarak alt eleklerden ayrı olarak taranır. Her elek üzerindeki kalıntı kümülatif bir şekilde tartılır. Tartımlar elek analiz formuna aktarılır. Nemi alınmış numune kullanılarak, her elekte kalan miktarların yüzdesi ve ardından yüzde verim hesaplanır.

2.3.2. Los Angeles Aşınma Deneyi (ASTM C131, AASHTO T96, TS EN 1097-2)

Los Angeles Yıpratma Testi, agrega partiküllerinde darbe ve yıpratma nedeniyle aşınmanın belirlenmesini sağlar. Bu test ile tane boyutu 75 mm'den daha az olan iri agregaların Los Angeles aşındırma makinesi ile aşınmaya direndiği bulunmuştur.



Şekil 11. Los Angeles aşınma deneyi yapılırken bir kare

Deneyde, iki ucu kapalı içi boş silindir şeklindeki makineye metal bileme bilyeleri konur ve makine belirli bir hızda ve belirli bir hızda çalıştırılır. Aşınma kaybı, testin

başında çıkarılan malzemeye kıyasla metal bilyeler üzerine düşmeyle aşınan malzemenin ağırlık yüzdesidir.

2.3.3. Hava Tesirlerine Karşı Dayanım Deneyi (AASHTO T104, TS EN 1367-1)

Uzunca bir zaman hava tesirine maruz kalan agregaların donma-çözülme direncini belirleyebilmek adına hızlı yapılan bir testtir. Deneyde Na_2SO_4 ve MgSO_4 çözeltileri kullanılabilir. 4.75 mm üzerindeki agregaya donma ve çözülme periyodu olarak deney uygulanmakta ve bu işlemler sonunda meydana gelen kayıp yüzdesi hesaplanmaktadır. Agreganın üzerindeki etkisi, doğada 500 donma ve çözülmedir.



Şekil 12. Donma deneyi için soğutucu şekildeki gibi izlenilmekte

2

2.3.4. Cilalanma Deneyi (TS EN 1097-8)

Trafikte sürtünme ile aşındığında agreganın cilalanma derecesini belirlemek için yapılır. Laboratuvarında yol benzeri koşullar Agreganın cilalanabilme değeri belirlenir. Testte 10 mm BS elekten geçirilmiştir. 10-14 mm düz ekran içinde kalan agregaya kullanılır.

Briketler bu katkılardan hazırlanır ve polisaj makinede hızlandırılmış aşınmalara tabi tutulur. Daha sonra bir alet ile parlatma değeri ölçülür.



Şekil 13. Cilalanma Deneyi Aleti ve Uygulama Aşaması

Yüksek cilalama değerine sahip sert ve pürüzlü agregalar, çok sert olmayan ve pürüzlülüğü düşük olan agreganın (örn. kireçtaşı) düşük parlatma değeri vardır. Yüksek cila agregaları ile uygulanan kaplamanın pürüzlülüğü ile buna bağlı olarak kayma direnci yüksektir. Bununla birlikte, kayma mukavemeti ayrıca karışımın derecesine ve tipine de bağlıdır.

2.3.5. Özgür Ağırlık ve Absorpsiyon Deneyi (ASTM C127, TS EN 1097-6)

Yoğunluk agregalar için birim hacimdeki ağırlığının bu agreganın, yine kullanılan hacimde ve 250 °C'deki suyun ağırlığına oranıdır. Hacmin tanımı buna göre, üç tür dane özgül ağırlığı vardır.



Şekil 14. Özgöl ağırlık ve absorbsiyon deneyi

Agrega belli bir sıcaklık ile geçirimsiz boşluklarını barındıran birim hacimdeki havanın ağırlığının, aynı sıcaklık ve hacim ile havası alınmış damıtık suyun ağırlığına oranı zahiri özgül ağırlıktır.

Belli bir sıcaklık ile agregalar geçirgen ve geçirimsiz boşluklarını içeren birim hacmin ağırlığı, aynı sıcaklık ve hacimdeki havanın ağırlığı ve aynı hacimdeki gazı alınmış damıtılmış suyun ağırlığı sıcaklık ve aynı hacimde oranı hacim özgül ağırlıktır.

Asfaltın geçirgen boşlukları hariç, kayanın geçirgen ve geçirimsiz boşluklarını içeren birim hacmin hava ağırlığının, aynı sıcaklıkta ve aynı sıcaklıktaki damıtılmış suyun ağırlığına oranı efektif özgül ağırlıktır.

2.3.6. Yassılık İndeksi Deneyi (BS 812)

Normal boyutu 0,6'sından az olan agreg a tanelerinin düz gibi tanımlanmasına dayanan bir yöntemdir. Paçal numunelerin düzlük indeksi, belirli açıklıklara sahip bir şablonla ayrılmış yassı tanelerin ağırlığı, toplam numune boyutudur ağırlığının yüzdesi olarak ifade edilir.



Şekil 15. Yassılık indeksi deneyi deney aparatı ve yapılış anı

2.4. Karışım Tasarımı

Bir tesiste karıştırılan agrega ve bitümün hazırlanan karışımlara, agrega kurutulduktan ve iyi karışma ve işlenebilirlik için ısıtıldıktan sonra ve asfalt çimentosu uygun akışkanlık için ısıtıldıktan sonra bitümlü sıcak karışım (BSK) uygulanır.

Asfalt kaplamalar için karışım dizaynı temel amaçları aşağıdaki şekilde toparlanabilir.

- Sağlam (kalıcı) bir kaplama elde etmek için gerekli olan bitüm miktarının belirlenmesi
- Trafik yükleri altında deforme olmayacak yeterli mukavemeti sağlamak
- Sıkıştırılmış katmanda trafik altında oluşabilecek çok düşük sıkıştırma; Kanama, akış ve stabilite kaybı olmayan ancak katmanda nem ve fazla hava içermeyen bir ara boşluk sağlamak.
- Karışımdan arındırmadan düzgün sermeyi sağlamak için ekonomik bir karışımın belirlenmesi ve işlenebilirlik ile tesviye edilmesi [13].

Marshall numuneleri ASTM D 1559 standardına göre hazırlandı. Karışım toplam 1150gr agrega ile oluşturuldu. Tip 1 A ya göre dizayn edilmiş yoğun gradasyonlu asfalt kaplamalar için optimum bitüm içeriğimiz olan %5,1 değerinin içeriğinin 3 kademe altı ve

üstünde (4,8-4,9-5-5,10-5,20-5,30-5,40) oranlarında 143 °C ve 137 °C sıkıştırma sıcaklığında briketler hazırlandı.

- Taş ocağından temin edilen karışık granülömetrideki agregalar eleme işlemine tabi tutuldu.



Şekil 16. Eleme işlemi yapılarak ocaktan gelen malzemenin boyutlarına ayrılması

- Agregalar elendikten sonra boyutlarına göre ayrı tepsilere konulmuştur.



Şekil 17. Malzeme elendikten sonra boyutlarına göre tepsilenmesi

- Daha sonra belirlenen şartname limitleri içerisinde kalan granülometriye göre poşetleme işleri yapıldı.



Şekil 18. Daha önceden belirlenen granülometriye göre agregaların poşetleme işlemi

- Numuneler bir sonraki gün yapılacak olan briket üretimi için etüvde 24 saat kurumaya alındı.



Şekil 19. Etüve konularak 24 saat kurumaya bırakılan numuneler

- Bitüm içerikleri belirlenen numunelere uygun ağırlıklarda bitüm eklendi.



Şekil 20. Bitüm içeriği tartı üzerindeki sıcak agregaya eklenmesi

- Agregaya ve bitümü hedeflenen sayılarda karıştırma işlemi gerçekleştirildi.



Şekil 21. Bitüm ile karıştırıldıktan sonra sıkışmaya hazır hale gelen numuneler

- Araştırma konusuna uygun düşecek şekilde 143 ve 137 derece karışım sıcaklığını hassas bir şekilde lazer termometre ile ölçüm yapıldı.



Şekil 22. Lazer Termometre ile sıcaklık değerlerinin belirlenmesi

- Numunelerimizi ürettikten sonra karışıklık olmaması adına düzgün şekilde numaralandırıldı.



Şekil 23. Kriko sonrası numaralandırılan numuneler

- Numuneler son olarak Marshall Stabilitate deneyine tabi tutulup çıkan sonuç akma ve dayanım değerlerini not alındı.



Şekil 24. Marshall Stabilite Test cihazı

2.4.1. Stabilite ve Akma Değerlerinin Tespiti

- Briketlerin yüksekliği ölçülmesi
- Briket için hacim özgül ağırlığının belirlenmesi
- Briketlerde Marshall stabilite ve verim testlerinin yapılması,

- Marshall Formunda kaydedilen tüm test ve ölçüm sonuçlarına göre, briketlerin ortalama yüksekliği hesaplandıktan sonra, tüm bitüm yüzdeleri ve D_p (pratik yoğunluklar), D_t 'ler (teorik özgül ağırlıklar), V_h (hava boşlukları), VMA (agrega mesafesi)), V_f (asfalt ile doldurulmuş b.) Stabilite ve ortalama stabilite ve briket yüksekliğine göre düzeltilmiş akma değerleri hesaplanır [13].



3. BULGULAR VE İRDELEME

Veriler değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlara varmak olanaklı gözükmektedir. Yapılan Marshall tasarımında optimum bitüm oranı olarak %5.10 değeri belirlenmişti. İki farklı sıcaklık koşulunda 4.8-4.9-5.0 oranları olarak optimum bitüm oranından daha düşük civar değerler, 5.2-5.3-5.4 oranları olarak da optimum bitüm oranından daha büyük değerler seçilmiştir.

143°C sıkıştırma sıcaklığı 137°C sıkıştırma sıcaklık değerine göre daha yüksek Marshall stabilite değeri vermektedir. Akma değerleri açısından bakıldığında ise 5.2-5.3-5.4 oranları için yani optimum bitüm oranından daha yüksek artan değerlerde bitüm oranının artmasıyla akma değerleri artmaktadır. 143°C sıkıştırma sıcaklığı 137°C sıkıştırma sıcaklık değerine göre bu bitüm oranları için daha düşük akma değerleri vermektedir.

Ortalama değerler yorumlandığında; Marshall stabilite değerleri optimum bitüm değerinden daha düşük değerlerde daha yüksek Marshall stabilite değerleri bulunmaktadır. Bu seçilen her iki sıkıştırma sıcaklığı için de geçerlidir.

Optimum değer olan %5.10 değerine kadar soldaki değerler için Marshall stabilite değeri tedricen azalmakta olup sağdaki artan değerler için ise artma eğilimindedir. Bu yorum seçilen hemen civar değerler için yorumlanmaktadır. Oldukça daha düşük ve oldukça daha yüksek değerler için bu genelleme yapılamaz.

Genel bir yaklaşım olarak optimum bitüm değeri olan %5.10 değerinin (+-) %0.30 değişim aralığında yani seçilen oran değerleri için stabiliteler anlamında değişim aralığı büyük kalmamıştır. Şöyle ki, bu bitüm oranları için elde edilen değerler anlamındaki fark bitüm oranına bağlı olmaksızın 137°C sıcaklık için %11 düzeyinde farklılaşabilmektedir. Ancak 143°C sıcaklık koşulu söz konusu olduğunda, ortalamalar anlamında bu değişim aralığı %20 değerine kadar farklılaşabilmektedir. Dolayısıyla daha yüksek karıştırma sıcaklığı için farklı bitüm yüzdelere bağlı olarak stabilite değişim aralıkları artmaktadır. Bu durumda daha yüksek sıcaklık koşullarında karışım homojenliğinin sağlanmasına çok daha fazla dikkat edilmesini gerektirmektedir.

Sıkıştırma sıcaklıklarının artması, daha büyük stabilite değerlerinin alınmasına neden olmaktadır ancak bununla birlikte daha yüksek sıkıştırma sıcaklığı özdeş örnekler arasındaki daha büyük standart sapmalara karşılık gelmektedir. Yüksek sıcaklık koşullarında karışımın hazırlanması ve sıkıştırılması koşullarına daha büyük itina ve özen gösterilmesi gerekmektedir.

%4.8 değerinden %5.40 bitüm oranı değerine %0.1 artışlarla gidildiğinde her iki sıcaklık koşulu için de düzeltilmiş stabilite değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu sonuç, mantıklı olarak görülmektedir. Optimum bitümden daha düşük civar bitüm değerlerinde daha yüksek stabilite edilmesi daha rijit bir karışımı daha yüksek bir bitüm içeriğinde daha düşük bir stabilite değeri de daha esnek bir karışımı işaret etmektedir. Bu sonuçta bitümün vizkoelastik özellikleri ile birlikte uyumlu değerlendirilmektedir. Bu doğal sonuç, Marshall deneyleri ile doğrulanabilmiş dolayısıyla Marshall deneyinin plastik akmaya karşı olan davranışı belirlemesi noktasında ki etkinliği gözlemlenmiştir. Her iki sıcaklık koşulu için en yüksek akma değerlerinin büyük çoğunlukla optimum bitümdeki akma oranı olarak görüldüğü şekillerden anlaşılmaktadır.

3.1. Deney Sonuçları

3.1.1 Agregâ Deney sonuçları

Tablo 1. Agregâ Özellikleri

Özellik	Deney metodu	Değer	Şartname limitleri
Özgöl ağırlık (Kaba agregâ)	ASTM C 127		
Hacim		2,707	
Zahiri		2,733	
Özgöl ağırlık (ince agregâ)	ASTM C 128		
Hacim		2,763	
Zahiri		2,766	
Özgöl ağırlık (filler)		2,242	
Parçalanma direnci (Los Angeles) (%kayıp)	TS EN 1097-2	26,7	
Yassılık indeksi, (%)	BS 812	9,71	En fazla 25
Soyulma direnci(katkısız)(%)	ASTM D-1664	60-65	En az 60
Kil toprakları ve ufanabilir daneler, (%)	ASTM C 142		Bulunmayacak
İnce agregâ için plastisite indeksi	TS -1900-1	Plastik değil	Plastik değil
İnce agregâ için organik madde, (%)	TS EN 1744-1		Negatif

Tablo 2. Optimum bitüm içeriği tayini için Marshall dizaynı sonuçları

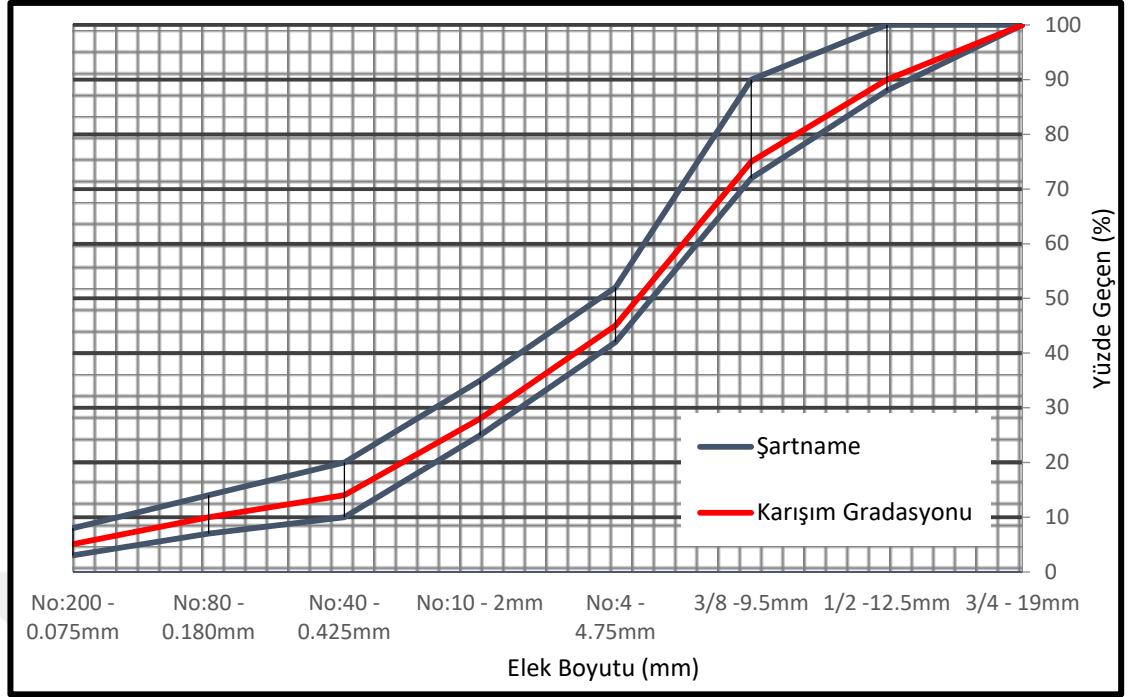
Tasarım parametreleri	Şartname limitleri	Karışım değerleri
Darbe sayısı, her bir yüze	75	75.00
Yoğunluk, gr/cm ³		2.44
Marshall stabilitesi, kg	En az 900	1189
Boşluk, V _h , %	3-5	4.00
Asfaltla dolu boşluk, V _f , %	65-75	71.64
Akma, mm (mm)	2-4	3.48
Bitüm içeriği, (%)	4-7	5.10
VMA, %	14-16	14.37

3.1.2. Seçilen Gradasyon

Karayolları Teknik Şartnamesine göre yoğun gradasyon aşınma tip 1 A ‘ya göre gradasyonumuz aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

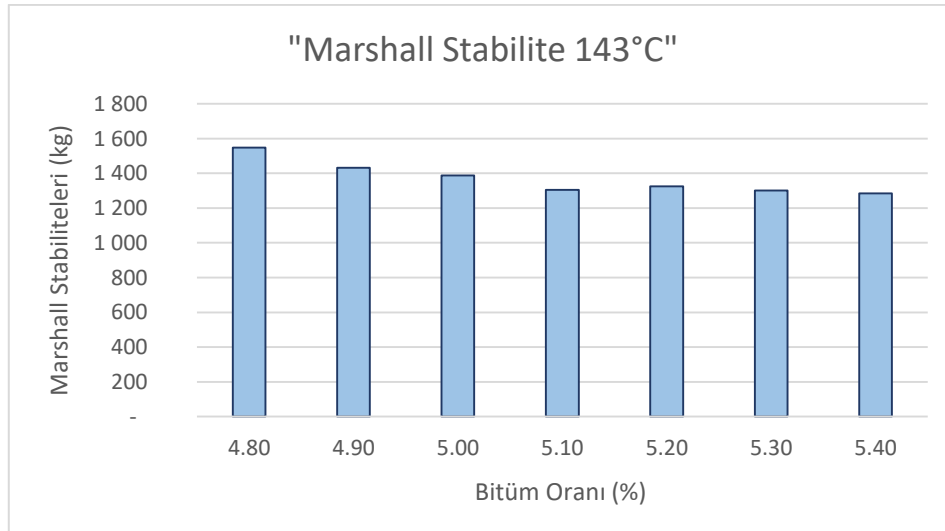
Tablo 3. Seçilen agrega gradasyonuz

Elek No	mm	Aşınma Tip 1 (Şartname)	Aşınma Tip 1 (Dizayn)	Kalan %	Elekler Arası	
					%	Gr
(3/4")	19	100	100	-	-	-
(1/2")	12,5	88 - 100	90	10	10	115,00
(3/8")	9,5	72 - 90	75	25	15	172,50
No.4	4,75	42 - 52	45,04	54,96	29,96	344,50
No.10	2,00	25 - 35	28	72	17,04	196,00
No.40	0,425	10 - 20	14	86	14	161,00
No.80	0,180	7 - 14	10	90	4	46,00
No.200	0,075	3 - 8	5,04	94,96	4,96	57,00
TAVA-PAN				100	5,04	58,00
Toplam					100	1.150,00



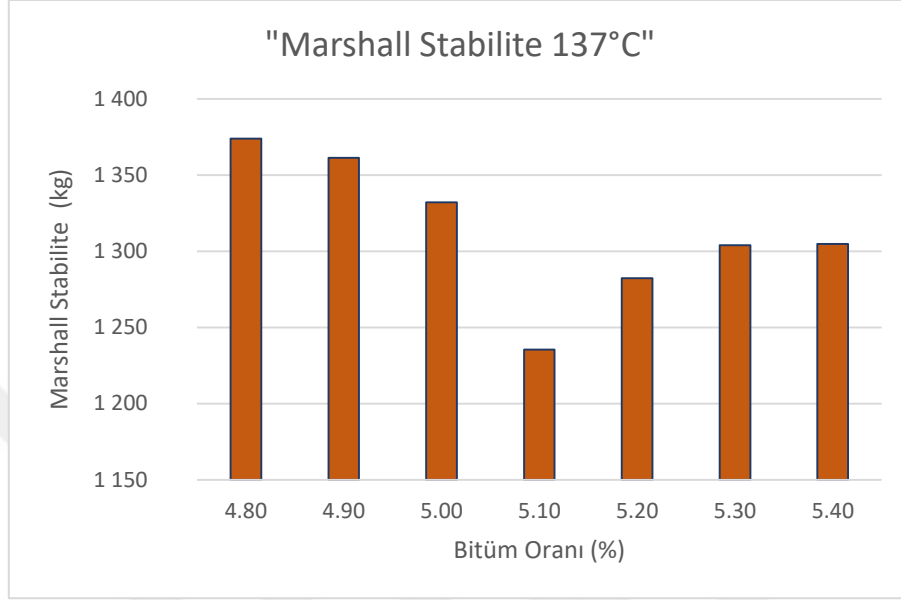
Şekil 25. Seçilen agrega gradasyonu ve şartname sınırları

3.2. Karışım Tasarım Sonuçları



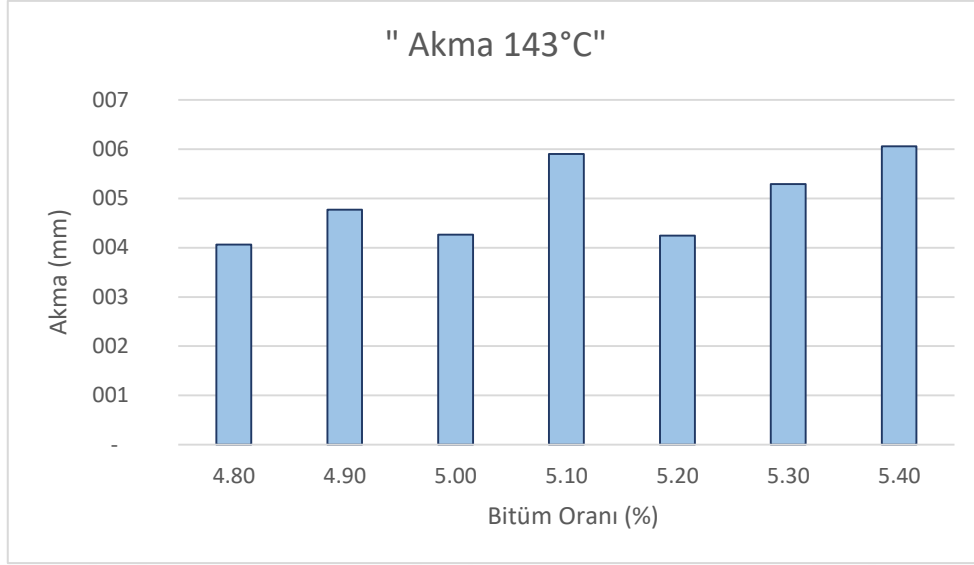
Şekil 26. Değişen bitüm yüzdelere göre 143°C de ortalama stabilite değerleri

Marshall stabilite değeri bitüm içeriği arttıkça olağan şekilde rijitlik azalacağı için genel olarak azalmıştır.



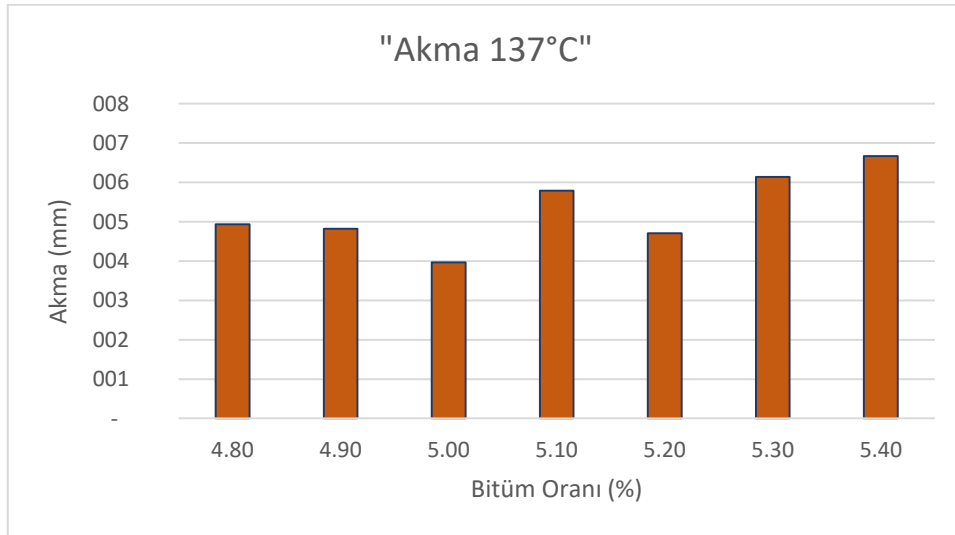
Şekil 27. Değişen bitüm yüzdelere göre 137°C de ortalama stabilite değerleri

Marshall stabilite değeri bitüm içeriği arttıkça olağan şekilde rijitlik azalacağı için genel olarak azalmıştır. Fakat 137°C de optimum bitüm içeriğinden fazla olan değerlerde tersi durum gözlemlenmiştir.



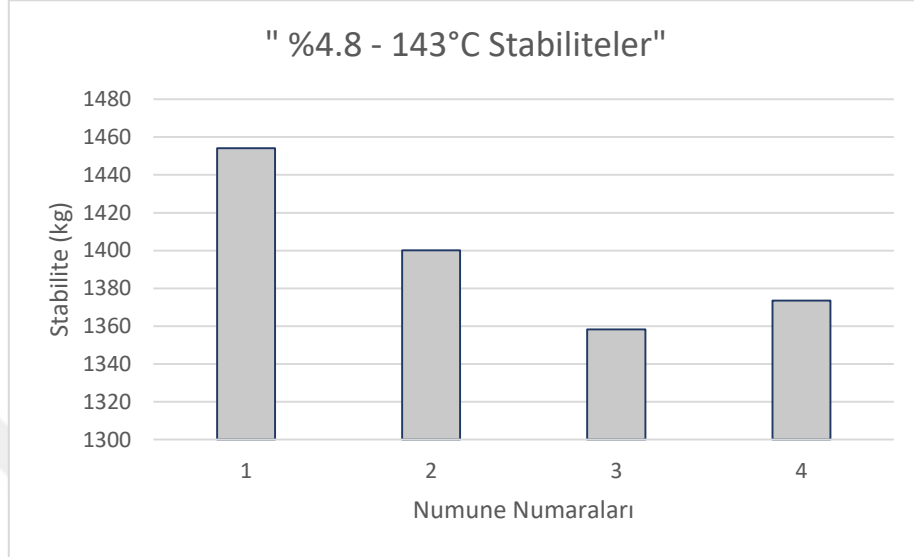
Şekil 28. Değişen bitüm yüzdelerine göre 143°C de ortalama akma değerleri

Akma değerleri bitüm içeriği artıkça esneklik artacağından genel olarak artmıştır.

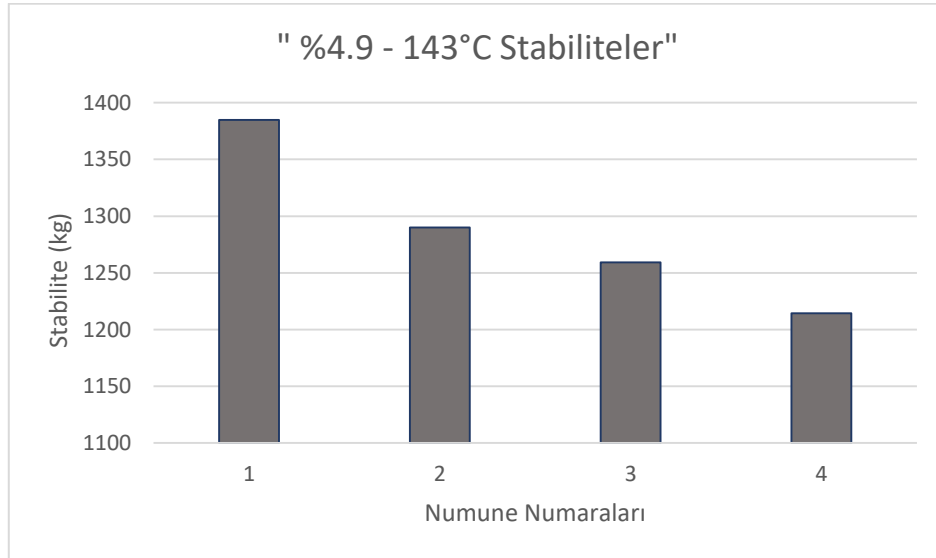


Şekil 29. Değişen bitüm yüzdelerine göre 137°C de ortalama akma değerleri

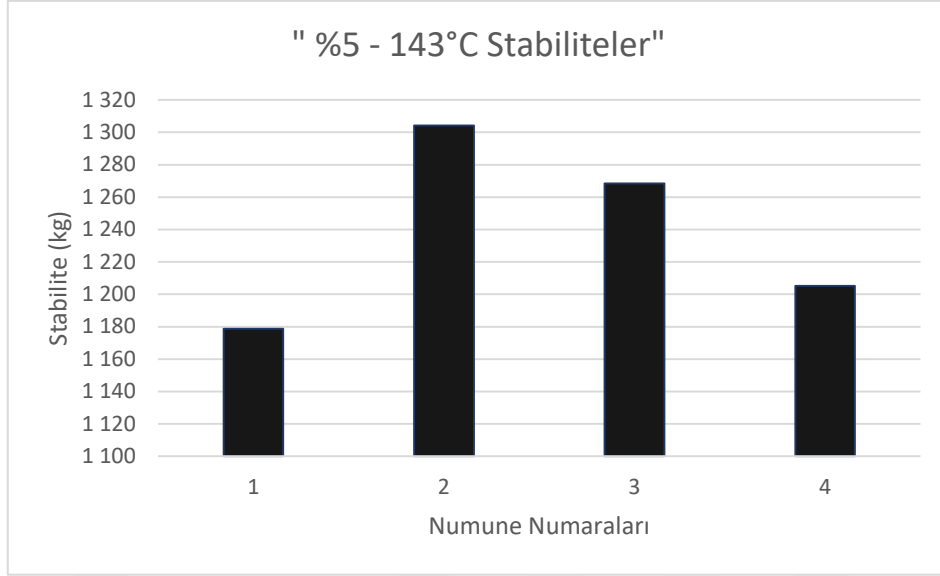
Akma değerleri bitüm içeriği artıkça esneklik artacağından genel olarak artmıştır.



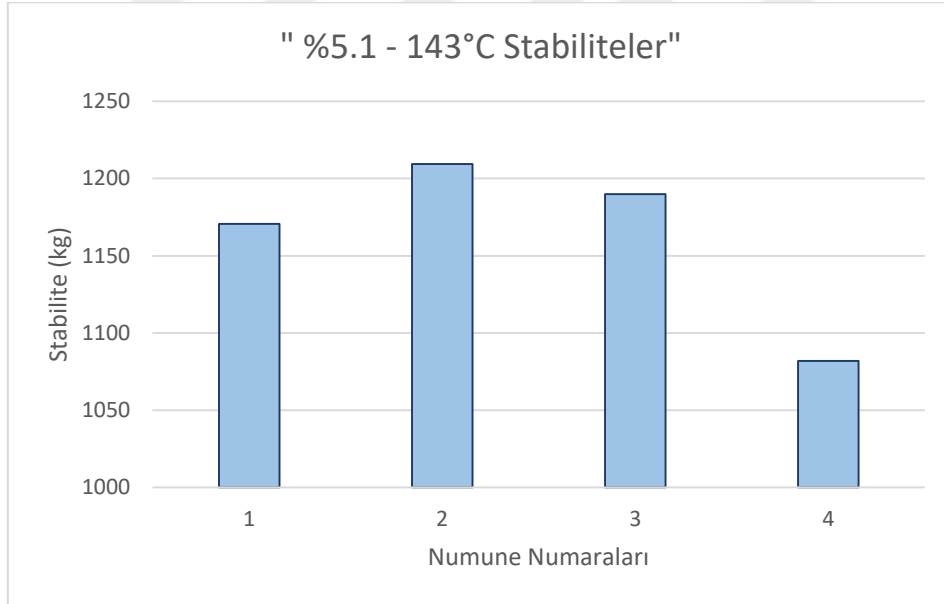
şekil 30. %4.8 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği



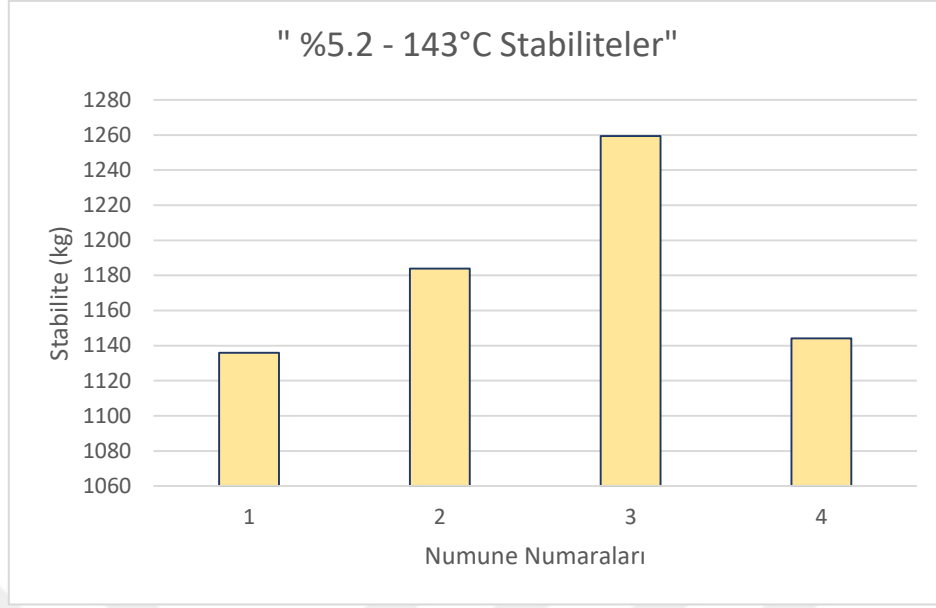
şekil 31. %4.9 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği



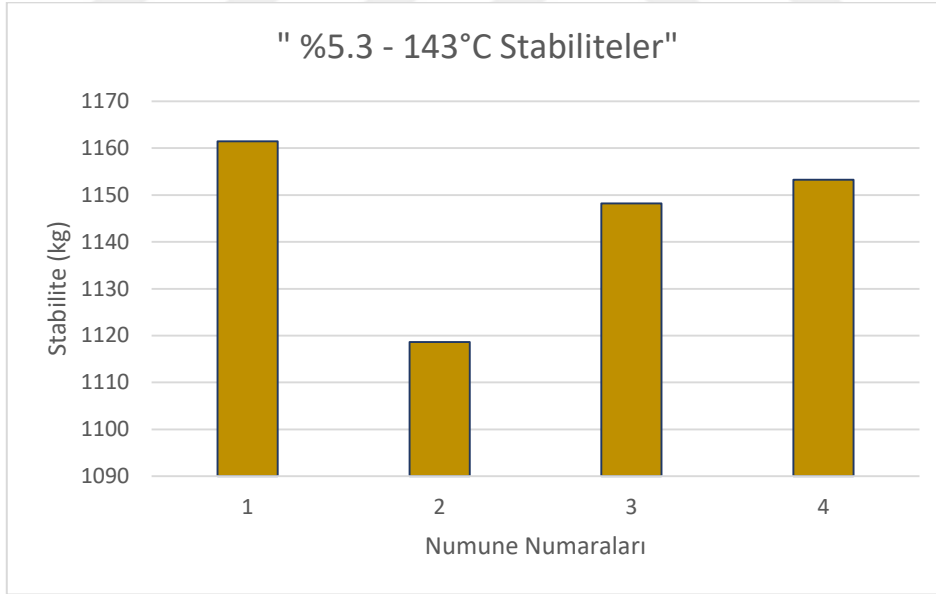
Şekil 32. %5 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği



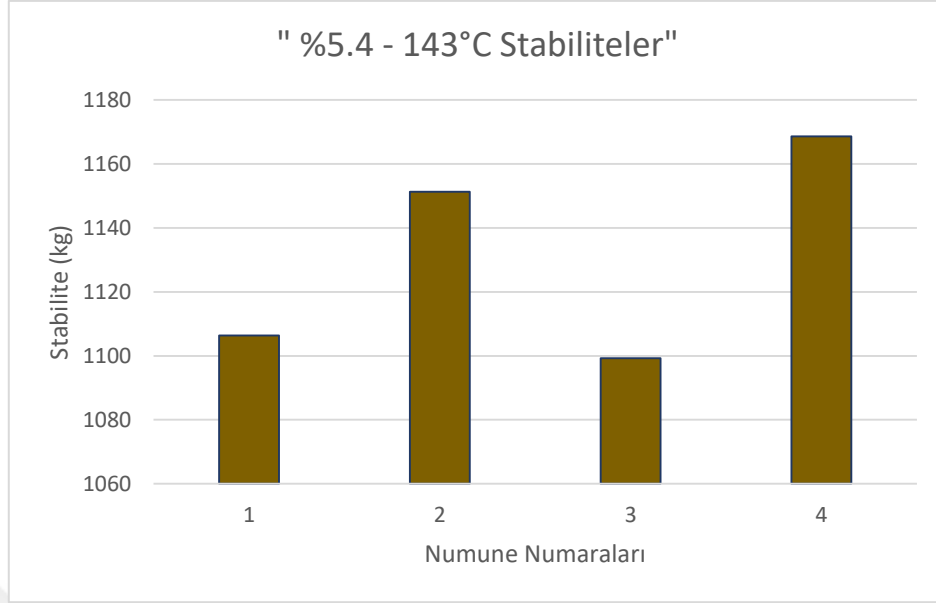
Şekil 33. %5.1 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği



Şekil 34. %5.2 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği

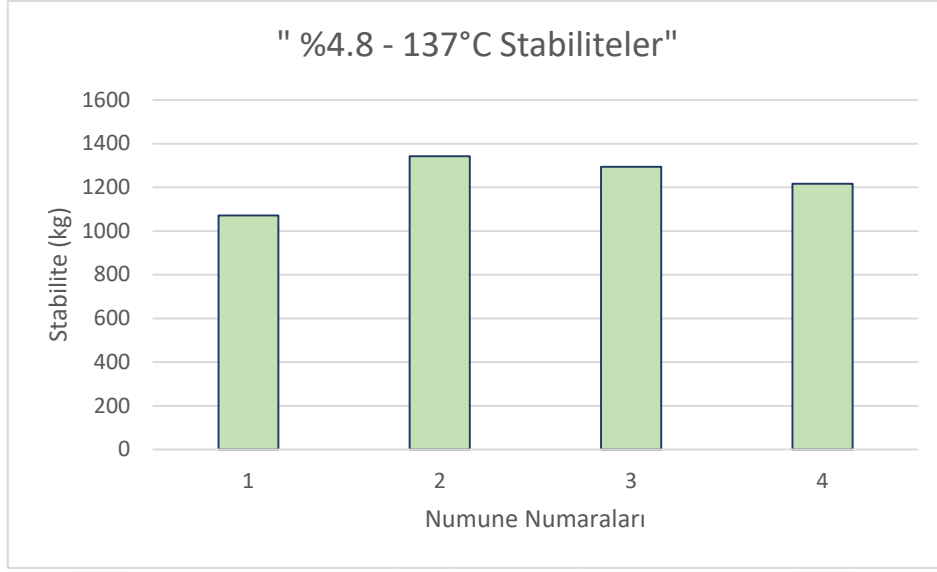


Şekil 35. %5.3 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği

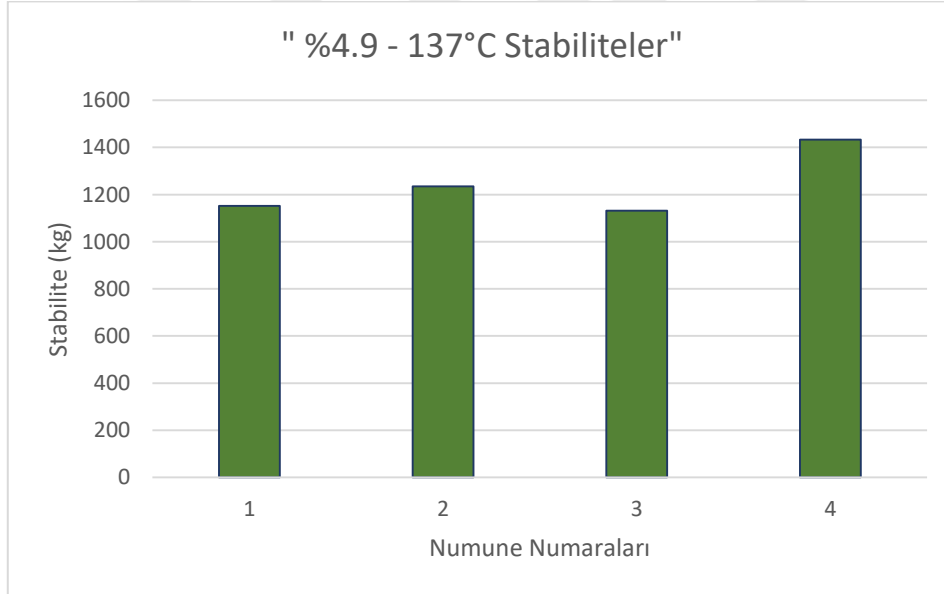


Şekil 36. %5.3 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği

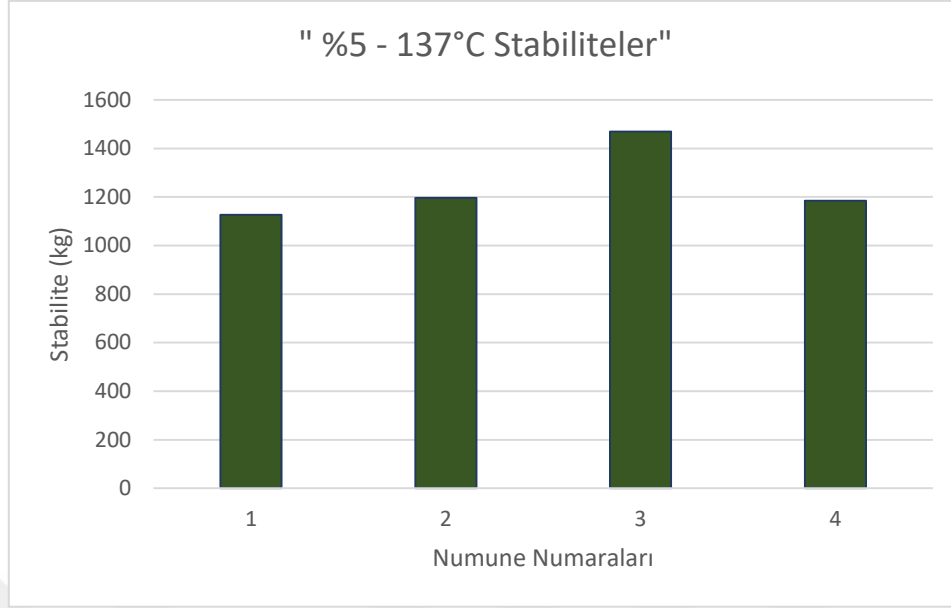
Bu grafiklere bakıldığında 143°C deki numunelerimizin stabilite değerlerinde farklı örnekte gözle görünür sapma olduğu görülür. Bunun sebebi olarak optimal düzeyin üzerindeki sıcaklıklarda sıkıştırılan asfaltın çok titiz hazırlanması mekanik özelliklerinin değişmemesi bakımından önem arz etmektedir, yorumu çıkartılabilir.



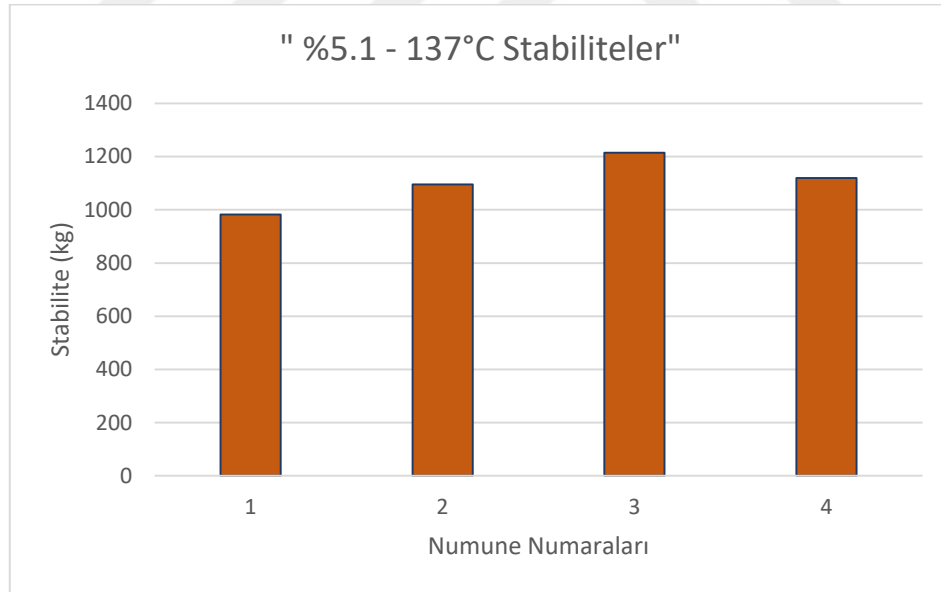
Şekil 37. %4.8 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği



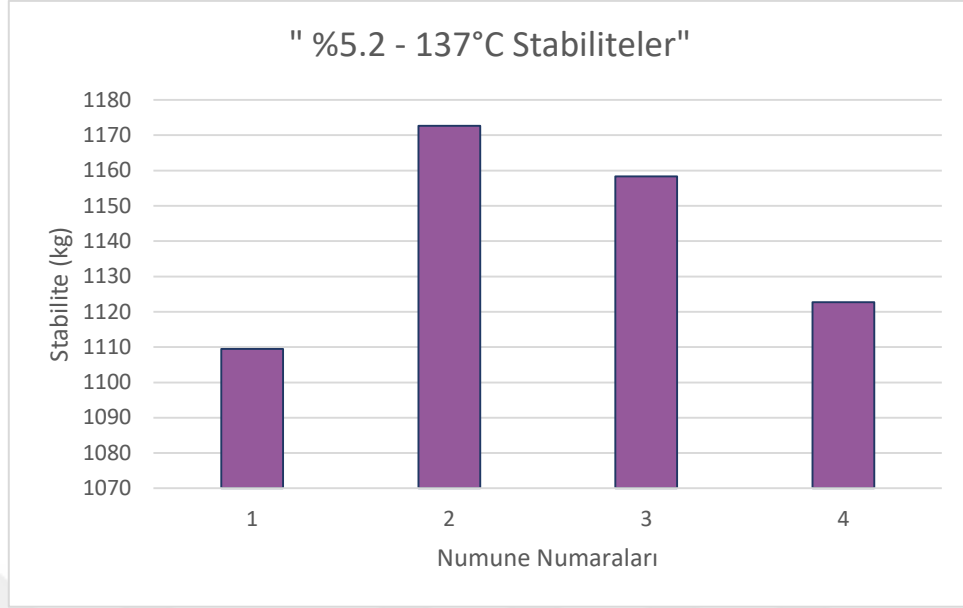
Şekil 38. %4.9 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği



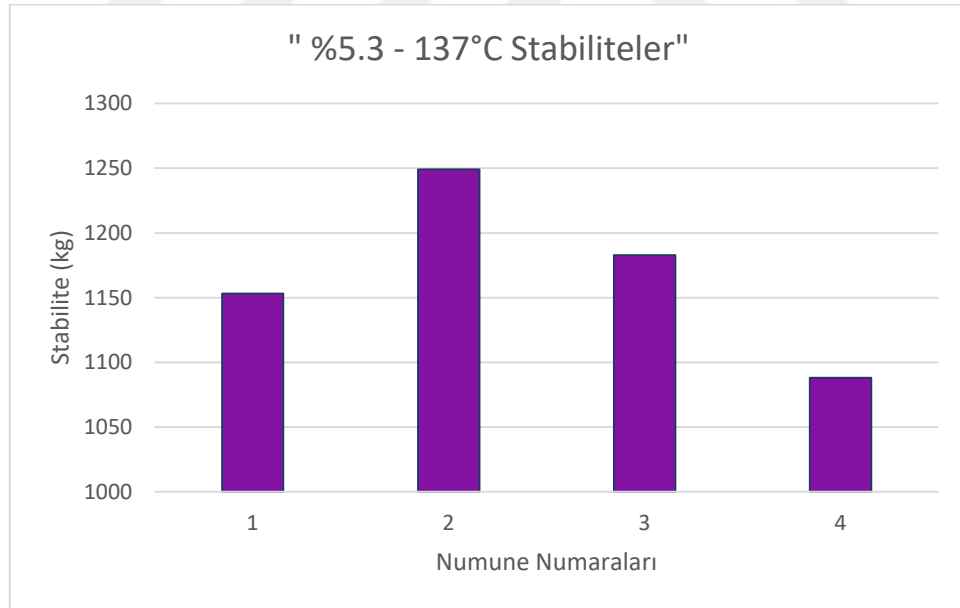
Şekil 39. %5 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği



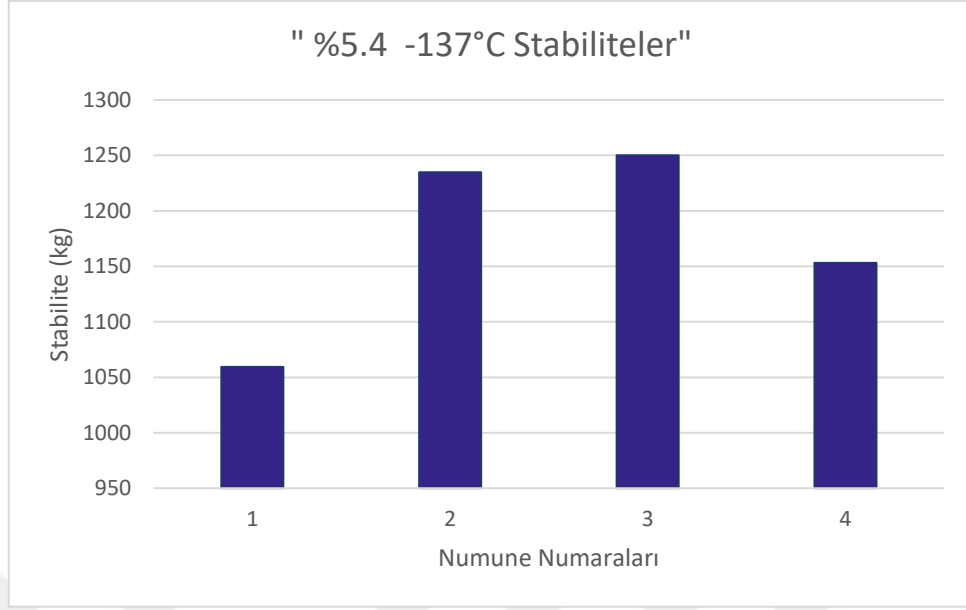
Şekil 40. %5 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği



Şekil 41. %5.2 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği

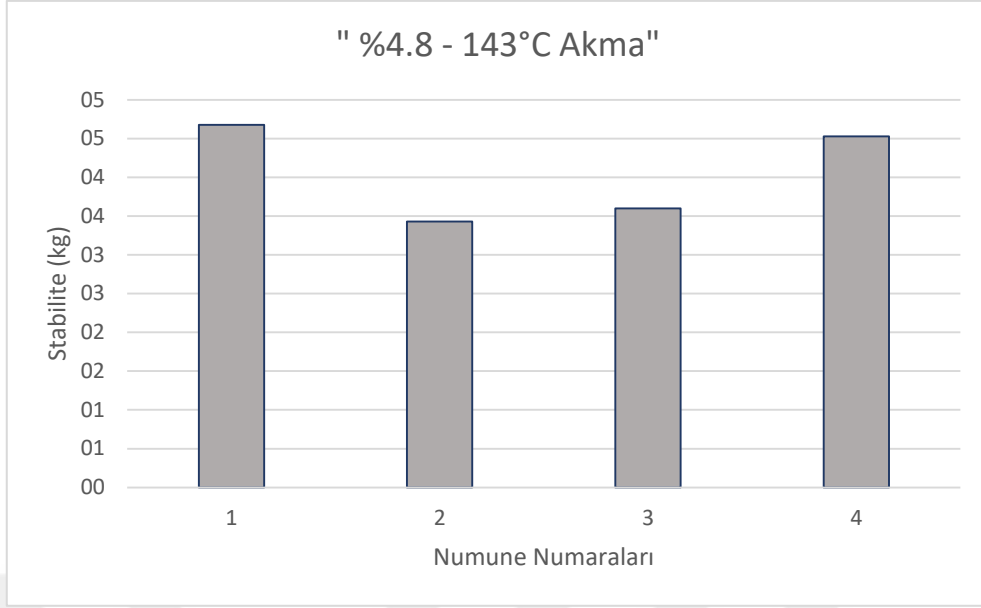


Şekil 42. %5.3 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği

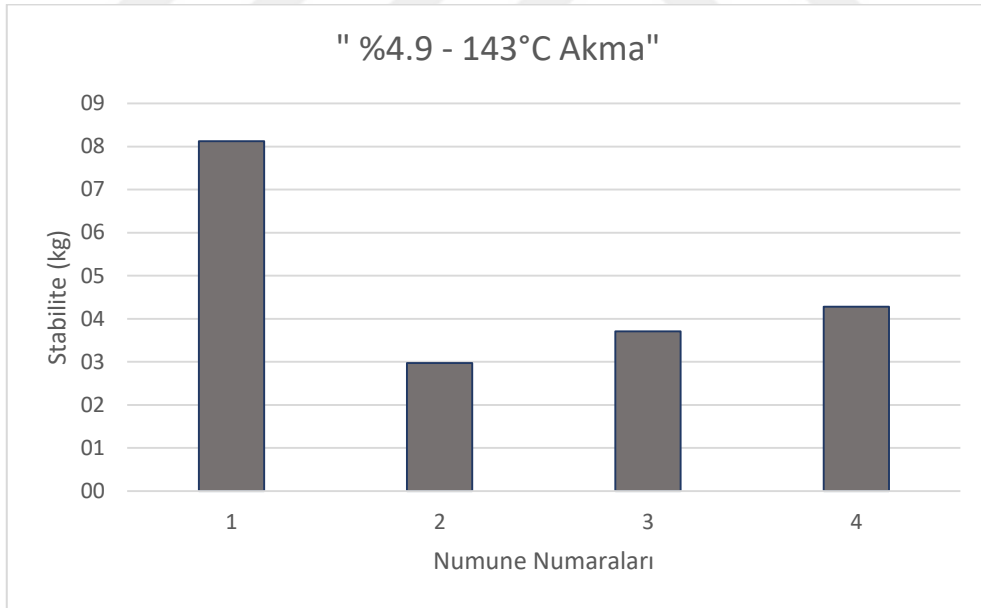


Şekil 43. %5.4 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede stabilite değeri grafiği

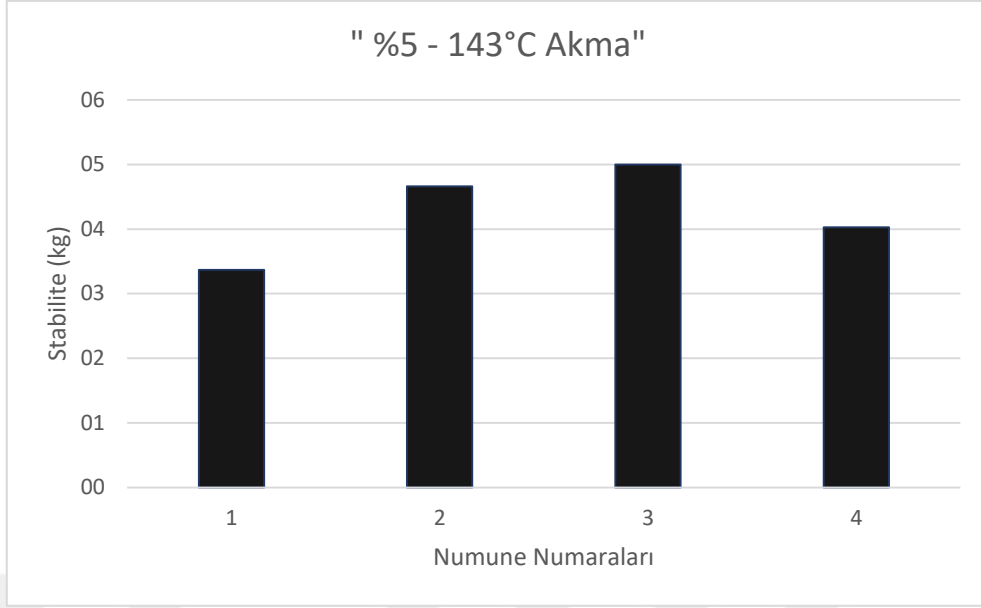
Bu grafiklerden 143 °C sıcaklığında sıkıştırılmış numunelerin 137°C ye göre daha yüksek stabilite değerlerinin olduğu gözlemlenebilir.



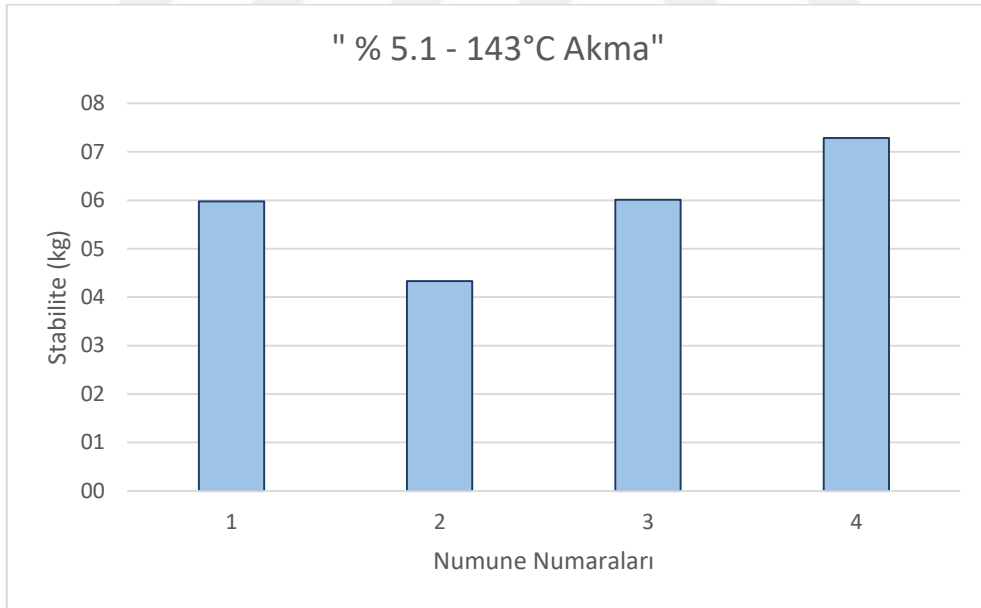
Şekil 44. %4.8 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği



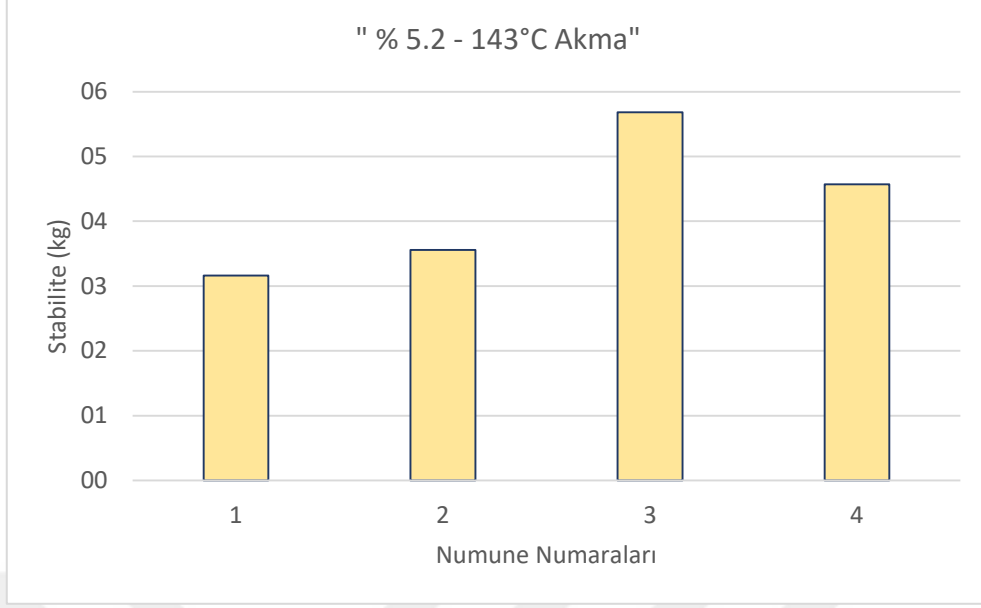
Şekil 45. %4.9 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği



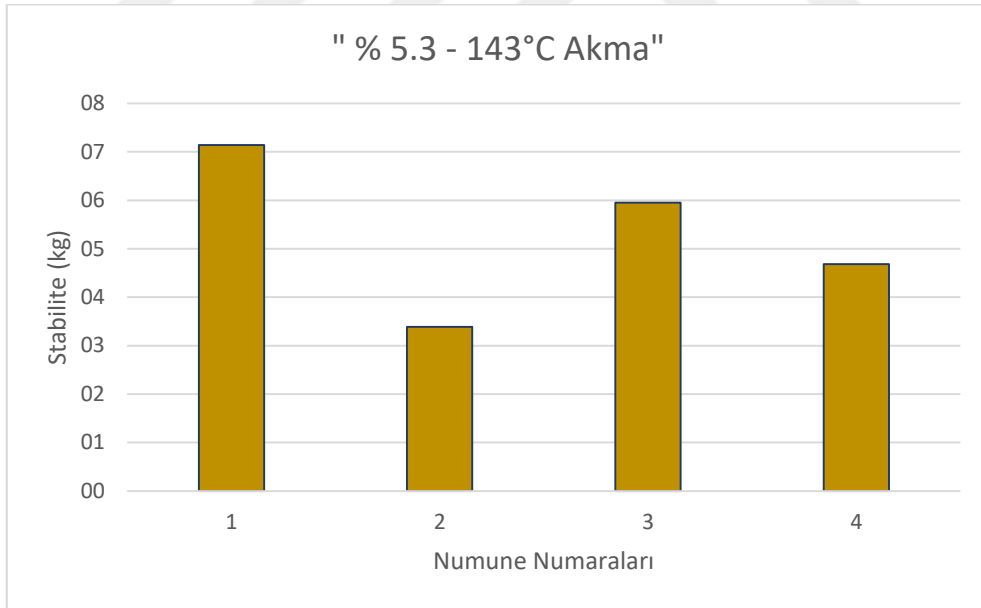
Şekil 46. %5 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği



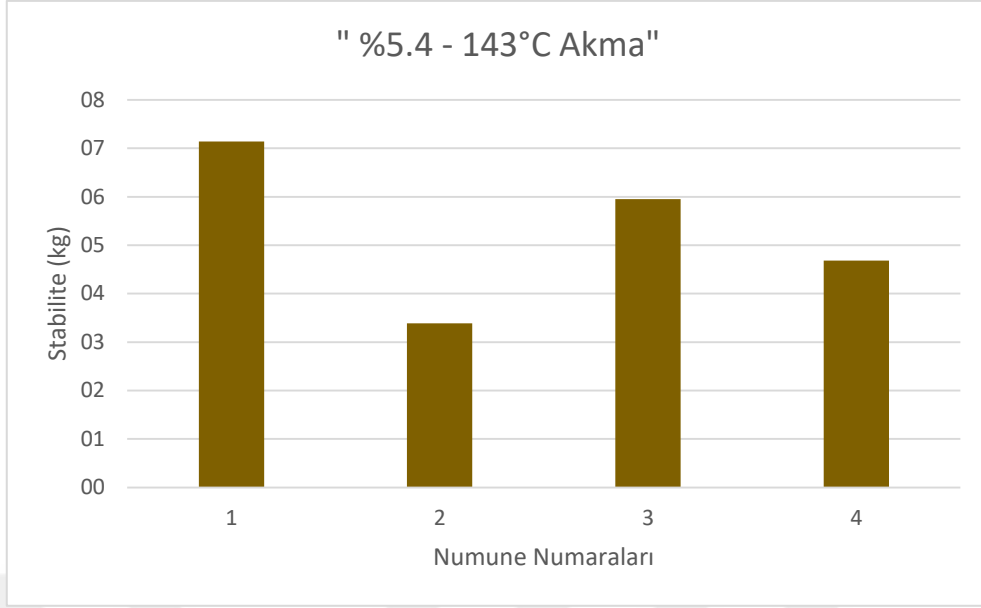
Şekil 47. %5.1 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği



Şekil 48. %5.2 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği

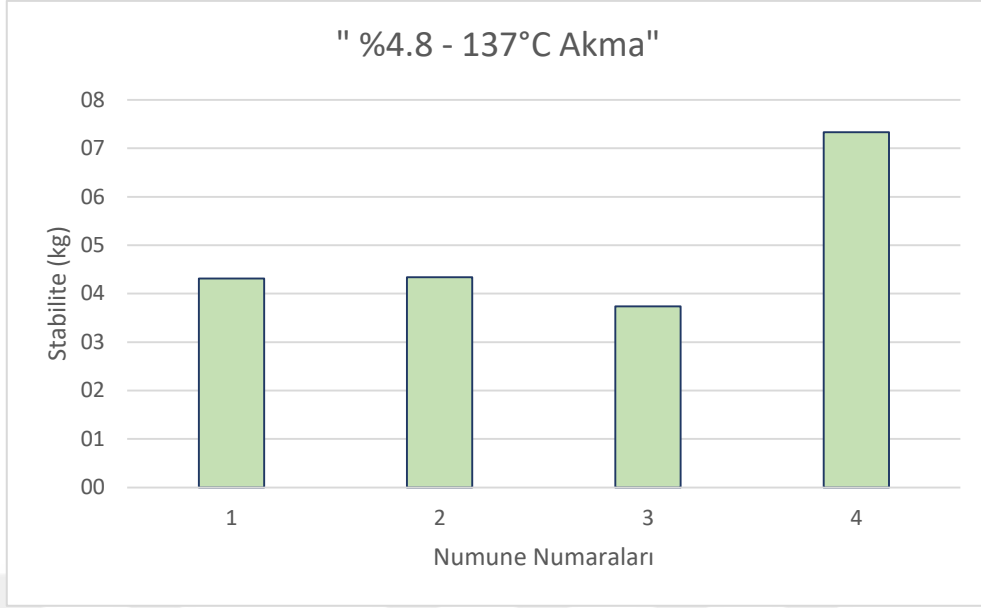


Şekil 49. %5.3 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği

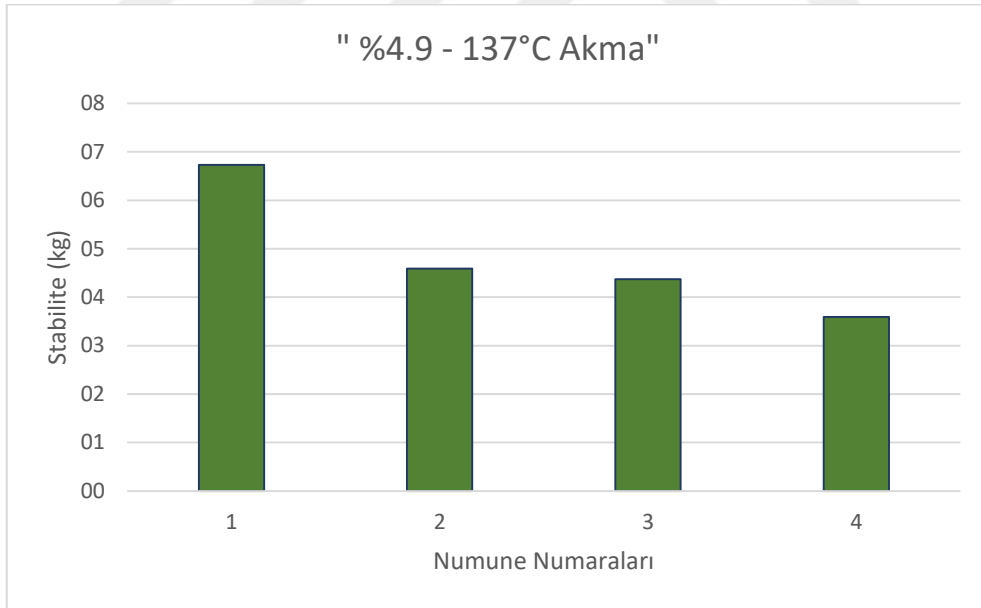


Şekil 50. %5.4 bitüm ve 143°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği

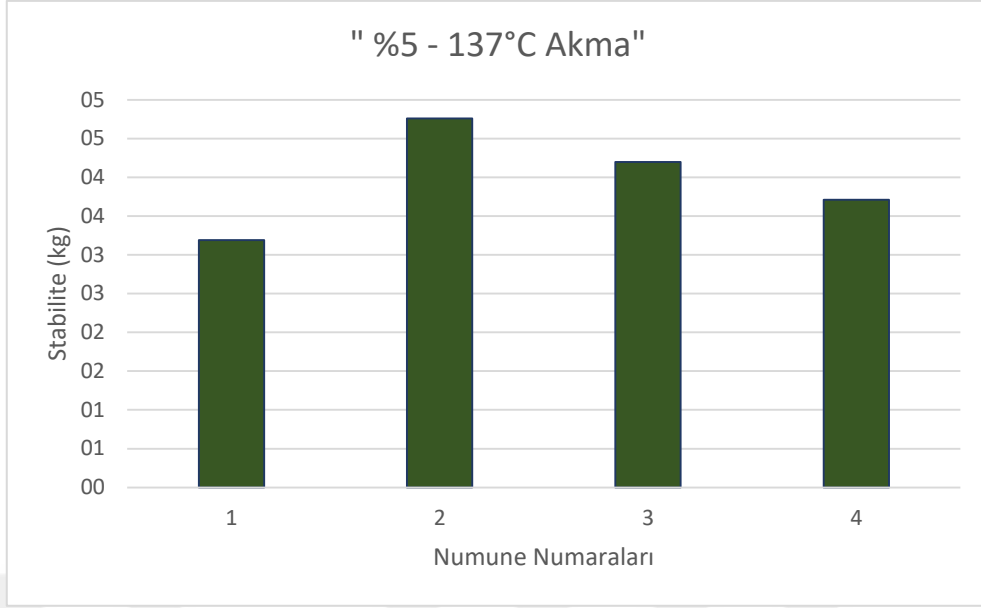
Şekillere göre bitüm içeriği arttıkça esneklik artacağından akmanın da arttığı görülmüştür.



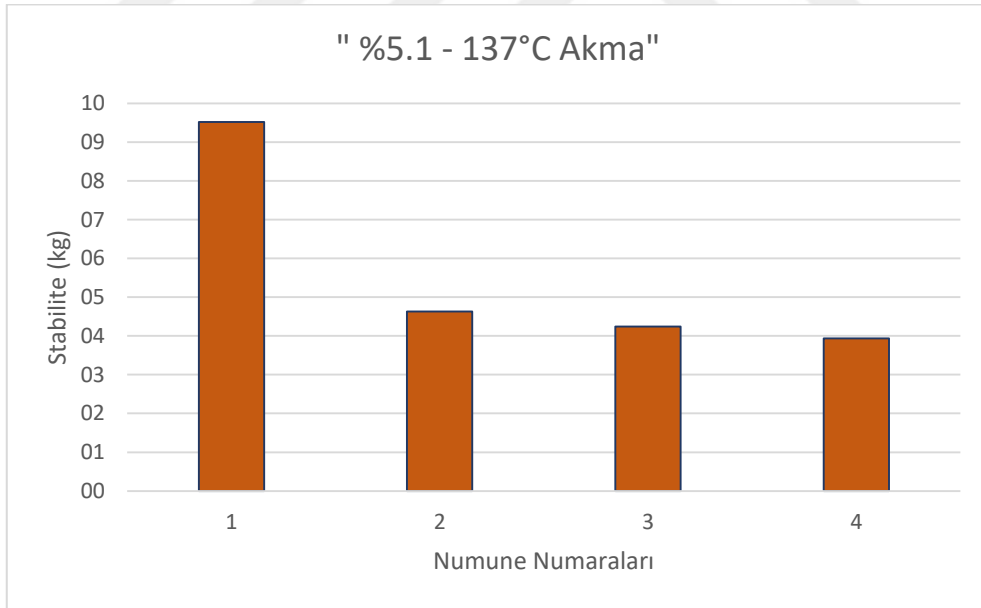
Şekil 51. %4.8 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği



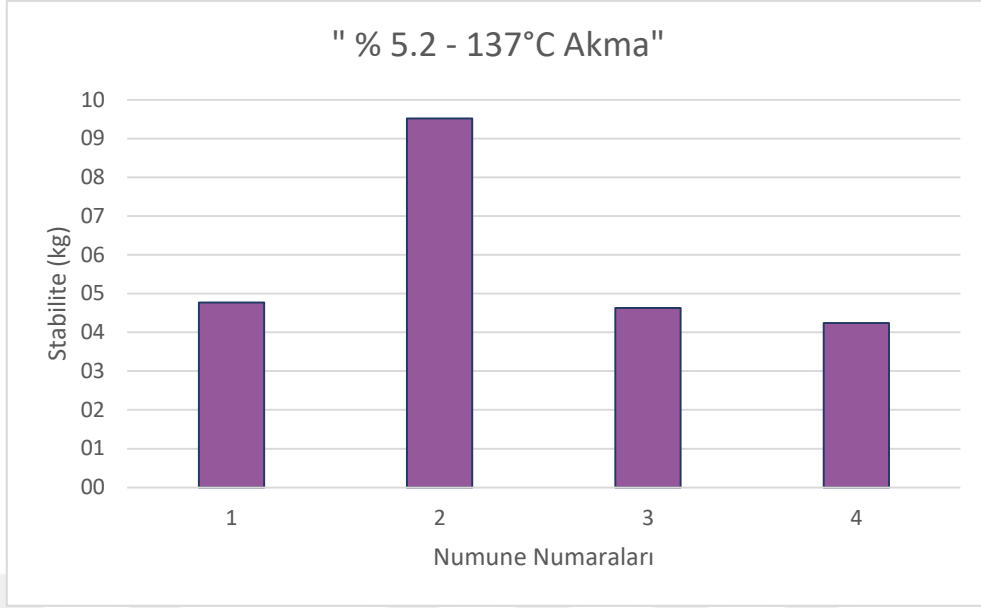
Şekil 52. %4.9 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği



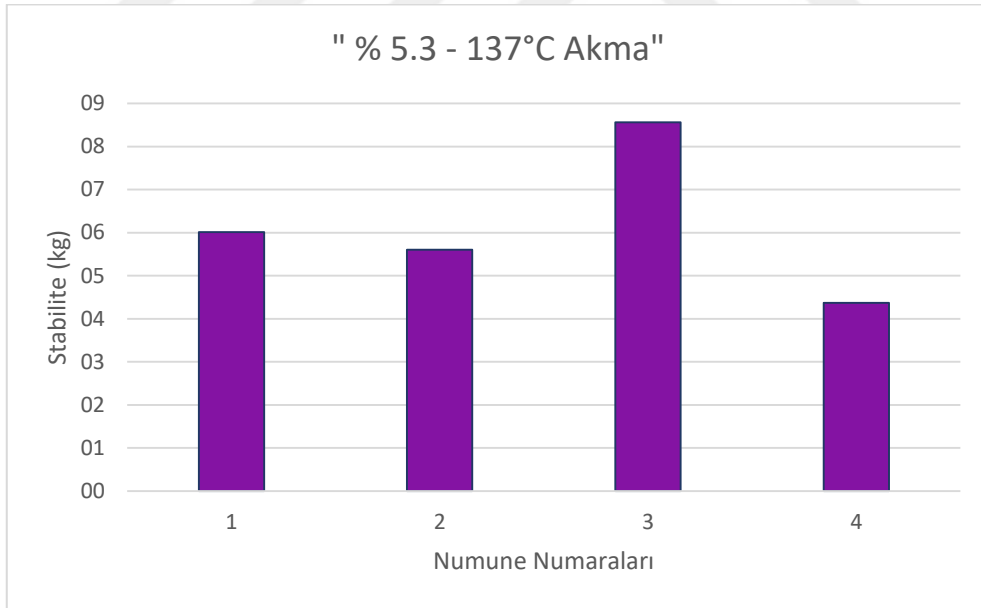
Şekil 53. %5 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği



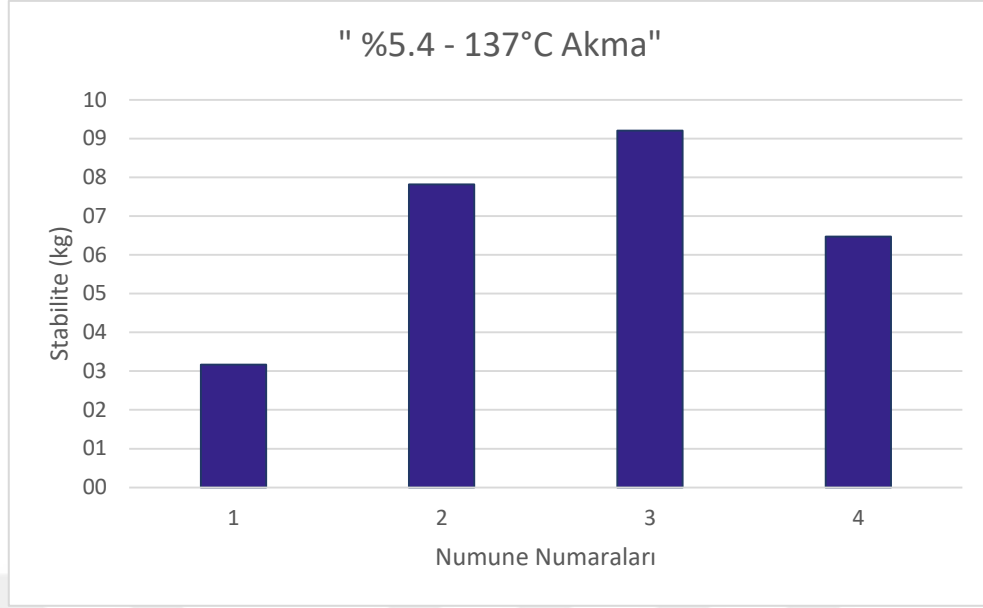
Şekil 54. %5.1 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği



Şekil 55. %5.1 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği



Şekil 56. %5.3 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği

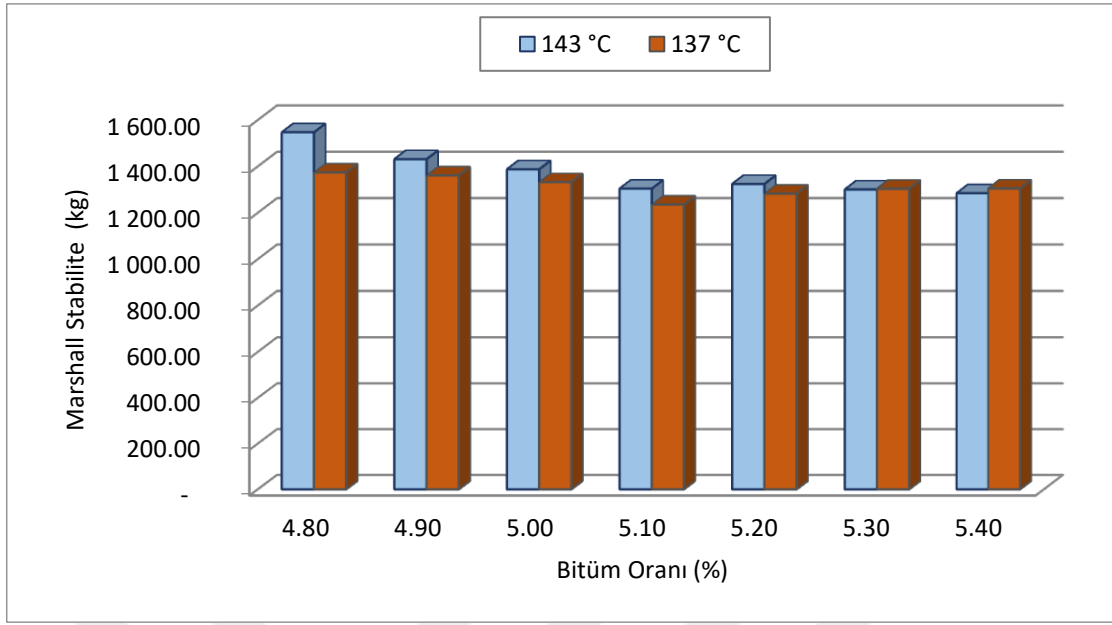


Şekil 57. %45.4 bitüm ve 137°C için 4 ayrı numunede akma değeri grafiği

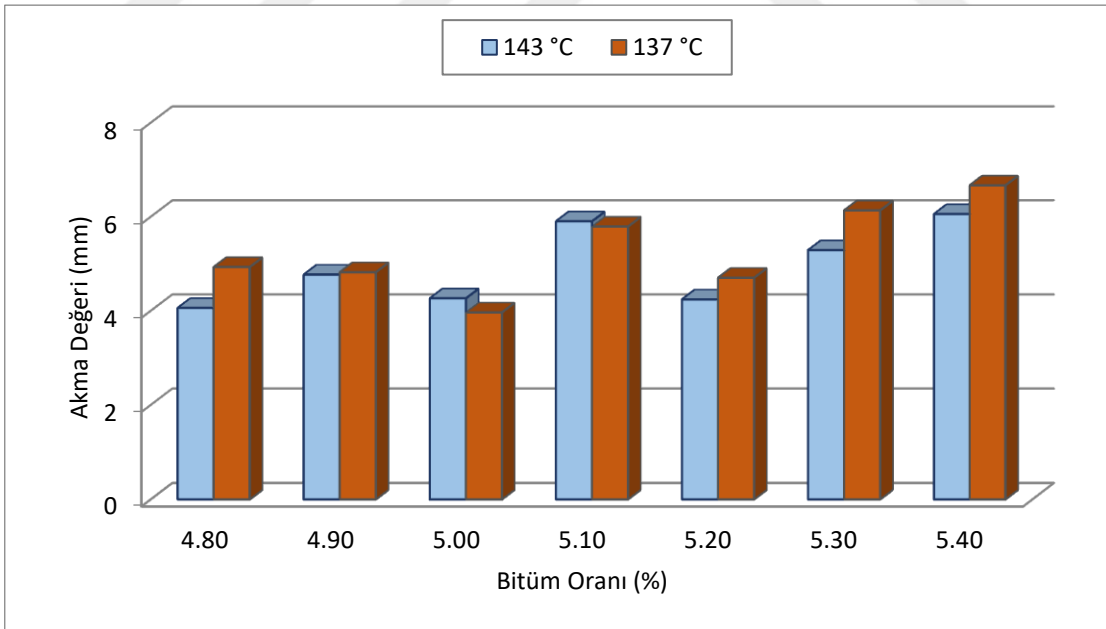
Şekillere göre bitüm içeriği arttıkça esneklik artacağından akmanın da arttığı gözlemlenebilir.

Tablo 4. Farklı sıcaklık ve bitüm oranlarında eklenmiş numunelerin ortalama Marshall Stabilite ve Akma değerleri

Bitüm%	143°C Sıcaklıkta Sıkıştırılmış Biriket		137°C Sıcaklıkta Sıkıştırılmış Biriket	
	Akma (mm)	Marshall Stabilite (kg)	Akma (mm)	Marshall Stabilite (kg)
4,80	4,06	1.547,35	4,93	1.373,89
4,90	4,77	1.431,50	4,82	1.361,38
5,00	4,27	1.387,85	3,97	1.332,06
5,10	5,90	1.304,36	5,79	1.235,46
5,20	4,24	1.324,43	4,70	1.282,43
5,30	5,29	1.300,64	6,14	1.303,89
5,40	6,06	1.284,36	6,67	1.304,83

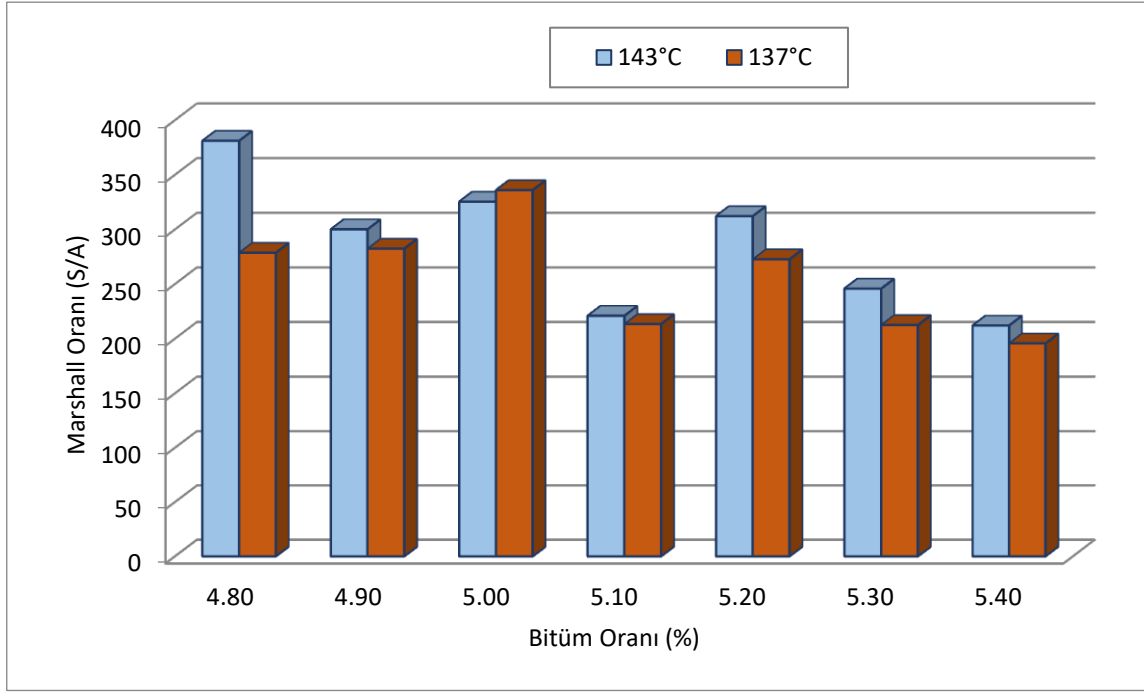


Şekil 58. Ortalama Marshall Stabilite değerleri



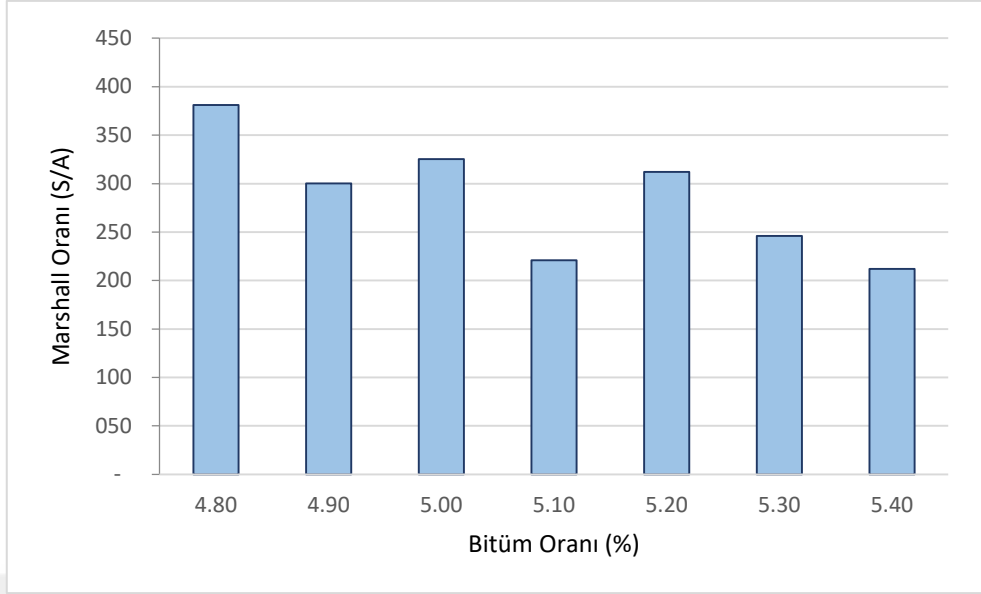
Şekil 59. Ortalama Marshall Akma değerleri

Şekle göre ortalama değerler için 143°C deki değerler 137°C ye göre daha yüksek stabilite değerleri elde edilmiştir. Ve bitüm oranı arttıkça rijitlik azalacağından stabilite azalmıştır.

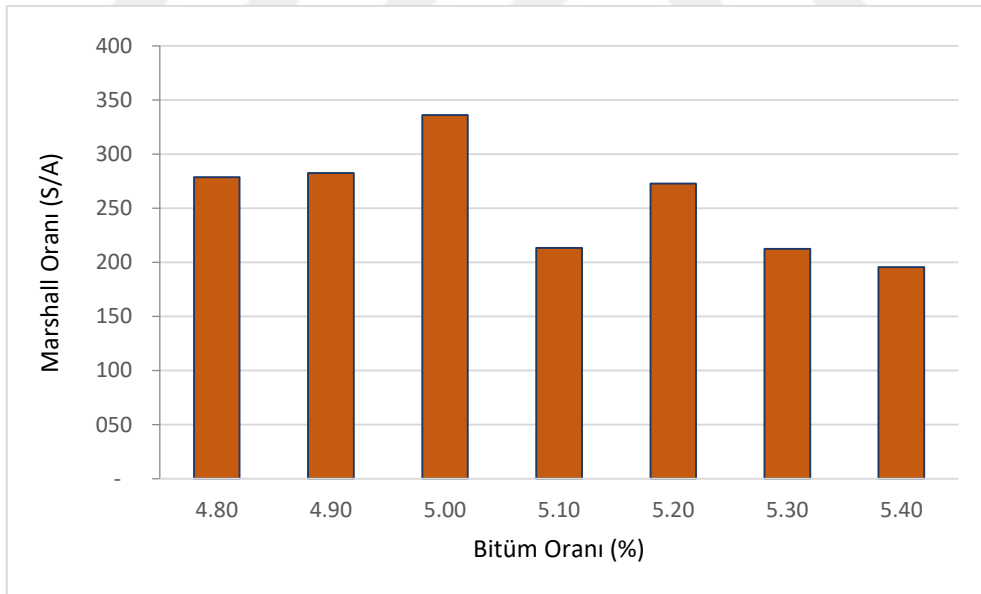


Şekil 60. Ortalama değerlere göre 143°C ve 137°C için MQ= S/A grafikleri

Şekle göre ortalama değerler için 143°C sıkıştırma sıcaklığı 137°C sıkıştırma sıcaklık değerine göre daha yüksek Marshall stabilite değeri vermektedir. Akma değerleri açısından bakıldığında ise 5.2-5.3-5.4 oranları için yani optimum bitüm oranından daha yüksek artan değerlerde bitüm oranının artmasıyla akma değerleri artmaktadır. 143°C sıkıştırma sıcaklığı 137°C sıkıştırma sıcaklık değerine göre bu bitüm oranları için daha düşük akma değerleri vermektedir.



Şekil 61. Ortalama değerlere göre 143°C için MQ= S/A grafiği



Şekil 62. Ortalama değerlere göre 137°C için MQ= S/A grafiği

MQ=stabilite/akma oranı arttıkça özellikle taş mastik asfaltlarda tekerlek izine karşı direnç artar. Yoğun gradasyon için düşünöldüğünde S/A değeri 143 derecede genel olarak 137 dereceden fazla olduğu gözlemlenmiştir. Dolayısıyla 143 derecedeki numunelerimiz 137 derecede sıkıştırılanlardan daha fazla tekerlek izine karşı direnç göstermektedir.



4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

143°C sıcaklığı 137°C sıkıştırma sıcaklık değerine göre daha yüksek Marshall stabilite değeri vermektedir. Akma değerleri açısından bakıldığında ise 5.2-5.3-5.4 oranları için yani optimum bitüm oranından daha yüksek artan değerlerde bitüm oranının artmasıyla akma değerleri artmaktadır. 143°C sıkıştırma sıcaklığı 137°C sıkıştırma sıcaklık değerine göre bu bitüm oranları için daha düşük akma değerleri vermektedir.

Genel bir yaklaşım olarak optimum bitüm değeri olan %5.10 değerinin (+-) %0.30 değişim aralığında yani seçilen oran değerleri için stabiliteler anlamında değişim aralığı büyük kalmamıştır. Şöyle ki, bu bitüm oranları için elde edilen değerler anlamındaki fark bitüm oranına bağlı olmaksızın 137 °C sıcaklık için %11 düzeyinde farklılaşabilmektedir. Ancak 143 °C sıcaklık koşulu söz konusu olduğunda, ortalamalar anlamında bu değişim aralığı %20 değerine kadar farklılaşabilmektedir. Dolayısıyla daha yüksek karıştırma sıcaklığı için farklı bitüm yüzdelere bağlı olarak stabilite değişim aralıkları artmaktadır. Bu durumda daha yüksek sıcaklık koşullarında karışım homojenliğinin sağlanmasına çok daha fazla dikkat edilmesini gerektirmektedir.

Optimum bitüm içeriği tayini Marshall dizaynı sonucunda boşluk oranımız (Vh) şartname limitlerine uyum göstererek %4 olarak bulunmuştur. Asfaltla dolu boşluk oranı, (Vf) şartname limitlerine uyarak %71,64 çıkmıştır.

Optimum bitüm içeriğimiz şartname limitlerine uyum gösterip %5,10 olarak hesaplanmıştır. VMA (Agregalar arası boşluk hacmi) değerimiz şartname limit aralığında olup %14,37 olarak hesaplanmıştır. Ortalama yoğunluk değerimiz 2,44 gr/cm³ olarak bulunmuştur.

5. KAYNAKÇA

1. Saltan, M. ve Uysal, F., Vermikülitin Bitümlü Sıcak Karışımlarda Kullanılabilirliğinin Marshall Stabilite Deney Yöntemi ile Araştırılması, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 22,1 (2018) 253- 257.
2. Geçkil, T., Önal, Y. ve İnce, C., B., Atık Polietilen Tereftalat (PET) ile Modifiye Edilmiş Saf Bitümün Fiziksel, Morfolojik ve Isıl Özellikleri, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 32,1 (2020) 157- 166.
3. Furtana, B., Yalçın, E., Kök, B., V. ve Yılmaz, M., EVA Bazlı Reçine Modifiyeli Bitümlü Karışımların Mekanik Özellikler Bakımından SBS Modifikasyonu ile Karşılaştırılması, Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 31,2 (2019) 497-506.
4. Sengoz, B., Topal A., ve Gorkem, C., Evaluation of moisture characteristics of warm mix asphalt involving natural zeolite, Road Materials and Pavement Design, 14, 4 (2013) 933-945.
5. Sengoz, B., Topal, A. ve Gorkem, C., Evaluation of natural zeolite as warm mix asphalt additive and its comparison with other warm mix additives, Construction and Building Material, 43 (2013) 242–252.
6. Topal, A., Sengoz, B., Kok, B., V., Yılmaz, M., Dokandari, P., A., Oner, J. ve Kaya, D., Evaluation of mixture characteristics of warm mix asphalt involving natural and synthetic zeolite additives, Construction and Building Materials, 57 (2014) 38-44.
7. Topal, A. ve Dokandari, P., A., Laboratory comparison of aging characteristics of warm mix asphalts involving natural and synthetic water containing additives, Materials Research, 17,5 (2014) 1129-1136.
8. Zhao, S., Huang, B., Shu, X., Moore, J. ve Bowers, B., Effects of WMA Technologies on Asphalt Binder Blending, Journal of Materials in Civil Engineering, 28,2 (2015).

9. Vaitkus, A., Čygas, D., Laurinavičius, A., Vorobjovas, V. ve Perveneckas, Z., Influence of warm mix asphalt technology on asphalt physical and mechanical properties, *Construction and Building Materials*, 112 (2016) 800-806.
10. Konak, S., D., Farklı Darbe Sayıları ile Hazırlanan Sıcak Asfalt Karışımlarda Marshall Oranının Belirlenmesi ve Regresyon Analizi Yöntemi ile Belirlenen Sonuçların Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane, 2012.
11. Çolak, K., C., Asfalt Kaplamalarda Sinerjetik Fayda Konusunun Anlaşılmasında Marshall Oranı Yaklaşımının Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane, 2006.
12. Akbulut, H., Gürer, C., Atık Mermerlerin Asfalt Kaplamalarda Agrega Olarak Değerlendirilmesi, *İMO Teknik Dergi*, 17 (2006) 3943-3960.
13. Orhan, F., Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, KGM Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara, 2012.
14. Özgan, E., Kap, T., Beycioğlu A. ve Emiroğlu M., Türkiye Asfalt Betonunda Marshall Stabilitésinin Uyarlamalı Sinirsel Bulanık Mantık Yaklaşımı ile Tahmini, 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (İATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük.
15. Önal, M. ve Kahramangil, M., Bitümlü Karışımlar Laboratuvar El Kitabı, TC. Karayolları Genel Müdürlüğü Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, 1993.
16. Mastrafoni, D. ve Scarsella, M., The Application Of Rheology To The Evaluation Of Bitumen Aging, *Fuel*, 79, 9 (2000) 1005-1015.
17. Karslı, M., Asfalt Karışımlarda Marshall Yaklaşımı ile Tekerlek İzi Değerlendirmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane, 2011.
18. Turan, M., A., SBS ve Sönmüş Kireç Katkılı Sıcak Asfalt Karışımlarda Tekerlek İzi Direncinin Marshall Oranı Yaklaşımı ile Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gümüşhane, 2012.

19. Kıyıldı, R., K., Yapay Sinir Ağları ile Marshall Stabilité Değerinin Tahmini, Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, NOHU J. Eng. Sci., 10,2 (2021) 627-633.
20. Hunter, R., N., Bituminous Mixtures in Road Construction, Thomas Telford Services Ltd., Thomas Telford House, 1 Heron Quay, London, 1994.
21. Karasahin, M., Resilient behaviour of granular materials for analysis of highway pavements, PhD thesis, University of Nottingham, Department of Civil Engineering, 1993.
22. Üstümkol, F., N. ve Turabi, A., Endüstriyel atıkların karayolu üstyapısında değerlendirilmesi, BAÜ FBE Dergisi, 11,1 (2009) 15.
23. Khuntia, S., Das, A., K., Mohanty, M., ve Panda, M., Prediction of Marshall Parameters of Modified Bituminous Mixtures Using Artificial Intelligence Techniques, International Journal of Transportation Science and Technology, 3,3 (2014) 211-228.
24. Brown, E., R., Kandhal, P., S. ve Zhang, J., Performance testing for hot mix asphalt, NCAT Report 01-05, Technology Parkway, Auburn University, November 2001, 277.
25. Cooper, K., E. ve Pell, P., S., The effect of mix variables on the fatigue strength of bituminous materials, Transport and Road Research Laboratory, (1974) 633.
26. İñiguez, J., B., Marshall parameters for quality control of hot mix asphalt after pavement construction, Revista de la Construcción 18,1 (2019) 178-185.
27. Tapkin, S., Cevik, A. ve Uşar, Ü., Prediction of Marshall test results for polypropylene modified dense bituminous mixtures using neural networks, Expert System with application, 37,6 (2010) 4660-4670.
28. AASHTO 1986, Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO, Washington, D.C., 1993.

29. Eren, Ü., Asfaltitin Asfalt Betonunda Mineral Filler Olarak Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 2008.
30. Croney, D. ve Croney, P., The Design and Performance of Road Pavement, Her Majesty's Stationary Office, London, 1997.
31. Eker, A.N., Bazalt ve Gabroların Bitümlü Sıcak Karışımlarda Agrega Olarak Kullanılabilirliğinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Batman Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Batman, 2019.
32. Mohammadı, Z., Yol Üstyapısının Trafik ve Çevresel Koşullar Altındaki Performans Karakteristiklerinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul, 2021.
33. Khodary, F., Akram H., ve Mashaan N., Behaviour Of Different Pavement Types Under Traffic Loads Using Finite Element Modelling, Journal of Civil Engineering and Technology, 11, 11 (2009) 40-48.
34. <https://www.netinbag.com/tr/manufacturing/what-is-asphalt-concrete.html> Asfalt Beton Nedir. 10 Ocak 2022.
35. Tunç, A., Esnek Kaplama Malzemeleri El Kitabı, Asil Yayın Dağıtım Limited Şirketi, Ankara, 2004.

6. EKLER

Ek Tablo 1. Marshall tasarımı ile yapılan ölçümler ve yoğunluk-boşluk analiz tablosu

NO	BİTÜM		SIKIŞTIRMA SICAKLIĞI	BİRİKET YÜKSEKLİKLER (mm)				HAVADAKİ AĞ.(g)	SUDAKİ AĞ.(g)	DOY. Y.K. AĞ.(g)	HACİM (cm³)	HACİM ÖZ.AĞ.
	Wa (%)	g	(°C)	1	2	3	ORT	A	C	B	V	Dp
1	4.80	55.20	143	59.74	59.77	59.73	59.75	1 198.4	726.4	1 199.7	473.3	2.532
2	4.80	55.20	143	59.56	59.54	59.46	59.52	1 195.0	722.8	1 196.2	473.4	2.524
3	4.80	55.20	143	59.54	59.73	59.61	59.63	1 195.6	722.3	1 197.0	474.7	2.519
4	4.80	55.20	143	60.24	60.04	60.12	60.13	1 201.3	725.3	1 202.6	477.3	2.517
5	4.90	56.35	143	60.11	59.98	60.09	60.06	1 199.9	723.2	1 201.5	478.3	2.509
6	4.90	56.35	143	59.31	59.27	59.27	59.28	1 201.1	726.6	1 201.5	474.9	2.529
7	4.90	56.35	143	59.14	59.16	59.20	59.17	1 198.4	724.6	1 199.6	475.0	2.523
8	4.90	56.35	143	59.69	59.72	59.70	59.70	1 203.1	728.0	1 204.9	476.9	2.523
9	5.00	57.50	143	59.15	59.58	59.14	59.29	1 197.9	723.2	1 198.6	475.4	2.520
10	5.00	57.50	143	58.90	58.99	58.89	58.93	1 197.3	724.6	1 198.0	473.4	2.529
11	5.00	57.50	143	59.48	59.32	59.72	59.51	1 198.6	724.7	1 200.0	475.3	2.522
12	5.00	57.50	143	59.66	59.61	59.72	59.66	1 198.0	724.3	1 199.6	475.3	2.521
13	5.10	58.65	143	59.24	59.14	59.32	59.23	1 200.1	727.0	1 200.6	473.6	2.534
14	5.10	58.65	143	59.34	59.31	59.40	59.35	1 200.3	724.7	1 201.3	476.6	2.518
15	5.10	58.65	143	58.96	58.78	58.73	58.82	1 200.1	728.1	1 201.3	473.2	2.536
16	5.10	58.65	143	59.79	59.77	59.91	59.82	1 202.6	726.0	1 204.7	478.7	2.512
17	5.20	59.80	143	59.06	59.06	59.12	59.08	1 201.6	728.7	1 202.4	473.7	2.537
18	5.20	59.80	143	59.00	59.07	58.90	58.99	1 199.3	726.8	1 200.1	473.3	2.534
19	5.20	59.80	143	59.20	59.18	59.20	59.19	1 200.8	727.5	1 202.6	475.1	2.527
20	5.20	59.80	143	59.81	59.95	59.86	59.87	1 204.5	727.7	1 206.1	478.4	2.518
21	5.30	60.95	143	58.63	58.62	58.58	58.61	1 203.5	731.2	1 205.3	474.1	2.538

Ek Tablo 1 (Devam). Marshall tasarımı ile yapılan ölçümler ve yoğunluk-boşluk analiz tablosu

NO	BİTÜM		SIKIŞTIRMA SICAKLIĞI	BİRİKET YÜKSEKLİKLER (mm)				HAVADAKİ AĞ.(g)	SUDAKİ AĞ.(g)	DOY. Y.K. AĞ.(g)	HACİM (cm³)	HACİM ÖZ.AĞ.
	Wa (%)	g	(°C)	1	2	3	ORT	A	C	B	V	Dp
22	5.30	60.95	143	58.89	58.75	59.22	58.95	1 198.5	729.7	1 202.8	473.1	2.533
23	5.30	60.95	143	58.77	59.03	58.70	58.83	1 201.0	726.2	1 201.0	474.8	2.529
24	5.30	60.95	143	59.06	59.13	59.12	59.10	1 205.0	731.8	1 207.2	475.4	2.535
25	5.40	62.10	143	58.83	58.89	58.67	58.80	1 202.0	727.0	1 203.5	476.5	2.523
26	5.40	62.10	143	59.11	59.19	59.16	59.15	1 204.5	732.0	1 205.5	473.5	2.544
27	5.40	62.10	143	58.81	58.81	58.87	58.83	1 202.5	728.0	1 204.0	476.0	2.526
28	5.40	62.10	143	58.55	58.62	58.97	58.71	1 202.0	726.0	1 203.5	477.5	2.517
29	4.80	55.20	137	60.28	60.55	60.40	60.41	1 195.5	720.5	1 200.0	479.5	2.493
30	4.80	55.20	137	59.43	59.12	59.62	59.39	1 196.5	716.0	1 199.0	483.0	2.477
31	4.80	55.20	137	59.41	59.13	58.95	59.16	1 199.0	729.0	1 201.0	472.0	2.540
32	4.80	55.20	137	58.92	59.15	58.98	59.02	1 196.0	726.0	1 198.0	472.0	2.534
33	4.90	56.35	137	59.67	59.86	59.84	59.79	1 208.5	734.0	1 210.0	476.0	2.539
34	4.90	56.35	137	58.67	59.00	58.88	58.85	1 195.0	716.0	1 196.5	480.5	2.487
35	4.90	56.35	137	59.09	59.19	59.26	59.18	1 199.5	726.5	1 201.5	475.0	2.525
36	4.90	56.35	137	61.72	61.69	61.61	61.67	1 241.0	751.0	1 245.0	494.0	2.512
37	5.00	57.50	137	59.08	58.98	58.92	58.99	1 198.0	720.0	1 199.5	479.5	2.498
38	5.00	57.50	137	59.68	59.99	60.30	59.99	1 201.5	729.0	1 205.0	476.0	2.524
39	5.00	57.50	137	64.82	64.58	64.79	64.73	1 298.5	783.0	1 302.0	519.0	2.502
40	5.00	57.50	137	59.31	59.94	59.92	59.72	1 203.0	730.5	1 206.0	475.5	2.530
41	5.10	58.65	137	59.19	59.13	59.21	59.18	1 201.5	731.5	1 205.0	473.5	2.537
42	5.10	58.65	137	59.40	59.40	59.43	59.41	1 202.5	728.5	1 205.0	476.5	2.524
43	5.10	58.65	137	59.63	59.93	60.06	59.87	1 203.0	727.5	1 201.5	474.0	2.538
44	5.10	58.65	137	58.60	58.97	58.77	58.78	1 199.0	731.0	1 203.5	472.5	2.538
45	5.20	59.80	137	58.64	58.61	58.75	58.67	1 199.5	731.5	1 200.5	469.0	2.558
46	5.20	59.80	137	58.97	59.28	59.72	59.32	1 196.5	721.5	1 197.5	476.0	2.514
47	5.20	59.80	137	59.05	59.40	59.22	59.22	1 201.0	724.0	1 202.5	478.5	2.510

Ek Tablo 1 (Devam). Marshall tasarımı ile yapılan ölçümler ve yoğunluk-boşluk analiz tablosu

NO	BİTÜM		SIKIŞTIRMA SICAKLIĞI	BİRİKET YÜKSEKLİKLER (mm)				HAVADAKİ AĞ.(g)	SUDAKİ AĞ.(g)	DOY. Y.K. AĞ.(g)	HACİM (cm ³)	HACİM ÖZ.AĞ.
	Wa (%)	g	(°C)	1	2	3	ORT	A	C	B	V	Dp
48	5.20	59.80	137	59.71	59.62	59.63	59.65	1 202.5	728.0	1 203.5	475.5	2.529
49	5.30	60.95	137	60.02	60.21	59.87	60.03	1 203.0	732.0	1 206.5	474.5	2.535
50	5.30	60.95	137	58.92	59.17	59.13	59.07	1 205.5	733.0	1 206.5	473.5	2.546
51	5.30	60.95	137	59.66	59.79	59.58	59.68	1 214.0	733.5	1 214.5	481.0	2.524
52	5.30	60.95	137	58.90	58.96	59.34	59.07	1 205.0	732.5	1 206.0	473.5	2.545
53	5.40	62.10	137	59.61	59.63	59.98	59.74	1 206.0	731.0	1 207.5	476.5	2.531
54	5.40	62.10	137	59.22	59.45	59.62	59.43	1 200.5	729.0	1 202.0	473.0	2.538
55	5.40	62.10	137	59.00	59.02	59.21	59.08	1 207.5	736.5	1 208.0	471.5	2.561
56	5.40	62.10	137	60.17	60.44	60.50	60.37	1 204.0	730.0	1 206.0	476.0	2.529

Ek Tablo 2. Marshall tasarımı ile yapılan ölçüm analiz tablosu

NO	BİTÜM		SIKIŞTIRMA SICAKLIĞI	BİRİKET YÜKSEKLİKLER (mm)				AKMA (mm)	STABİLİTE kg	DÜZ. FAKTÖRÜ	DÜZ. STABİLİTE
	Wa (%)	g		1	2	3	ORT				
1	4.80	55.20	143	59.74	59.77	59.73	59.75	4.68	1 454.09	1.109	1 612.59
2	4.80	55.20	143	59.56	59.54	59.46	59.52	3.43	1 400.05	1.115	1 561.05
3	4.80	55.20	143	59.54	59.73	59.61	59.63	3.60	1 358.24	1.112	1 510.36
4	4.80	55.20	143	60.24	60.04	60.12	60.13	4.53	1 373.54	1.096	1 505.40
5	4.90	56.35	143	60.11	59.98	60.09	60.06	8.12	1 384.75	1.096	1 517.69
6	4.90	56.35	143	59.31	59.27	59.27	59.28	2.97	1 289.92	1.121	1 446.00
7	4.90	56.35	143	59.14	59.16	59.20	59.17	3.71	1 259.33	1.124	1 415.49
8	4.90	56.35	143	59.69	59.72	59.70	59.70	4.28	1 214.46	1.109	1 346.84
9	5.00	57.50	143	59.15	59.58	59.14	59.29	3.37	1 178.77	1.121	1 321.40
10	5.00	57.50	143	58.90	58.99	58.89	58.93	4.66	1 304.20	1.134	1 478.96
11	5.00	57.50	143	59.48	59.32	59.72	59.51	5.00	1 268.51	1.115	1 414.39
12	5.00	57.50	143	59.66	59.61	59.72	59.66	4.03	1 205.29	1.109	1 336.66
13	5.10	58.65	143	59.24	59.14	59.32	59.23	5.98	1 170.62	1.124	1 315.77
14	5.10	58.65	143	59.34	59.31	59.40	59.35	4.33	1 209.36	1.118	1 352.07
15	5.10	58.65	143	58.96	58.78	58.73	58.82	6.01	1 189.99	1.137	1 353.02
16	5.10	58.65	143	59.79	59.77	59.91	59.82	7.29	1 081.90	1.106	1 196.58
17	5.20	59.80	143	59.06	59.06	59.12	59.08	3.16	1 135.95	1.128	1 281.35
18	5.20	59.80	143	59.00	59.07	58.90	58.99	3.56	1 183.87	1.131	1 338.96
19	5.20	59.80	143	59.20	59.18	59.20	59.19	5.68	1 259.33	1.124	1 415.49
20	5.20	59.80	143	59.81	59.95	59.86	59.87	4.57	1 144.10	1.103	1 261.95
21	5.30	60.95	143	58.63	58.62	58.58	58.61	7.14	1 161.44	1.146	1 331.01
22	5.30	60.95	143	58.89	58.75	59.22	58.95	3.39	1 118.61	1.131	1 265.15

Ek Tablo 2 (Devam). Marshall tasarımı ile yapılan ölçüm analiz tablosu

NO	BİTÜM		SİKİŞTİRMA SICAKLIĞI	BİRİKET YÜKSEKLİKLER (mm)				AKMA (mm)	STABİLİTE kg	DÜZ. FAKTÖRÜ	DÜZ. STABİLİTE
	Wa (%)	g		1	2	3	ORT				
23	5.30	60.95	143	58.77	59.03	58.70	58.83	5.95	1 148.18	1.137	1 305.48
24	5.30	60.95	143	59.06	59.13	59.12	59.10	4.68	1 153.28	1.128	1 300.90
25	5.40	62.10	143	58.83	58.89	58.67	58.80	4.66	1 106.37	1.137	1 257.95
26	5.40	62.10	143	59.11	59.19	59.16	59.15	7.61	1 151.24	1.124	1 294.00
27	5.40	62.10	143	58.81	58.81	58.87	58.83	4.22	1 099.24	1.137	1 249.83
28	5.40	62.10	143	58.55	58.62	58.97	58.71	7.74	1 168.58	1.143	1 335.68
29	4.80	55.20	137	60.28	60.55	60.40	60.41	4.31	1 070.69	1.087	1 163.83
30	4.80	55.20	137	59.43	59.12	59.62	59.39	4.34	1 342.94	1.118	1 501.41
31	4.80	55.20	137	59.41	59.13	58.95	59.16	3.74	1 294.00	1.124	1 454.46
32	4.80	55.20	137	58.92	59.15	58.98	59.02	7.33	1 216.50	1.131	1 375.86
33	4.90	56.35	137	59.67	59.86	59.84	59.79	6.73	1 152.26	1.106	1 274.40
34	4.90	56.35	137	58.67	59.00	58.88	58.85	4.59	1 234.86	1.134	1 400.33
35	4.90	56.35	137	59.09	59.19	59.26	59.18	4.37	1 131.87	1.124	1 272.22
36	4.90	56.35	137	61.72	61.69	61.61	61.67	3.59	1 432.68	1.046	1 498.58
37	5.00	57.50	137	59.08	58.98	58.92	58.99	3.19	1 126.77	1.131	1 274.38
38	5.00	57.50	137	59.68	59.99	60.30	59.99	4.76	1 196.11	1.099	1 314.52
39	5.00	57.50	137	64.82	64.58	64.79	64.73	4.20	1 469.39	0.97	1 425.31
40	5.00	57.50	137	59.31	59.94	59.92	59.72	3.71	1 184.89	1.109	1 314.04
41	5.10	58.65	137	59.19	59.13	59.21	59.18	4.77	981.97	1.124	1 103.74
42	5.10	58.65	137	59.40	59.40	59.43	59.41	9.52	1 096.18	1.118	1 225.53
43	5.10	58.65	137	59.63	59.93	60.06	59.87	4.63	1 214.46	1.103	1 339.55
44	5.10	58.65	137	58.60	58.97	58.77	58.78	4.24	1 119.63	1.137	1 273.02
45	5.20	59.80	137	58.64	58.61	58.75	58.67	3.94	1 109.43	1.143	1 268.08
46	5.20	59.80	137	58.97	59.28	59.72	59.32	4.77	1 172.66	1.121	1 314.55

Ek Tablo 2 (Devam). Marshall tasarımı ile yapılan ölçüm analiz tablosu

NO	BİTÜM		SIKIŞTIRMA SICAKLIĞI	BİRİKET YÜKSEKLİKLER (mm)				AKMA (mm)	STABİLİTE kg	DÜZ. FAKTÖRÜ	DÜZ. STABİLİTE
	Wa (%)	g	(°C)	1	2	3	ORT				
47	5.20	59.80	137	59.05	59.40	59.22	59.22	4.24	1 158.38	1.124	1 302.02
48	5.20	59.80	137	59.71	59.62	59.63	59.65	5.86	1 122.69	1.109	1 245.06
49	5.30	60.95	137	60.02	60.21	59.87	60.03	6.01	1 153.28	1.099	1 267.46
50	5.30	60.95	137	58.92	59.17	59.13	59.07	5.60	1 249.13	1.128	1 409.02
51	5.30	60.95	137	59.66	59.79	59.58	59.68	8.56	1 182.85	1.109	1 311.78
52	5.30	60.95	137	58.90	58.96	59.34	59.07	4.37	1 088.02	1.128	1 227.29
53	5.40	62.10	137	59.61	59.63	59.98	59.74	3.17	1 059.47	1.109	1 174.95
54	5.40	62.10	137	59.22	59.45	59.62	59.43	7.82	1 234.86	1.118	1 380.57
55	5.40	62.10	137	59.00	59.02	59.21	59.08	9.21	1 250.15	1.128	1 410.17
56	5.40	62.10	137	60.17	60.44	60.50	60.37	6.47	1 153.28	1.087	1 253.62

Boy	Katsayı	Boy	Katsayı	Boy	Katsayı	Boy	Katsayı
51	1,46	55,3	1,263	59,6	1,112	63,9	0,99
51,1	1,455	55,4	1,259	59,7	1,109	64	0,988
51,2	1,45	55,5	1,254	59,8	1,106	64,1	0,985
51,3	1,445	55,6	1,25	59,9	1,103	64,2	0,983
51,4	1,44	55,7	1,246	60	1,099	64,3	0,98
51,5	1,435	55,8	1,243	60,1	1,096	64,4	0,978
51,6	1,43	55,9	1,239	60,2	1,093	64,5	0,975
51,7	1,425	56	1,235	60,3	1,09	64,6	0,973
51,8	1,42	56,1	1,231	60,4	1,087	64,7	0,97
51,9	1,415	56,2	1,228	60,5	1,084	64,8	0,968
52	1,41	56,3	1,224	60,6	1,081	65	0,963
52,1	1,405	56,4	1,22	60,7	1,078	65,1	0,96
52,2	1,4	56,5	1,216	60,8	1,074	65,2	0,958
52,3	1,395	56,6	1,213	60,9	1,071	65,3	0,956
52,4	1,39	56,7	1,209	61	1,068	65,4	0,954
52,5	1,386	56,8	1,205	61,1	1,065	65,5	0,953
52,6	1,381	56,9	1,201	61,2	1,062	65,6	0,951
52,7	1,377	57	1,198	61,3	1,059	65,7	0,949
52,8	1,373	57,1	1,194	61,4	1,056	65,8	0,947
52,9	1,368	57,2	1,19	61,5	1,053	65,9	0,945
53	1,364	57,3	1,187	61,6	1,049	66	0,943
53,1	1,359	57,4	1,184	61,7	1,046	66,1	0,941
53,2	1,355	57,5	1,181	61,8	1,043	66,2	0,939
53,3	1,351	57,6	1,178	61,9	1,04	66,3	0,938
53,4	1,346	57,7	1,174	62	1,038	66,4	0,936
53,5	1,342	57,8	1,171	62,1	1,035	66,5	0,934
53,6	1,338	57,9	1,168	62,2	1,033	66,6	0,932
53,7	1,333	58	1,165	62,3	1,03	66,7	0,93
53,8	1,329	58,1	1,162	62,4	1,028	66,8	0,928
53,9	1,324	58,2	1,159	62,5	1,025	66,9	0,925
54	1,32	58,3	1,156	62,6	1,023	67	0,923
54,1	1,316	58,4	1,153	62,7	1,02	67,1	0,92
54,2	1,311	58,5	1,149	62,8	1,018	67,2	0,918
54,3	1,307	58,6	1,146	62,9	1,015	67,3	0,915
54,4	1,303	58,7	1,143	63	1,013	67,4	0,913
54,5	1,298	58,8	1,137	63,1	1,01	67,5	0,91
54,6	1,294	58,9	1,134	63,2	1,008	67,6	0,908
54,7	1,289	59	1,131	63,3	1,005	67,7	0,905
54,8	1,285	59,1	1,128	63,4	1,003	67,8	0,903
54,9	1,281	59,2	1,124	63,5	1	67,9	0,9
55	1,276	59,3	1,121	63,6	0,998	68	0,898
55,1	1,272	59,4	1,118	63,7	0,995	68,1	0,895
55,2	1,268	59,5	1,115	63,8	0,993	68,2	0,893

Ek Şekil 1. Marshall düzeltme faktörleri

ÖZGEÇMİŞ

2007 yılında Zehra Kitapçioğlu İlköğretim Okulu'ndan, 2011 yılında Yunus Emre Lisesi'nden mezun oldu. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü'nü 2011-2015 yılları arasında bitirerek İnşaat Mühendisi unvanını aldı. Mezuniyeti sonrası aynı yıl özel bir firmada bir yıl İnşaat Mühendisi olarak çalıştı. 2016 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans eğitimine başladı. Yine aynı yıl özel bir firma da İnşaat Mühendisi olarak çalışmaya başladı ve devam etmektedir.

