



T.C.

RECEP TAYYİP ERDOĞAN ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**ÇİNKO BORAT MODİFİYELİ ÜLEKSİTİN ASFALT KARIŞIM
PERFORMANS ARTIRICISI OLARAK KULLANIMI**

Yüksek Lisans Tezi

Derya SEYHAN

Danışman

Doç. Dr. Tuba KÜTÜK

II. Danışman

Doç. Dr. Sezai KÜTÜK

RİZE

2023

KABUL VE ONAY

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında, Doç. Dr. Tuba KÜTÜK danışmanlığında, Derya SEYHAN tarafından hazırlanan *Çinko Borat Modifiyeli Üleksitin Asfalt Karışım Performans Artırıcısı Olarak Kullanımı* adlı bu tez çalışması 23/02/2023 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği/oy çokluğuyla başarılı bulunarak jürimiz tarafından **Yüksek Lisans Tezi** olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	Unvanı, Adı SOYADI	İmza
Başkan	: Prof. Dr. Aykut ÇANAKÇI	
Üye	: Doç. Dr. Tuba KÜTÜK	
Üye	: Doç. Dr. Sezai KÜTÜK	
Üye	: Prof. Dr. Atakan AKSOY	
Üye	: Doç. Dr. Erol İSKENDER	

ETİK BEYAN

Yüksek Lisans Programından mezun olmak üzere teslim ettiğim *Çinko Borat Modifiyeli Üleksitin Asfalt Karışım Performans Artırıcısı Olarak Kullanımı* adlı tezim, bilim ve araştırma etiği prensiplerine riayet edilerek tarafımdan yazılmıştır.

Tez çalışmamda, başka kaynaklardan aktarılan bütün bilgi ve alıntılar, Enstitünüz Tez Yazım Kılavuzuna uygun olarak açıkça gösterilmiştir. Kaynağı gösterilenler dışında kalan bütün bilgiler uygun araştırma yöntemi kullanılarak tarafımdan edinilmiş ve esere bu şekilde yansıtılmıştır. Şahsıma ait olmayan hiçbir bilgi, kasıt veya kusurlar, şahsıma aitmiş gibi gösterilmemiştir. İnternet kaynakları dâhil, sahibine/kaynağına atıf yapılmaksızın hiçbir bilgi kullanılmamıştır. Aksinin ortaya çıkması halinde doğacak bütün hukuki, idari, akademik ve etik sorumluluk tarafıma ait olacaktır. Eserin tesliminden sonra herhangi bir zamanda, bilim etiğine aykırılık tespit edilmesi ve / veya eserimle ilgili intihal veya intihal şeklinde anlaşılabilecek bir durumun ortaya çıkması halinde; Üniversiteniz ve eğitim kadronuzun hiçbir şekilde sorumlu tutulmayacağını hür irademle kabul, beyan ve taahhüt ederim.

29/12/2022

İnş. Müh. Derya SEYHAN

ÖNSÖZ

Bu çalışma Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim 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 saygıdeğer hocalarım I. Danışman Doç. Dr. Tuba KÜTÜK'e ve II. Danışman Doç. Dr. Sezai KÜTÜK'e içtenlikle teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Tez çalışmama KTÜ Of Teknoloji Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Laboratuvarı'nda sağladıkları bilimsel desteklerinden ötürü Prof. Dr. Erol İSKENDER'e ve laboratuvar çalışmalarındaki yardımlarından dolayı İnş. Müh. Mustafa Taha ASLAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda gerekli olan bor minerallerini tedarik eden ETİ Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'ne teşekkür ederim.

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

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	I
ETİK BEYAN.....	II
ÖNSÖZ	III
İÇİNDEKİLER	IV
ÖZET	VI
ABSTRACT.....	VII
TABLolar LİSTESİ.....	VIII
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Çalışmanın Amacı.....	2
1.2. Literatür Özeti	3
1.3. Yol Üstyapı Çeşitleri.....	7
1.3.1. Esnek Üstyapı.....	7
1.3.2. Rijit Üstyapı.....	8
1.4. Asfalt Kaplamalar	8
1.4.1. Sıcak Karışım Asfalt	9
1.4.2. Soğuk Karışım Asfalt.....	10
1.5. Malzeme.....	11
1.5.1. Agregalar.....	11
1.5.1.1. Agregalara Uygulanan Deneyler	12
1.5.2. Bitüm	14
1.6. Asfalt Kaplamalarda Yaşlanma Konusu	15
1.7. Modifiye Asfalt Kaplamalar	16
1.8. Asfalt Yolların Türkiye’deki Gelişimi	18
1.9. Bor.....	18
1.9.1. Türkiye’de Bor Minerali Potansiyelleri	18
1.9.2. Bor mineralinin teknolojik uygulamaları.....	20
1.9.3. Çinko-Borat Genel Özellikleri.....	23

1.9.4.	Çinko Borat Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri.....	23
1.9.5.	Üleksit Genel Özellikleri	24
1.9.6.	Üleksit Kimyasal Özellikleri	25
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	27
2.1.	Bor Minerallerinin Karakterizasyonu	28
2.1.1.	Çinko Borat ve Öğütülmüş Üleksit Mineralleri.....	28
2.1.2.	Fiziksel Ölçümler.....	31
2.2.	Asfalt Karışımların Karakterizasyonu.....	31
2.2.1.	Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler	31
2.3.	Karışım Tasarımı.....	34
2.4.	Su Hasarı ve Çatlama Deneyleri	41
2.5.	Marshall Stabilitate Deneyi.....	45
2.6.	Tekrarlı Sünme Deneyi	47
3.	BULGULAR VE İRDELEME.....	49
3.1.	Bor Minerallerinin Karakterizasyonu	49
3.1.1.	Oksitli Bileşen Analizi.....	49
3.1.2.	SEM Analizi	51
3.1.3.	EDS Analizi	55
3.1.4.	XRD Analizi	61
3.2.	Asfalt Karışımların Karakterizasyonu.....	64
3.2.1.	Su Hasarı ve Çatlama Analizleri.....	64
3.2.2.	Çatlama Analizi	70
3.2.3.	Marshall Stabilitate Deneyi Sonuçları	71
3.2.4.	Sünme analizi.....	79
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	81
4.1.	Sonuçlar.....	81
4.2.	Öneriler	82
	KAYNAKLAR	83

Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Ana Bilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Tez Türü : Yüksek Lisans Tezi

Danışman : Doç. Dr. Tuba KÜTÜK

Hazırlayan : Derya SEYHAN

Yıl : 2023

Sayfa Sayısı :99

ÖZET

ÇİNKO BORAT MODİFİYELİ ÜLEKSİTİN ASFALT KARIŞIM PERFORMANS ARTIRICISI OLARAK KULLANIMI

Bu çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada, çinko borat ve öğütülmüş üleksit katkı minerallerinin oksitli bileşen, SEM, EDS ve XRD analizleri yapılmıştır. İkinci aşamada, modifiyeli sıcak karışım asfaltın su hasarı, çatlama, Marshall stabilite ve sünme deneyleri gerçekleştirilmiştir. 1150g agregaya ile oluşturulan kontrol numuneleri, agregaya ağırlığına göre %6 oranda üleksit içeren numuneler ve agregaya ağırlığına göre %4,5 üleksit ile %1,5 çinko borat içeren numuneler kullanılarak toplamda 3 grupta testler yapılmıştır.

SEM mikroskopunda ZnB mineralinin ÖÜ mineraline kıyasla partikül boyutunun küçük olduğu ve homojen dağılıma sahip olduğu saptanmıştır. Oksitli bileşen, EDS ve XRD ölçümlerinde ZnB mineralinin saf iken, ÖÜ mineralinin saf olmadığı anlaşılmıştır. Su hasarı deneyinde kontrol numunesine göre ZnB+ÖÜ katkısına sahip karışımın koşulsuz durumda %23 ve koşullu durumda ise % 2,6 iyileştiği tespit edilmiştir. Marshall stabilite değeri kontrol karışım için 1291 kg iken, ZnB+ÖÜ katkısına sahip karışım için ise 1355 kg olarak bulunmuştur. Tekrarlı sünme deneyinde ZnB+ÖÜ katkısına sahip karışım, kontrol karışımına oranla %19'luk bir artış göstermiştir. Kısacası, çinko borat modifiyeli üleksit katkısı asfalt karışım performansını iyileştirmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bitüm, Asfalt Kaplama, Üleksit, Çinko Borat, Modifiye Asfalt, Bor Minerali, Performans Deneyleri

Recep Tayyip Erdogan University Institute of Graduate Studies

Department: Civil Engineering

Thesis Type: Master Thesis

Supervisor : Assoc. Dr. Tuba KÜTÜK

Author : Derya SEYHAN

Year : 2023

Pages : 99

ABSTRACT

USE OF ZINC BORATE MODIFIED ULEXITE AS A PERFORMANCE ENHANCER IN ASPHALT MIXTURE

This study was carried out in two stages. In the first stage, oxide component, SEM, EDS and XRD analyzes of zinc borate and ground ulexite additive minerals were performed. In the second stage, water damage, cracking, Marshall stability and creep tests of modified hot mix asphalt were fulfilled. Tests were carried out with 3 groups in total, using control samples formed with 1150g aggregate, samples containing 6% ulexite according to the weight of the aggregate, and samples containing 4.5% ulexite and 1.5% zinc borate according to the weight of the aggregate. In the SEM micrograph, it was detected that the ZnB mineral had a small particle size and a homogeneous distribution compared to the GU mineral. In the oxide component, EDS and XRD measurements, it was understood that while the ZnB mineral was pure, the GU mineral was not pure. In the water damage test, it was determined that the mixture with ZnB+GU additive improved 23% in the unconditional condition and 2.6% in the conditional condition in comparison with the control sample. As a result of Marshall stability, its value was found to be 1291 kg for the control mixture and 1355 kg for the mixture with ZnB+GU. In the repeated creep test, the mixture with ZnB+GU showed an increase of 19% compared to the control mixture. In short, the zinc borate modified ulexite additive enhanced the asphalt mixture performance.

Keywords: Bitumen, Asphalt Pavement, Ulexite, Zinc Borate, Modified Asphalt, Boron Mineral, Performance Test

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1. Borun kullanım alanları	21
Tablo 2. Öğütölmüş üleksit minerali ve çinko boratın fiziksel ve kimyasal özellikleri	29
Tablo 3. Asfalt çimentosu deney sonuçları	32
Tablo 4. Marshall Tasarım Değerleri	39
Tablo 5. Koşulsuz su hasarı kırım sonuçları	42
Tablo 6. Koşullu numunelerin test sonuçları	43
Tablo 7. Çatlama deneyi sonrası test değerleri	44
Tablo 8. Marshall stabilite deney sonuçları	46
Tablo 9. Öğütölmüş üleksit mineralinin saf bileşen değerleri	49
Tablo 10. Çinko boratın kristalize su miktarının hesabı	50
Tablo 11. Tüm gruplar için kPa değerleri	65
Tablo 12. Marshall stabilite deneyi sonuçları	73
Tablo 13. Marshall stabilite deneyi	74
Tablo 14. Modifiye karışımların Va, VMA , VFA , stabilite değerleri	75

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1. Esnek üst yapı serimi.....	7
Şekil 2. Rijit üst yapı çalışması	8
Şekil 3. Sıcak karışım asfaltların plentte üretilmesi	9
Şekil 4. Soğuk karışım asfaltlar ile dolgu işlemi	10
Şekil 5. KTÜ Of Teknoloji Fakültesinden temin edilen agregalar	11
Şekil 6. Deneylerde kullanılan agregaların deney sonuçları	12
Şekil 7. Özgül ağırlık deneyi	13
Şekil 8. Elek analizi deneyi	13
Şekil 9. Donma deneyi.....	13
Şekil 10. Aşınma deneyi.....	13
Şekil 11. Yassılık indeksi deneyi.....	13
Şekil 12. Cilalanma deneyi	13
Şekil 13. Bitümlü bağlayıcı, asfalt çimentosu	14
Şekil 14. Uzun hizmet ömrü sonrası yorulmuş ve yaşlanmış kaplama	15
Şekil 15. Modifikasyon işleminin yapıldığı karıştırıcı	17
Şekil 16. Modifiye bitüm hazırlama plenti	17
Şekil 17. Bor ürünlerinin fiyatları.....	20
Şekil 18. Çinko borat özellikleri ve perakende satış hali	24
Şekil 19. ETİ maden üleksit örneği	25
Şekil 20. Çeşitli bölgelerden çıkarılan üleksit örnekleri.....	26
Şekil 21. Öğütülmüş üleksit minerali ve çinko boratın görüntüleri	30
Şekil 22. Toz haldeki çinko borat görseli	30
Şekil 23. Özgül ağırlık deneyi	32
Şekil 24. Penetrasyon deneyi.....	32
Şekil 25. Düktilite deneyi	33
Şekil 26. Yumuşama noktası deneyi.....	33
Şekil 27. Parlama noktası deneyi.....	33
Şekil 28. Şartnamede verilen gradasyon aralıkları	34
Şekil 29. Elek analizi	35
Şekil 30. Agregaların boyutlarına göre ayrılmış halleri	35
Şekil 31. Agregaların yıkanması	36
Şekil 32. Agregaların fırında kurutulması	36
Şekil 33. Agregaların tartılması ve poşetlenmesi	36
Şekil 34. Briketlerin karıştırma kabındaki görüntüsü.....	37
Şekil 35: Briketlerin krikolama işlemi	38
Şekil 36. Marshall tasarım grafikleri	40
Şekil 37. Numunelerin vakumlanması.....	41
Şekil 38. ITS test cihazı	43

Şekil 39. Çatlama deneyi sonrası örnek numune.....	45
Şekil 40. Marshall stabilite deney aleti.....	46
Şekil 41. Tekrarlı Sünme Deney aleti.....	48
Şekil 42. Öğütülmüş üleksit mineralinin (a) x500 (b) x5k ve (c) x15k altındaki SEM mikrografları	53
Şekil 43. Çinko boratın (a) x500 (b) x5k ve (c) x15k altındaki SEM	54
Şekil 44. Öğütülmüş üleksit mineralinin (a) EDS haritalama bölgesi (b) ağırlıkça yüzde spektrumu ve (c) atomik yüzde spektrumu	57
Şekil 45. Öğütülmüş üleksit mineralinin elementel haritalama görüntüsü.....	58
Şekil 46. Çinko boratın (a) EDS haritalama bölgesi (b) ağırlıkça yüzde spektrumu ve (c) atomik yüzde spektrumu	59
Şekil 47. Çinko boratın elementel haritalama görüntüsü	60
Şekil 48. (a) Öğütülmüş üleksitin ve (b) çinko boratın XRD kırınım desenleri.....	63
Şekil 49. Su hasarı kontrol numuneleri kıyası.....	65
Şekil 50. Su hasarı sadece üleksit katkılı numunelerin kıyası.....	66
Şekil 51. Su hasarı üleksit ve çinko borat katkılı numunelerin kıyası.....	66
Şekil 52. Koşulsuz tüm gruplar için numunelerin ITS değerleri kıyası	67
Şekil 53. Koşullu tüm gruplar için numunelerin ITS değerleri kıyası.....	67
Şekil 54. Koşulsuz tüm gruplar için ort. ITS değerleri kıyası	68
Şekil 55. Koşullu tüm gruplar için ort. ITS değerleri kıyası	68
Şekil 56. Koşullu-koşulsuz tüm gruplar için ort. ITS değerleri kıyası	69
Şekil 57. Tüm gruplar ITRS değerleri grafiği	70
Şekil 58. Çatlama deneyi tüm gruplar için ort. ITS değerleri kıyası	71
Şekil 59. Üleksit ve çinko borat içeren numunelerin stabilite değerleri.....	75
Şekil 60. Üleksit ve çinko borat içeren numunelerin akma değerleri.....	76
Şekil 61. Kontrol numunelerinin stabilite değerleri	76
Şekil 62. kontrol numunelerinin akma değerleri	77
Şekil 63. Üleksit içeren numunelerin stabilite değerleri.....	77
Şekil 64. Üleksit içeren numunelerin akma değerleri.....	78
Şekil 65. Tüm grupların ort. akma değerleri	78
Şekil 66. Tüm grupların ort. stabilite değerleri	79
Şekil 67. Tüm gruplar için sünme grafiği.....	80

GİRİŞ

1. GENEL BİLGİLER

Artan nüfusu ile ulaşım her geçen gün önem kazanmaktadır. Buna bağlı olarak en sık kullanılan karayolu ile ulaşımında kullanılan yöntemler trafik yüklerini ve coğrafyadan kaynaklı dış etkenleri karşılayamamaya başlamıştır. Yıllar boyunca kaplamalarda tekerlek izi oluşumu, yorulma çatlağı, kuma vb. farklı çeşitte bozulmalar görülebilmektedir. Bu bozulmalardan biri veya birkaçı belirli sınırları aştığında kaplama hizmet ömrünü tamamlamış olarak kabul edilmektedir. (ÖCAL, 2018)

Kaplama tabakalarında yüksek sıcaklık ve ağır trafik yükü etkisi altında tekerlek izinde oturma ve kuma, ortalama servis sıcaklığında yorulma çatlağı, düşük sıcaklıklarda ise termal çatlama şeklinde, üstyapıların performansını en fazla etkileyen ve en sıklıkla görülen bozulmaların meydana gelmesinde bitümlü bağlayıcının özellikleri temel etmenlerden birisi olmaktadır. Bitümün özelliklerinin tekerlek izinde oturma üzerindeki etkisi %40, yorulma çatlağı oluşumu üzerindeki etkisi %60, termal çatlak oluşumu üzerindeki etkisi ise %90 gibi yüksek bir oranda gerçekleşmektedir. Dolayısıyla; karayolu üstyapılarının mevcut iklim ve trafik koşullarına göre performansı, yani en az bakım maliyetleri ile en uzun süre ve en konforlu bir şekilde hizmet verebilme kabiliyetleri, önemli derecede bu koşullara uygun bitümün kullanılmasına bağlı olmaktadır. (Güngör, 2009) Ticari ulaşımında kullanılan ağır tırlar, dünyanın beşerî gelişiminde önemli rol alan kamyonların sayılarının artması ayrıca dingil yüklemeleri, dingil konfigürasyonundaki değişiklikler üst yapıya gelen yüklerde önemli ölçüde artışa sebebiyet vermektedir. Bu durum bakım maliyetlerinin artması, meydana gelen bozulmaların önlenmesinin zorlaşması ile sonuçlanmaktadır. (ALTAŞ, 2002)

Türkiye'nin coğrafik koşulları neticesinde ticari yollar üzerinde birçok tünel bulunmaktadır ve halen yapılan tünellerimiz de mevcuttur. Taşınan yükler ve ticaret yoğunluğu tünel kaplaması üzerindeki yükü artırmaktadır. Ticari ulaşımında kullanılan ağır tırlar, dünyanın beşerî gelişiminde önemli rol alan kamyonların gerek ağır

tonajları gerekse taşıdıkları materyallerin yangına elverişliliği tüneller içerisindeki asfalt kaplamaların önemini arttırmaktadır.

Tünellerdeki yangın tehlikesi için yangın geciktirici katkılı asfalt modifiye çalışmaları Çin'de başladı ve esas olarak bitümlü keçe ve su yalıtım malzemelerine odaklanıldı. Yol için alev geciktirici asfalt ile ilgili olarak, 2000'lerden beri çeşitli alev geciktiriciler ve duman bastırma ajanları üzerindeki çalışmalara daha çok ağırlık verilmiştir. (Feipeng Xiao, 2019) Çalışmaların bazılarında asfaltın penetrasyon, viskozite, süneklik gibi özelliklerine yer verilmiş ve önemli olumlu sonuçlara ulaşılmış olsa da asfaltın yaşlanması üzerine yapılan çalışma mevcut değildir. Fakat asfaltın yaşlanma direncine katkı sağlayabileceğini öneren çalışmalar bulunmaktadır. Hem asfaltta yapısal iyileşme hem tünel içi güvenliği sağlayabilecek çok yönlü modifiye asfalt karışımlarının üretilmesi ihtimali asfalt kaplamaların yapım ve bakım maliyetleri göz önüne alındığında önemli bir fırsat olabilir.

1.1. Çalışmanın Amacı

Bu çalışmada ülkemizde kolay ve ucuz yollarla ulaşabileceğimiz bor temelli mineraller olan çinko borat ve öğütülmüş üleksit kullanarak asfalt kaplamalarının performans değerlerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Yaptığımız literatür çalışmalarında da işaret edilen bu mineralleri kullanarak asfalt kaplamaların donma – çözülme (çatlama) ve su hasarı performanslarına ve ek olarak sünme deneyi ile Marshall stabilite deneyi yapılarak çeşitli performanslarının değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

Ayrıca çalışmada amaçlanan bir konuda asfaltın yaşlanması hususudur. Çalışmadan elde edeceğimiz performans deneyi sonuçları ile yaşlanma konusu da ayrıca ele alınacaktır.

1.2. Literatür Özeti

Ru Chen ve arkadaşları (2018), $2\text{ZnO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$ dizilimine sahip çinko borat kullanmışlardır. Kullanılan çinko borat yaklaşık olarak beyaz tozdur ve 10 μm 'den küçük parçacık boyutuna sahiptir. Ayrıca ATH da kullanılmıştır ve kullanılan ATH, ZnB, ATH/ZnB oranları sırasıyla %10, %20 ve %30 dur. Yapılan test sonucu LOI yüzdesi ZnB katkısıyla artmıştır. Alev geciktiricilerin eklenmesi, saf CEAB'nin gerilme mukavemetini arttırmış ayrıca karışımın viskozitesinin de arttırdığı gözlenmiştir.

Feipeng Xiao ve arkadaşları (2019), alev geciktirici ilavesinin eklenmesi ile ilave edilen alev geciktiricinin asfalt içerisindeki yağlı bileşimi emdiği ve bunun neticesi olarak penetrasyon ve sünekliğin alev geciktirici ilavesi ile azalıp yumuşama noktasının yükseldiği belirtilmiştir.

Na Li ve arkadaşı, yapılan deneysel çalışmada, alev geciktiricinin eklenmesinin asfalt harcının yumuşama noktasını artırdığını, penetrasyon derecesinin düştüğünü, sünekliğin azaldığını, asfalt harcının viskozitesinin de buna bağlı olarak arttığını göstermektedir. Penetrasyon sonuçlarının analizinden, alev geciktirici asfalt harcının bileşenlerinin yaşlanma karşıtı performansın gereksinimlerini karşılanabileceği sonucuna varılabilmektedir.

Peiliang Cong ve arkadaşları (2010), asfalt bağlayıcıların yumuşama noktası, penetrasyonu, sünekliği ve viskozitesinin varyasyonu alev geciktirici içeriğinin artmasıyla azaldığı buna bağlı olarak alev geciktirici eklendiğinde asfalt bağlayıcının termo-oksidatif yaşlanma direnci geliştirildiğini söylemektedir. Ayrıca çalışma alev geciktirici asfalt bağlayıcıların yaşlanma direncini artırabilir olduğunu belirtmiştir.

Jiyanying Yu ve arkadaşları(2009), alev geciktirici yüzdesi arttıkça dinamik stabilitenin arttığını gösterdiler. Böylece asfalt karışımında alev geciktirici içeriğinin büyüdükçe kalıcı rutting direncinin artabileceğini belirttiler. Çalışma alev geciktiricinin parçacığı küçük, yüzey alanı faktörünün daha büyük olması nedeniyle dolgudan daha fazla asfalt bağlayıcısı absorbe ettiğinden söz etmektedir. Modifiye asfalt karışımının asfalt içeriğinin azalmasına ve asfalt bağlayıcının uyumunun iyileştirilmesine neden olabileceği belirtilmiştir.

Shaopeng Wu ve arkadaşları (2006), alev geciktirici yüzdesi arttıkça alev dayanıklı modifiye asfalt bağlayıcılarının düşük sıcaklık sünekliğinin giderek azaldığını göstermektedir. Alev dayanıklı asfaltların viskozitesi orijinal asfalttan daha yüksektir. Sıcaklık 135 °C'den az olduğunda çeşitli alev geciktiriciler arasında büyük fark vardır. %6,0 antimon trioksit içeren asfalt bağlayıcının viskozitesi, 110 °C 'deki orijinal asfalttan iki kat daha yüksektir ve 120 °C 'de yaklaşık %100 daha yüksektir.

Ahmad Ramazani ve arkadaşları (2008), belirgin ve önemli olanın Maleik anhidrat ile harmanlanmış polipropileni (MAPP) artırarak R40ZnB kompozitinin gerilme mukavemetini artırması olduğunu söylediler. R40–ATH-MAPP kompozit içine az miktarda ZnB eklenmesinin, dolgu miktarını artırarak gerilme mukavemeti iyileştirmesinin sağlandığı gösterilmiştir. Aynı zamanda kompozit çekme mukavemetinde bir iyileşmeye neden olduğu açıktır. Dahası ATH ve ZnB'nin yüksek çekme modülüne sahip olduğunu belirtilmiştir.

Şahin ve arkadaşları (2006) yaptıkları çalışmada, potasyum tetraborat tetrahidratın dehidrasyonu sunulmakta ve potasyum tetraboratın akışkan yataklı kalsinasyonda kalsinasyon koşulları üzerinde durulmaktadır. Bu süreçteki temel sorun, kalsinlerin fiziksel özelliklerinde ısıtma koşullarına bağlı olarak meydana gelen değişimlerdir. Potasyum tetraborat tetrahidratın yapısındaki değişiklikler, kurutulmuş ürünün partikül boyutunu ve yığın yoğunluk değerini etkiler.

Dündar Ayyıldız ve arkadaşları (2021) yaptıkları çalışmada katkı maddesi olarak NC (nano kil) ve SBS (stiren-bütadiyen-stiren) kullanımının hangi oranlarda kullanıldığında iyi sonuç vereceği araştırılmış ve olası optimum kullanımları su hasarı düşük sıcaklık çatlaması ve tekerlek izi direnci deneyleri ile test edilmiştir. Sonuçta NC kullanımının %2 oranında kullanımının en iyi performansı gösterdiği daha yüksek oranlarda kullanımının ise kümeleşme sebebiyle sonuçlara negatif olarak yansıdığı belirtilmektedir. Yalnızca SBS ile modifiye edilen karışımın iyi sonuçlar sergilediği gözlenmiş olsa da SBS ve NC birlikteliğinin daha iyi sonuçlar sunduğu NC'nin SBS'nin özelliklerini iyileştirdiği yorumuna yer verilmektedir.

Mansour Fakhri ve arkadaşı (2021) bitümlü bağlayıcı ve agrega arasında oluşan adezyonu etkileyen mekanizmaları geliştirerek, nem hasarında sıcak karışımlı asfaltın hassasiyetini azaltmak için nano-çinko oksitini (ZnO) etkilerini değerlendirmişlerdir. Nano ZnO ile modifiye edilmiş bitümlü bağlayıcının asitliğinin

azaldığını ve buna bağlı olarak modifiyeli bitümlü bağlayıcı ve granit gibi asidik agregalar arasında oluşan adezyonun arttığını gözlemlemişlerdir. Buna ilaveten şartlandırılmış koşullarda bitümlü bağlayıcı ve agregalar arasındaki adezyonun gelişmesinde nano ZnO'in etkisinin fazla olduğunu açıklamışlardır.

Öznur Karadağ ve arkadaşları (2021) Vialit deney sonucuna göre, bitümlü bağlayıcıya ilave edilen CDEA miktarı arttıkça, bitümlü bağlayıcının yapışma özelliğinin %87.5 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Nicholson ve Kaliforniya soyulma deneylerinde soyulma yüzdeleri sırasıyla %96.92 ve %10 oranında artmıştır. Farklı oranlarda CDEA ile modifiyeli karışımların 35 °C'lik su banyosunda 24 sa. bekletildikten sonra yapışma özelliğinin, 60 °C'de karışım üzerine su ilavesi olup olmamasına bağlı olarak soyulma yüzdesinin arttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre kullanılan malzemenin 60 °C sıcaklıkta oluşan neme ve suya karşı hassas olduğu düşünülmektedir. Elde edilen sonuçlardan bitümlü bağlayıcıya %5 Cocamide Diethanolamide ilavesinin bitümlü bağlayıcı ve agregata üzerinde önemli derecede olumlu etki yaptığı ancak daha sonra artan oranlarda bu etkinin tersine döndüğü görülmektedir.

Xiaolong Yang ve arkadaşları (2021) asfalt malzemesinin yanma mekanizması incelendi ve yayın olarak kullanılan yangın geciktirici katkı malzemelerinin asfalt üzerinde avantajları ve dezavantajları incelenmiştir. Kullanılan malzemeler arasında inorganik metal çinko borat bulunmaktadır. Çalışma sonuçta yangın geciktiricilerin su hasarı direncini arttırabileceğini, düşük sıcaklık performansını iyileştirebileceğini ve asfalt çatlamasını etkili bir şekilde önleyebileceğini söyleyerek yeni deney ve araştırılmalarla desteklenmesini belirtmişlerdir.

Soon ve arkadaşları (2022) pul yapılı nano çinko oksit asfalt üzerindeki fiziksel ve kimyasal özellikleri incelenmiştir. Farklı oranlarda(%3, %5, %7) nano çinko borat ilavelerinde en iyi sonuç %3 katkı ile alınmıştır. Sonuçta nano çinko oksit kullanımının penetrasyonu azalttığı, yumuşama noktasını yükselttiği gözlenmiştir. FTIR testi bulguları, nano çinko oksit konsantrasyonu arttıkça pik tespitinin de arttığını göstermiştir.

Mohd Yunus ve arkadaşı (2022) yaptıkları çalışmayı orijinal asfalt karışımına %4 oranında Nano-ZnO ekleyerek gerçekleştirmişlerdir. Nano çinko oksitin yumuşama noktası ve penetrasyonu iyileştirdiği belirtilmiştir. Sonuçta Nano-ZnO modifiyeli asfalt karışımının orijinal asfalt karışımına göre daha iyi yaşlanma performansı sağladığı sonucuna varılmıştır.

Chen ve arkadaşları (2022) yaptıkları çalışmada asfalt için %3, %5, %6, %7 ve %9 oranlarında Sitren-Butadien-Sitren (SBS) katkısı kullanmışlardır. Geleneksel asfalt deneyleri ve dinamik kayma reometrisi (DSR) ve dönel viskozimetre (RV) superpave deneyleri sonucunda katkının viskozite ve tekerlek izi dayanımında iyileştirmeler olduğunu gözlemlemişlerdir.

Li ve arkadaşları(2015), Nano-ZnO (çinko oksit) kullanılarak KH-570-Nano-ZnO adında yeni bir madde elde edilmiştir ve hem ZnO hem de KH-570-Nano-ZnO katkılı asfalt karışımların ultraviyole (UV) yaşlanma direnci ve fiziksel özellikleri incelenmiştir. Yapısal analizleri FT-IR ve SEM, yaşlanma özellikleri TFOT ve UV deneyleriyle belirlenmiştir. Ayrıca penetrasyon, yumuşama noktası deneyleri de yapılmıştır. Sonuçta Nano-ZnO katkısının asfalt içerisinde homojen olarak dağıldığı ve bu durumun adezyonu artırdığı, yaşlanma direnci performansını artırdığı gözlenmiştir.

Oruç ve arkadaşları (2013) yaptıkları çalışmada asfalt için %1, %3, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında borik asit katkısı kullanarak modifiye asfalt numuneleri üretmişlerdir. Modifiye asfalt numunelerine penetrasyon, yumuşama noktası ve düktilite deneyleri yapılmış sonuçta, borik asit katkısının asfaltın yumuşama noktası değerini artırdığı, penetrasyon ve düktilite değerlerini ise azalttığı bildirilmiştir.

1.3. Yol Üstyapı Çeşitleri

1.3.1. Esnek Üstyapı

Esnek kaplamalar veya yollar, trafik yükleri nedeniyle bükülen asfalt alanlardır, bu da onları hasara karşı daha az duyarlı hale getirir ve zamanla daha az onarım gerektirir. Esnek bir üstyapı yapısı, birlikte yolun bu esnemeyi karşılamasını sağlayan farklı malzemelerden oluşan birkaç katmandan oluşur. Esnek bir kaplamanın çeşitli katmanları, üst üste binen iki bölüme ayrılabilir: kaplama bölümü ve temel bölümü. (Umar, 1994)



Şekil 1. Esnek üst yapı serimi

Esnek bir kaplamanın temel bölümü, alt temel ve muhtemelen aralarında bir kaplama tabakası bulunan alt temelden oluşurken; kaplama bölümü, alt temel, temel, binder tabakası ve yüzey tabakası katmanlarını içerir. Birlikte, bu iki örtüşen bölüm, esnek üstyapının genel yapısını oluşturur. Temel bölümü, yapısal katmanların düzgün bir şekilde yerleştirilmesini ve sıkışmasını sağlar. Ek olarak, esnek bir üstyapının temel katmanları, alt zemini deformasyondan korumak için yükü dağıtarak inşaat trafiğini desteklemelidir. (Ilıcalı vd., 2001)

Esnek bir kaplamanın temel bölümü, alt zeminin üzerinde ya bir alt temel ve kaplama katmanı ya da sadece alt temelden oluşan tek bir katmana ya da çift katmana sahip olabilir. Katmanlar, esnek üstyapının yapısal katmanlarında donma hasarını önlemek için yeterince kalın olmalıdır. (Yayla, 2004)

1.3.2. Rijit Üstyapı

Sert kaplama, betondan yapılmış herhangi bir yol yüzeyi için kullanılan teknik terimdir. Asfalt kaplı yollar esnek iken beton yollar sert olarak adlandırılır. Bu terimler, kullanım sırasında ve zamanla yol yüzeyinin kendisinde oluşan deformasyon miktarını ifade eder. Beton kaplama kullanmanın en büyük avantajları, dayanıklılığı ve şekli tutma yeteneğidir. Dünya çapında yaygın olarak kullanılan üç temel rijit kaplama türü vardır. (Mohammadı, 2021)



Şekil 2. Rijit üst yapı çalışması

Rijit kaplamanın temel tasarımı çok basittir. Portland çimento betonu (PCC) levhalarından oluşan bir yüzey tabakası, bir avuç alt tabakanın üzerine oturur. Doğrudan PCC'nin altındaki katman, betondan daha esnektir, ancak yine de oldukça serttir. Bu katman, PCC için sabit bir temel sağlar ve drenaja yardımcı olur. Bazı yolların birincisinin altında daha da esnek olan ikinci bir alt katmanı bulunurken, bazı yolların sadece mevcut toprağı vardır. Bu ikinci katmanın gerekli olup olmadığına karar vermede en büyük etken mevcut malzemenin bileşimidir. (Karaşahin, 2014)

1.4. Asfalt Kaplamalar

Karışım tasarımları gradasyonuna göre sınıflandırılabilir gibi karıştırma sıcaklığına göre de sıcak veya soğuk karışık asfalt olarak sınıflandırılabilirler. (AASHTO, 2016)

1.4.1. Sıcak Karışım Asfalt

Sıcak karışım asfalt (HMA), homojen olarak karıştırılmış ve asfalt çimentosu ile kaplanmış bir agregaya kombinasyonundan oluşur. Agregaları kurutmak ve uygun karıştırma ve işlenebilirlik için yeterli asfalt çimento akışkanlığını elde etmek için hem agregaya hem de asfalt ısıtılmalıdır. (Akbulut vd., 2009)

Agregalar ve asfalt, istenen kaplama karışımını üretmek için tüm bileşenlerin ısıtıldığı, oranlandığı ve karıştırıldığı bir karıştırma tesisinde birleştirilir. Tesis karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra, sıcak karışım serim alanına taşınır ve bir finişer makinesi ile gevşek bir şekilde sıkıştırılmış bir tabaka halinde üniform, düzgün bir yüzeye yayılır. Kaplama karışımı hala sıcakken, malzeme, düzgün, iyi birleştirilmiş bir kaplama tabakası oluşturmak için ağır motorlu silindirlerle daha da sıkıştırılır. (Brown vd., 2001)



Şekil 3. Sıcak karışım asfaltların plentte üretilmesi

Sıcak karışım asfalt kaplama karışımları, her biri özel tasarım ve inşaat kullanımlarına uygun kendi özel özelliklerine sahip çok çeşitli agregaya kombinasyonlarından üretilir. Kullanılan asfaltın miktarı ve derecesine ek olarak, karışımın temel özellikleri, kaba agregaya, ince agregaya ve mineral dolgu maddesinin nispi miktarları tarafından belirlenir. (Akbulut vd., 2009)

1.4.2. Soğuk Karışım Asfalt

Soğuk karışım asfalt, tıpkı sıcak karışım asfalt gibi, agrega ve cutback veya bitüm emülsiyonunun bir kombinasyonudur ve genellikle trafiğin az olduğu yollarda veya kırsal yollarda kullanılır. Soğuk karışım asfalt, agregalarla karıştırılmadan önce asfaltın su ve bir emülsifiye edici madde ile emülsifiye edilmesiyle üretilir, asfaltı daha az viskoz hale getirir, böylece karışımın işlenmesi daha kolay olur. (Karpuz, 2000)



Şekil 4. Soğuk karışım asfaltlar ile dolgu işlemi

Karışım, bitüm emülsiyonu ve işlenmemiş agregalardan veya ıslah edilmiş asfalt kaplamalardan/öğütülmüş kaplamalardan oluşan karışım olabilir, ancak ikincisi uygun maliyetli olmalıdır. Çukurların ve aşınmış esnek kaldırımların tamirinde kullanılırlar. Soğuk karışım asfalt aynı zamanda esnek kaplamalar boyunca çalışır ve sahada veya karıştırma tesislerinde üretilebilir. Soğuk emülsiyon karışımları, kullanımlarına, bileşimlerine ve depolana bilirliliklerine göre sınıflandırılan temel agrega-asfalt emülsiyon karışımlarıdır. Kullanılan emülsiyonun derecesi ve

yüzdesinin yanı sıra işlenebilirlik, stabilite, mukavemet ve nem duyarlılığını belirlemek için karışım tasarımları gereklidir. Karışımlar amaca ve iklime göre tasarlanmıştır. (Turan, 2012)

1.5. Malzeme

1.5.1. Agreg

Beton üretim işlemlerinde kullanılan kumlara, çakıl taşlarına ve kırma taşlara verilen ortak isme agrega denmektedir. Üretilen betonların yaklaşık %75'lik kısmını agregalar oluşturmaktadır ve beton üretiminde önemli rol oynamaktadır. Yapı bakımından üçe ayrılırlar. Kum ve kırma kumlara ince agrega denir. 4 mm çaplı eleklerden geçebilen kum ve kum karışımları ince agrega sınıfına girmektedir. Çakıl taşları ve kırma taşlar ise iri agregalar sınıfında yer almaktadır. 4 mm elekten geçemeyen ve eleğin üstünde kalan kırma taş ve çakıllara iri agrega denir. Ayrıca iri ve ince agregaların karışımından oluşturulan agregaya ise karışık agrega veya tüvanan denir. (İlcalı, 2001)



Şekil 5. KTÜ Of Teknoloji Fakültesinden temin edilen agregalar

1.5.1.1. Agregalara Uygulanan Deneyler

Deneylerde kullanılan agregaların özelliklerinin bilinmesi ve bazı testlerden geçmiş olması gerekmektedir. Bu testler Elek Analizi Deneyi (ASTM C136, ASTM C117), Los Angeles Aşınma Deneyi (ASTM C131, AASHTO T96, TS EN 1097-2), Hava Tesirlerine Karşı Dayanım Deneyi (AASHTO T104, TS EN 1367-1), Yassılık İndeksi Deneyi (BS 812), Cilalanma Deneyi (TS EN 1097-8), Özgül Ağırlık ve Absorpsiyon Deneyi (ASTM C127, TS EN 1097-6) deneyleridir. Elek analizi ile istenilen gradasyonda şartnameye uygun şekilde tane boyutlandırması yapılmıştır. Yine Aşınma değerleri, Hava tesirine dayanıklılık, Cilalanma, Özgül ağırlık, Cilalanma deney sonuçlarının şartnamede verilen aralıklar arasında kaldığı gözlemlenmiştir. (İlcalı, 2001)

Özellik	Deney metodu	Değer	Şartname limitleri
Özgül ağırlık (Kaba agreg)	ASTM C 127		
Hacim		2,707	
Zahiri		2,733	
Özgül ağırlık (ince agreg)	ASTM C 128		
Hacim		2,763	
Zahiri		2,766	
Özgül 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 topakları ve ufanabilir daneler, (%)	ASTM C 142		Bulunmayacak
İnce agreg için plastisite indeksi	TS -1900-1	Plastik değil	Plastik değil
İnce agreg için organik madde, (%)	TS EN 1744-1		Negatif

Şekil 6. Deneylerde kullanılan agregaların deney sonuçları

Sonuçlar incelendiğinde Karayolu Teknik Şartnamesinde agregalar için deney türlerine göre verilen sonuç aralıklarla uyumlu sonuçlar olduğu gözlemlenmektedir. Agregalar deneylerin yapıldığı laboratuvarından temin edilmiş olup deney görselleri aşağıda verilmiş olan Şekil 7,8,9,10,11,12 ile gösterilmiş, sonuçları Şekil 6'da belirtilmiştir.



Şekil 7. Özgöl ağırlık deneyi



Şekil 8. Elek analizi deneyi



Şekil 9. Donma deneyi



Şekil 10. Aşınma deneyi



Şekil 11. Yassılık indeksi deneyi



Şekil 12. Cilalanma deneyi

1.5.2. Bitüm

Petrol ürünleri hayatımızın birçok alanında enerji gerektiren işlemler için kullanılmaktadır. Bu amaçla ham petrolün LPG, kerosen, benzin, mazot gibi daha değerli ürünlere dönüşümünü amaçlayan rafinaj prosesleri geliştirilmiştir. Ham petrolün hem atmosferik hem de vakum koşullarında 30-350 derecede ayrımsal damıtılmasından sonra elde edilen tortuya “bitüm” adı verilir. Bitüm, ham petrolün en ağır petrol ürünü olup, esas olarak bazı hetero atomlar ve nitrojen, kükürt, nikel, vanadyum vb. ağır metaller içeren hidrokarbon yapısından oluşur. (Ceylan, 2006)

Bitüm petrol rafinesi sırasında ham petrolün tahribatsız damıtılmasıyla üretilen, çimento benzeri yarı katı veya katı veya viskoz sıvı olan koyu kahverengi ile siyah tortu olarak tanımlanır. Bitüm terimi aynı zamanda uzun hidrokarbon omurgalarından oluşan jenerik bir malzeme olarak da anılmakta ve asfalt karışımlarının bağlayıcı maddesine işaret etmektedir. (Öztürk, 2008)

Farklı bitüm türleri üretmek için çok çeşitli arıtma işlemleri vardır ve bu yöntemler, üreticiye özel özelliklere sahip bitüm üretme şansı verir. Bitüm üretmek için yaygın olarak kullanılan işlemler, damıtma ve çözücüyle asfalt giderme yöntemleridir. Rafinerilerde ham yağlar belirli oranlarda harmanlanarak tutarlı, yüksek kaliteli ürünler ve ayrıca kendine has özelliklerde bitüm elde edilir.



Şekil 13. Bitümlü bağlayıcı, asfalt çimentosu

1.6. Asfalt Kaplamalarda Yaşlanma Konusu

Asfalt çimentosunun dayanıklılığı, yaşlanma, sıcaklık ve yükleme miktarının bir fonksiyonudur. Bitümlü bağlayıcıların çeşitli nedenlerle sertleşme sürecine eskitme denir. HMA'ların üretim süreci ve hizmet ömrü boyunca yaşlanmasına neden olan iki ana faktör, bağlayıcıda bulunan hafif elementlerin oksidasyonu ve buharlaşmasıdır. Oksidasyon, bitümlü bağlayıcıda bulunan hidrojen ve karbonun bir kısmının hidrokarbon bileşenlerinin havadaki oksijen ile birleşmesi sonucu kaybolması işlemi olarak tanımlanır. Yaşlanma sonrası yorulmuş kaplama örneği Şekil 14'te verilmiştir.



Şekil 14. Uzun hizmet ömrü sonrası yorulmuş ve yaşlanmış kaplama

Bitümlü bağlayıcılarda yaşlanmaya neden olan faktörlerle ilgili çok çeşitli bilgiler sunulmaktadır. Bağlayıcıların viskozitesi, yaşlanmaya bağlı olarak artar, karışımın sertliği artar. Yaşlanma nedeniyle karışımların kırılabilirliği artar ve çatlak ilerlemesine karşı dirençleri azalır. (The Shell Bitümen Hand Book, 1990)

Reoloji, malzemenin deformasyonu ve akış özellikleri ile ilgilenir. Bitüm viskoelastik bir malzeme olduğu için sıcaklığın ve yükün hızındaki değişim ile reolojik özellikleri değişir. Bu nedenle bitümün davranışı uygulanan yüke, yükün süresine ve bu süre zarfındaki sıcaklığa bağlıdır. Bitümün tüm bu özellikleri sıcak karışıma geçer ve bu nedenle bitümlü karışımlar da viskoelastik malzemelerdir. Reolojide, deformasyon ve akış kavramı gibi malzemenin davranışının tanımı üzerinde büyük etkisi olan temel kavramlar vardır. Deformasyon, katı davranışla ilişkilidir ve

uygulanan bir yüke yanıt için Şekil veya boyutta bir değişiklik olarak tanımlanabilir. Akış, sıvılarla (ve gazlarla) ilişkilidir ve yük uygulandığı sürece devam eden bir deformasyondur. (Aksoy, 2002)

Ayrıca, yükleme süresi ve sıcaklığın etkileri gibi malzemelerin davranışını belirlemede önemli rol oynayan başka faktörler de vardır. Sıcaklık ve yük süresinin değişimi, farklı davranış Şekilleri aralığı oluşturur. Bitüm, akış ve deformasyon özellikleri gibi reolojik özelliklerinin sıcaklık ve yükleme süresi ile ilişkili olduğu malzemelerden biridir. Hemen hemen tüm asfalt kaplamalar yapıldığında oldukça kalitelidir, ancak 2-3 yıl sonra çatlak gibi sıkıntılar ortaya çıkmaya başlar. Fakat asfalt kaplamaların uğrayacağı deformasyonlar önceden hesaplanabilir ve bunları önleyici tedbirler alınabilirse, kaplamanın ömrünün uzatılması mümkün olabilir. Bunun için öncelikle asfaltın yük altındaki davranışını bilmek gerekir. Bu, asfaltın reolojik özelliklerinin incelenmesiyle elde edilir. Yani asfaltın mukavemeti ve sertlik derecesi ortamın sıcaklığına göre değişir. (Çubuk, 2007)

1.7. Modifiye Asfalt Kaplamalar

Bitüm termoplastik bir malzemedir ve ısıtıldığında kıvamı değişir. Bu, bitümün bağlayıcı olarak kullanılmasını sağlayan özelliklerden biridir. Bitümün viskoelastik karakteri tam olarak bitümlü sıcak karışıma yansır. Viskoelastik malzemeler, daha yüksek yükleme hızlarında (hızlı araçlar) daha elastik davranış ve yüksek mukavemet sergiler. Aksine, düşük yükleme hızlarında (yavaş veya sabit araçlar) viskoz davranış ve düşük mukavemet sergilerler. Orta hızlarda ortak elastik ve viskoz davranış sergilerler. Bitüm ayrıca termoplastik özelliklerinden dolayı yüksek sıcaklıklarda düşük mekanik dayanım, düşük sıcaklıklarda ise yüksek dayanım gösterir. Bitümlü tabakalarda meydana gelen deformasyonlar büyük ölçüde bitüm ve karışımın bu özelliklerine bağlıdır. (İskender, 2008)



Şekil 15. Modifikasyon işleminin yapıldığı karıştırıcı

Son yıllarda yapılan araştırmalar, bazı katkı maddelerinin eklenmesinin bitümün reolojik davranışını etkilediğini, özelliklerini geliştirdiğini ve bitüme üstün özellikler kazandırdığını ortaya koymuştur. Bu nedenle bitüme katkı maddeleri ilavesinin temel amacı, bitümün viskoelastik davranışını değiştirmek ve özellikle düşük sıcaklıklarda davranışını etkilemeden sıcaklık hassasiyetini azaltmaktır. (Orhan, 2012)



Şekil 16. Modifiye bitüm hazırlama plenti

1.8. Asfalt Yolların Türkiye’deki Gelişimi

T.C. kurulduğunda Osmanlı döneminden 18350 km yol devralınmıştır. Bu yolların yalnızca 4000 km’ik kısmı iyi durumda olup ülke politikasının demiryollarına yönelmiş olması nedeniyle gerekli onarımlar ve ilerlemeler 1945 yılına kadar sağlanamamıştır. 1946 yılında alınan karar doğrultusunda ABD’den yardım talep edilmiş olup 1948 yılında Marshall yardımları gönderilmiştir. Bu durumda insan gücüne dayalı çalışma prensipleri makine üçüne dayalı çalışmaya dönmüştür. Çalışmaların hızlanması neticesinde karayollarının organizesinin sağlanması gerektiği tespit edilmiş, 1 Mart 1950 tarihinde Karayolları Genel Müdürlüğü kurulmuştur. 1970 yılına gelindiğinde asfalt kaplamalı yol uzunluğu 17124 km’ ye ulaşmıştır. 2000 yılına gelindiğinde artan trafik hacmi ve konfor gereksinimleri neticesinde bölünmüş yol yapımına başlanmıştır. (Büyüksaraçoğlu, 2009). Aralık 2022 itibariyle asfalt kaplamalı yolların toplam uzunluğu 66,739 ulaşmıştır. (URL-2)

1.9. Bor

Periyodik cetvelde 3A grubuna ait, atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 ve B simgesi ile gösterilen bor; birisi amorf diğeri kristalin olmak üzere iki çeşitten oluşmaktadır. Değişik metal ve ametaller ile tepkimeye girerek farklı yapıda özellikler gösterir. Ortaya çıkan farklı yapıdaki bileşik ve alaşımlar farklı özellikler göstererek, borun kullanımında çeşitli olanaklar sağlar.

Bor, yeryüzünde toprak, kayalar ve suda yaygın olarak bulunan bir elementtir. Doğada serbest element olarak değil, tuz şeklinde bulunan bor mineralinin görünümü beyaz bir kayayı andırmaktadır. Bor minarelini önemli kılan en önemli özelliği çok sert olması, yüksek ısılara dirençli olması ve yakıt olarak kullanıldığında yüksek miktarlarda enerji üretmesidir. (Demir, 2008)

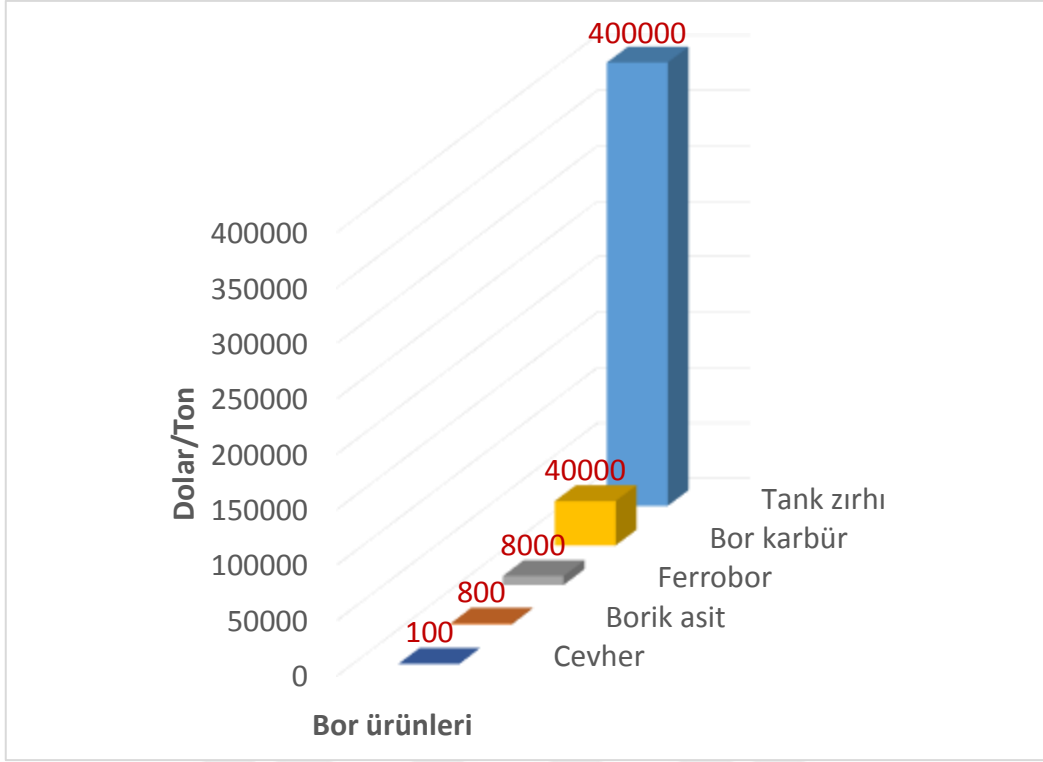
1.9.1. Türkiye’de Bor Minerali Potansiyelleri

Dünya bor rezervlerinin %73’üne sahip olan Türkiye’de bilinen bor yatakları; Eskişehir – Kırka, Kütahya- Emet, Balıkesir Bigadiç, Bursa-Kestelek’te bulunmaktadır. Türkiye’de rezerv açısından en çok bulunan bor mineralleri Tinkal ve Kolemanit’tir. Türkiye’de Tinkal yatakları Eskişehir – Kırka’da, kolemanit yatakları ise Kütahya – Emet, Balıkesir – Bigadiç ve Bursa – Kestelek’te bulunmaktadır. Ayrıca, Balıkesir – Bigadiç’te üleksit rezervi mevcut olup Bursa – Kestelek’te zaman zaman

Üleksit yan ürün olarak elde edilmektedir. 2840 sayılı Kanun ile birlikte Türkiye’de bor ve bor ürünlerinin üretilmesi, işletilmesi ve pazarlanması faaliyetlerini gerçekleştirme görevi Eti Maden tarafından yürütülmektedir.

Eti Maden bünyesinde bulunan 4 İşletme Müdürlüğündeki tesislerde ağırlıklı olarak Boraks Pentahidrat, Boraks Dekahidrat, Borik Asit, Etidot-67, Bor Oksit, Çinko Borat, Kalsine Tinkal, Susuz Boraks, Öğütülmüş Kolemanit ve Öğütülmüş Üleksit üretilerek yurt içi ve yurt dışı pazarlara sunulmaktadır. Eti Maden’in 2017 yılında toplam rafine bor üretim kapasitesi yaklaşık 2,7 milyon tondur. Bor ürünleri Türkiye’de; %36 cam, %31 seramik, %9 temizlik- deterjan, %7 tarım, %4 tutkal ve %14 pay ile diğer alanlarda kullanılmaktadır. Eti Maden, yurt içi bor taleplerinin tamamını karşılamaktadır. Türkiye ekonomisinin uluslararası alanda prestijli bir konuma erişmesine yardımcı olan Eti Maden, 2016 yılında Türkiye’nin En Büyük 1000 İhracatçı Firma sıralamasında 15., en çok ülkeye ihracat yapan firma sıralamasında ise 90 firma arasında 14. sırada yer almaktadır. (URL-1)

Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürü Serkan Keleşer, ham bor mineralinin 31 tesiste 22 ürüne dönüştürüldüğünü, ilk başlarda cevher halinin ton başına 100 dolara satıldığını, fakat şimdilerde borik asidin ton başına 800 dolara, bor karbürün ton başına 40 bin dolara, tank zırhı malzemesinin ise ton başına 400 bin dolara satıldığını bildirdi. Bununla birlikte, Sayın Serkan Keleşer Çin’den temin edilen elektrikli motorlar, rüzgâr türbinleri ve otomotiv sektöründe istifade edilen ferrobör malzemesinin yeni bir projeyle üretilebileceğini ve onun ton başına 8 bin dolar olacağını beyan etti (S. Keleşer, 2023) . Bor ürünlerin fiyatları grafik olarak Şekil 17’deki gibi sunulmuştur.



Şekil 17. Bor ürünlerinin fiyatları

1.9.2. Bor mineralinin teknolojik uygulamaları

Bor geçmişten günümüze önemi ve kullanımı sürekli artan bir madendir. Gelişen sanayi faaliyetleri ve teknolojik gelişmelerle değerinin iyice anlaşılması sonucu birçok alanda kullanımının olması bor madenine olan ilgiyi ve talebi de artırmıştır. Günümüzde sanayi üretiminin vazgeçilmez temel stratejik hammaddelerinden biri olmuştur. Özellikle ikinci dünya savaşı sonrası savunma ve silah sanayiinin hızlı gelişimi sayesinde, bugün hammadde, rafine ve nihai ürün şeklinde en az 200’de alternatifsiz olmak üzere 250’ye yakın alanda kullanılmaktadır. Bor ilave edildiği malzemelerin katma değerlerini önemli Şekilde arttırmakta, bu sebeple “sanayinin tuzu” olarak adlandırılmaktadır. Gelişen teknolojiler bor kullanımı ve Bor’a olan bağımlılığı ve ihtiyacı artırmakta, borun stratejik mineral madde olma özelliği ve önemini giderek daha da belirginleşmektedir. (TMMOB, 2003)

Tablo 1’de (TMMOB Maden Mühendisleri Odası) borun kullanım alanlarına, TMMOB Maden Mühendisleri Odası verilerine dayanarak ayrıntılı bir Şekilde yer verilmiştir.

Tablo 1. Borun kullanım alanları

KULLANIM ALANI	KULLANIM YERLERİ
Askeri & Zırhlı Araçlar	Zırh levhaları, Seramik levhalar, Silah namluları vb.
Cam Sanayi	Borosilikat camlar, Laboratuvar camları, Uçak camları, Borcam, Pyrex, izole Cam elyafı, Tekstil cam elyafı, Optik lifler, Cam seramikleri, Şişe, diğer düz camlar, Otomotiv camları vb.
Elektronik ve Bilgisayar Sanayi	İşlemciler, LCD Ekranları, CD Sürücüleri, Akım levhaları, Bilgisayar ağları; sıcaklığa-aşınmaya dayanıklı Fiber Optik kablolar, Yarı iletkenler, Vakum tüpleri, Dielektrik malzemeler, Elektrik kondansatörleri, Kapasitörler, Gecikmeli sigortalar, Bataryalar, Lazer yazıcı tonerleri vb.
Enerji Sektörü	Güneş enerjisinin depolanması, Güneş pillerinde koruyucu olarak, Hücre yakıtları vb.
Fotoğrafçılık ve Görüş Sistemleri	Kamera ve objektif camları, Fotoğraf makinaları, Dürbünler, Banyo ve film İmalatı
İlaç ve Kozmetik Sanayi	Dezenfekte ediciler, Antiseptikler, Diş macunları, Lens solüsyonları, Kolonya, Parfüm, şampuan vb.
İletişim Araçları	Cep telefonları, Modemler, Televizyonlar vb.
İnşaat Sektörü	Çimentoda direnç arttırıcı ve izolasyon amaçlı olarak
Kağıt Sanayi	Beyazlatıcı olarak
Kauçuk ve Plastik Sanayi	Naylon ve Plastik malzemeler vb.
Kimya Sanayi	Bazı kimyasalların indirgenmesi, Elektrolitik işlemler, Flotasyon
Koruyucu	Ahşap malzemeler ve ağaçlarda koruyucu olarak, Boya ve vernik
Makine Sanayi	Manyetik cihazlar, Zımpara ve aşındırıcılar Kompozit malzemeler, vb.
Metalürji	Kaplama sanayisinde Elektrolit olarak, Paslanmaz ve alaşımlı Çelik, Sürtünmeye - Aşınmaya karşı dayanıklı

Tablo 1 (devamı). Borun kullanım alanları

Nükleer Sanayi	Reaktör aksamaları, Nötron emiciler, Reaktör kontrol çubukları, Nükleer kazalarda güvenlik amaçlı ve nükleer atık depolayıcı olarak,
Otomobil Sanayi	Hava yastıklarında, Hidroliklerde, Plastik aksamda, Yağlarda ve metal aksamalarda, Sıcaklık ve ses yalıtımı sağlamak amacıyla, antifrizler vb.
Patlayıcı Maddeler	Fişek vb.
Seramik Sanayi	Emaye, Sır, Fayans, Porselen boyaları vb.
Spor Malzemeleri	Kayak aksamaları, Tenis raketleri, Balık oltaları, Golf sopaları, Darbe koruyucular vb.
Tarım Sektörü	Biyolojik gelişim ve kontrol kimyasalları, Gübreler, Böcek - bitki öldürücüler, Yabani ot mücadelesi vb.
Tekstil Sektörü	Sıcaklığa dayanıklı kumaşlar, Yanmayı geciktirici ve önleyici selülozik malzemeler, İzolasyon malzemeleri, Tekstil boyaları Deri renklendiricileri, Yapay ipek parlatma malzemeleri, vb.
Tıp	Osteoporoz tedavileri, Alerjik hastalıklar, Psikiyatri, Kemik gelişimi ve Artrit, Menopoz tedavisi, BNTC terapi yöntemiyle beyin kanserlerinin tedavisi, Manyetik Rezonans görüntüleme cihazlarında vb.
Uzay ve Havacılık Sanayii	Sürtünmeye - aşınmaya ve sıcaklığa dayanıklı malzemeler, Roket yakıtı, Uydular, Uçaklar, Helikopterler, Balonlar

1.9.3. Çinko-Borat Genel Özellikleri

Çinko borat, kendisi tarafından veya yüksek performanslı alev geciktiricilerin sinerjik karışımlarını oluşturduğu alüminyum hidroksit veya magnezyum hidroksit ile kullanılabilen inorganik bir alev geciktiricidir. Çinko borat duman emisyonu azaltır. Reaksiyon koşullarına bağlı olarak, pH kontrol edilerek farklı ZnO: B₂O₃: H₂O oranlarına sahip bir dizi çinko boratı üretilebilir. Sentezlenen çinko boratların farklı morfolojilere sahip olduğu bilinmektedir. Alev geciktirici özelliklerde de farklılık gösterirler. Bu çalışmada 2ZnO·3B₂O₃·3.5H₂O en iyi alev geciktirici özelliklere sahiptirler. (ETİ Maden teknik bilgi formu, 2022)

Alev oluşumunu ve gelişimini geciktiren çinko borat; kablo, boya, kumaş, elektrik/elektronik aksam, halı kaplama, otomotiv/uçak iç aksam ve kâğıt sanayinde kullanılmaktadır. Günlük hayatın birçok alanında aktif olarak kullanılan plastik malzemelerin daha güçlü, dayanıklı ve kaliteli ürünlere dönüşmesini sağlayan ZnB, aynı zamanda bu ürünleri alev oluşumuna karşı da korumaktadır.

Yalıtım malzemesi olarak da kullanılan ZnB, pvc kaplamalar, MDF, EVA ürünlerini daha dayanıklı hale getirmektedir. Polimer, ahşap, tekstil gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılan ZnB alev geciktirici inorganik bir katkı maddesidir. Dumanı bastıran ve korozyonu önleyen alev geciktirici özelliği ile birçok sanayi tarafından sıklıkla kullanılan bir hammaddedir. (ETİ Maden teknik bilgi formu, 2022)

1.9.4. Çinko Borat Kimyasal ve Fiziksel Özellikleri

Kimyasal formülü 2ZnO·3B₂O₃·3.5H₂O olan, beyaz katı, kokusuz, higroskopik olmayan, viskoz ve endüstride yaygın olarak kullanılan taneli/toz borattır. Yüksek dehidrasyon sıcaklığına (290-300°C) sahiptir. Suda çözünürlüğü çok düşüktür. Borik asit (H₃BO₃) ile çinko oksitin (ZnO) reaksiyonu sonucu elde edilir. ETİ Maden'e ait örnek Şekil 18'de verilmiştir.

$2\text{ZnO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 3,5\text{H}_2\text{O}$ – ETİ-ZnBor

CAS Numarası: 138265-88-0/12767-90-7

Satış Şekli: Toz

Paketleme: 25 kg, 800 kg



Şekil 18. Çinko borat özellikleri ve perakende satış hali

1.9.5. Üleksit Genel Özellikleri

Üleksit örneklerinin çoğu doğası gereği liflidir. Çoğu zaman lifler keçe benzeri agregalar halinde iç içe geçmiştir. Boratların ilk ticari üretimi burada ABD'de Nevada'daki Teals Marsh gibi kuru/nemli göl yataklarında ve daha sonra üleksitin çoğu "pamuk topları" şeklinde toprak yüzeyinden sıyrıldığı Death Valley, California'da gerçekleşti. Bunlar daha sonra boraks ve diğer borat ürünlerine işlendi. Bu keçe benzeri agregalar, toplayıcıların pek ilgisini çekmez çünkü çamurla ortak karışımları onları çekici yapmaz.

Bazen üleksit, koleksiyoncuların daha çok ilgisini çekecek başka biçimler alır. Koleksiyonerlerin en aşına olduğu, doğal fiber optik karakteri nedeniyle popüler olarak TV rock olarak adlandırılan ulexite türüdür. Daha az bilinen formlar, muhteşem örnekler oluşturabilen iğnemi çeşitlilik ve istiridye kabuğu ülexite olarak adlandırılan formdur. Bilindiği kadarıyla üleksitin bu formları diğer bor yataklarında bulunmaz.

Üleksit, boron, California'da kristalize boraksın keşfine kadar yıllarca Kolemanite ile ana cevherdi ve bundan sonra boratlar için bir ara cevher olarak ikincil bir role zorlandı. (ETİ Maden teknik bilgi formu, 2022)

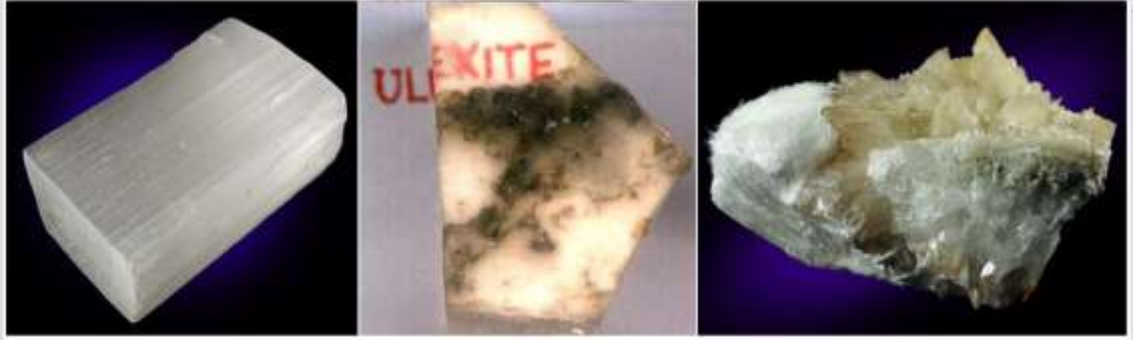
1.9.6. Üleksit Kimyasal Özellikleri

Hidratlı sodyum ve kalsiyum borattan oluşan üleksit, borat minerali, $\text{NaCaB}_5\text{O}_6(\text{OH})_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. Bireysel kristaller renksizdir ve camsı bir parlaklığa sahipken, daha yaygın olan nodüler, yuvarlak veya mercek benzeri kristal kümeler (genellikle pamuk toplarına benzer) beyazdır ve ipeksi veya satensi bir parlaklığa sahiptir. Fiber optik özelliklerinden dolayı bazen televizyon rock veya TV rock olarak adlandırılır. (ETİ Maden teknik bilgi formu, 2022) Şekil 19’da ETİ Maden’e ait üleksit örneği verilmiştir.



Şekil 19. ETİ maden üleksit örneği

Üleksit, sirküle eden sularla sedimanlardan ve piroklastik kayalardan sızan borondan türetildiği kurak bölgelerde bulunur. Tipik oluşumlar, Nevada'nın Esmeralda ilçesinde olduğu gibi tuzlu playalarda (kuru göller) ve bataklıklarda; Death Valley ve California, Kramer bölgesinde; yaygın olduğu Şili'nin nitrat bölgesinde ve Kanada'nın Denizcilik illerinde bulunmaktadır (ETİ Maden teknik bilgi formu, 2022). Şekil 20’de bazı üleksit örnekleri gösterilmiştir.



Şekil 20. Çeşitli bölgelerden çıkarılan üleksit örnekleri

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

Bu çalışma iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Birinci aşamada çinko borat (ZnB) ve öğütülmüş üleksit (ÖÜ) katkı mineralleri kullanılmıştır ve oksitli bileşen, SEM, EDS ve XRD analizleri yapılmıştır. İkinci aşamada bu mineral katkıları yoğun gradasyonlu sıcak karışım asfalt karışımına ilave edilmiştir ve su hasarı, çatlama, Marshall stabilite ve sünme deneyleri yapılmıştır.

Deneylere 3 grup numuneler tabi tutulmuştur. Bunlardan ilki katkı katılmayan kontrol numuneleridir. Su hasarı için 6, Marshall stabilite için 3, çatlama ve sünme içinde 3 numune kullanılmış toplamda kontrol deneyleri için 15 özdeş örnek numune üretilmiştir. Üretilen kontrol numunelerine K simgesi verilmiş olup grafiklerde (K) olarak bahsedilmektedir.

Numune gruplarından ikincisi ise öğütülmüş üleksit katkılı numunelerdir. Agregaya ağırlığınca %6 oranında öğütülmüş üleksit katılarak numuneler üretilmiştir. Modifikasyon işlemi agregaya eklenerek yapılmıştır. Üleksit içeren numuneleri test etmek içinde yine kontrol numunelerinde olduğu gibi 15 adet numune kullanılmıştır. . Üretilen numunelere D simgesi verilmiş olup grafiklerde ÖÜ olarak bahsedilmektedir.

Son grup ise üleksite ek olarak çinko borat ilavesi yapılarak test edilmiştir. Son grupta toplam agregaya ağırlığına oranla %4,5 öğütülmüş üleksit kullanılırken %1,5 oranında da çinko borat ilave edilmiştir. Birden fazla katkılı üçüncü grubumuzu test etmek için ise yine 15 adet numune üretilmiştir. Üretilen numunelere F simgesi verilmiş olup grafiklerde ÖÜ+ ZnB) olarak bahsedilmektedir.

Sonuç olarak toplamda 45 adet numune ile performans deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları ve bulgular bu bölümde detaylı şekilde sunulmuştur.

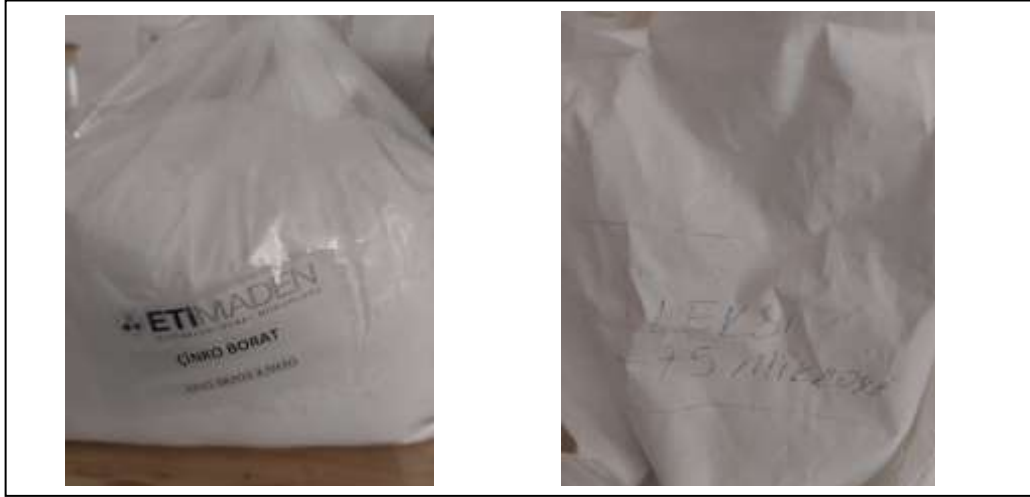
2.1. Bor Minerallerinin Karakterizasyonu

2.1.1. Çinko Borat ve Öğütülmüş Üleksit Mineralleri

Katkı malzemesi olarak kullanılacak bor mineralleri, ZnB ve ÖÜ olarak tercih edilmiştir. Her iki malzeme Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü'nden Ar-Ge kapsamında Şekil 22'de gösterildiği gibi tedarik edilmiştir ve alındığı gibi yani herhangi bir işlem yapılmadan bu çalışmada kullanılmıştır. ÖÜ minerali -75μ (No.200) toz, 25 kg, 1 ton ve 1,2 ton torbalar halinde ve CAS numarası:1319-33-1 olan yerli ve milli ticari bir rafine/konsantre üründür. ZnB toz şeklinde, 25 kg ve 800 kg torbalar halinde ve CAS numarası:138265-88-0/12767-90-7 olan Eti-ZnBor adıyla yerli ve milli ticari bir uç üründür. Bor minerallerinin fiziksel ve kimyasal özellikleri tedarikçi firma tarafından Tablo 2'deki gibi verilmiştir. (ETİ Maden, 2014),(ETİ Maden, 2022). Ayrıca bor minerallerinin ETİ madenen tedarik edilmiş olan torba görüntüleri Şekil 21'de, malzeme görüntüleri ise Şekil 22' de verilmiştir.

Tablo 2. Öğütülmüş üleksit minerali ve çinko boratın fiziksel ve kimyasal özellikleri

Bileşen	Öğütülmüş üleksit (ağ.%)	Çinko borat (ağ.%)
B ₂ O ₃	37,00 ± 1,00	46,80-49,20
ZnO	—	36,30-38,70
CaO	≤19,00	—
Na ₂ O	≤3,50	—
SiO ₂	≤4,00	—
MgO	≤2,50	—
SrO	≤1,00	—
Al ₂ O ₃	≤0,25	—
SO ₄	≤0,25	—
Fe ₂ O ₃	≤0,04	—
As	≤40 ppm	—
Nem	≤1,00	—
Özgül ağırlık (g/cm ³)	2,13	2,71
Ergime noktası (°C)	870	650
Su çözünme	Yavaş	Az
Dehidrasyon sıcaklığı, T _p (°C)	180	400
Kristal sistem	Triklinik	Monoklinik



Şekil 21. Öğütülmüş üleksit minerali ve çinko boratın görüntüleri



Şekil 22. Toz haldeki çinko borat görseli

2.1.2. Fiziksel Ölçümler

ZnB ve ÖÜ mineral tozların mikografları, taramalı elektron mikroskobu (SEM; Jeol, model 'JSM-6610') ile çekilmiştir. Önce mineral tozlar iletkenlik için altınla kaplanmıştır ve sonra ölçüm şartları için 15 kV'luk hızlandırıcı bir voltajı ayarlanmıştır. Mikograflar, x500, x5k ve x15k büyütme yapılarak alınmıştır. Parçacık boyutlarının tam değeri ise, ImageJ 1.53a (NIH) yazılımı kullanılarak saptanmıştır.

ZnB ve ÖÜ mineral tozların elementel kompozisyonları, SEM cihazına entegre edilmiş bir enerji dağılımlı X-ışını spektrometresi (EDS; Oxford Inst., model 'x-act') aracılığıyla tetkik edilmiştir. EDS kantitatif değerleri, seçilen alandaki haritalama analizinden elde edilmiştir. Atom numarası küçük olduğundan bor elementi için ölü zaman ayarı yapılmıştır.

ZnB ve ÖÜ mineral tozların kristal yapıları, CuK_α radyasyonuna ($\lambda=1.541 \text{ \AA}$) sahip X-ışınları difraktometresi (XRD; Rigaku, model 'SmartLab') vasıtasıyla analiz edilmiştir. XRD desenleri, 40 kV'luk voltajda, 30 mA'lık akımda, $2\theta=4^\circ-60^\circ$ aralığında, $0,02^\circ$ adım genişliğinde ve $3^\circ/\text{dak}$ tarama hızında kaydedilmiştir. XRD kantitatif analizi, cihazın PDXL yazılımı ile gerçekleştirilmiştir.

2.2. Asfalt Karışımların Karakterizasyonu

2.2.1. Bitümlü Bağlayıcılara Uygulanan Deneyler

Bitümlü bağlayıcının yani asfalt çimentosunun şartnamede belirtilen limitlere göre uygun olup olmadığı kontrol edilmiştir. Yapılan deney görüntüleri Şekil , 23, 24, 25, 26, 27'de gösterilmiştir. Asfalt çimentosu deney sonuçları Tablo 3' de verilmiştir.

Tablo 3. Asfalt çimentosu deney sonuçları

Deneyler	Sonuçlar	Şartname limitleri	Yöntem
Aşınma Kaybı %	15,6	27	TS EN 1097-2
Donma Kaybı %	9,95	16	ASTM C-88
Cilalanma Değeri %	-	50	TS EN 1097-8
Yassılık İndeksi%	12	20	BS 812
Bitüm Özgül A.	1.011	-	ASTM D-70
Penetrasyon	62	50-70	TS EN 1426
Yumuşama Noktası	48	46-54	TS EN 1427
Düktilite	>100	min 100	ASTM D-113



Şekil 23. Özgül ağırlık deneyi



Şekil 24. Penetrasyon deneyi



Şekil 25. Düktilite deneyi



Şekil 26. Yumuşama noktası deneyi



Şekil 27. Parlama noktası deneyi

Deneylerde kullanılan bitümlü bağlayıcı için, yapılan deneylerin sonuçları Karayolu Teknik Şartnamesinde verilen değerler ile kıyaslanmış ve değerlerin istenilen aralıklarda olduğu gözlemlenmiştir.

2.3. Karışım Tasarımı

Deneylerde kullanılan bitümlü bağlayıcı için, yapılan deneylerin sonuçları Karayolu Teknik Şartnamesinde verilen değerler ile kıyaslanmış ve değerlerin istenilen aralıklarda olduğu gözlemlenmiştir.

Agrega karışım gradasyonunu yoğun gradasyonlu olarak seçildi ve Karayolu Teknik Şartnamesine (Şekil 28) uygun olarak aşınma tabakası tip 1 için 1150 gramlık agreg ağırlığı belirlendi.

Elek Boyu Mm (in, No)	TİP-1	TİP-2	TİP-3 Çok İnce Aşınma
19 (3/4")	100		
12,5 (1/2")	88 - 100	100	100
9,5 (3/8")	72 - 90	80 - 100	90 - 100
6,0 (1/4")	-	-	25 - 33
4,75 (No.4)	42 - 52	55 - 72	23 - 31
2,00 (No.10)	25 - 35	36 - 53	20 - 27
0,425 (No.40)	10 - 20	16 - 28	12 - 18
0,180 (No.80)	7 - 14	8 - 16	
0,075 (No.200)	3 - 8	4 - 8	7 - 11

Şekil 28. Şartnamede verilen gradasyon aralıkları

Elek analizi deneyi yapıldı (Şekil 29) ,agregalar boyutlarına göre kategorize edildi (Şekil 30). 19-12.5mm, 12.5-9.5mm ve 9.5-4.75mm boyutlarındaki agregalar yıkandı ve 110 °C'lık fırında kurutuldu (Şekil 31,32). Belirlenen oranlarda tartılan agregalar kilitli poşetler ile pakettendi(Şekil 33).



Şekil 29. Elek analizi



Şekil 30. Agregaların boyutlarına göre ayrılmış halleri



Şekil 31. Agregaların yıkanması



Şekil 32. Aregaların fırında kurutulması



Şekil 33. Agregaların tartılması ve poşetlenmesi

Belirlenen gradasyona göre her bir briket tasarımı için ayrı agregalar paketlendi. Optimum bitüm tayini için % 4, 4.5, 5, 5.5, 6, 6.5 ve 7 bitüm oranına sahip üçer adet toplanda 20 adet briket hazırlandı. 120 °C’de olan fırına agregalar ve bitüm yerleştirildi. Fırın 180 °C’ye çıkarıldı ve 3 saat daha bu sıcaklıkta malzemeler bekletildi.

Önceden ısıtılan karıştırma kabına agregalar ve belirlenen miktarda bitüm konularak karıştırıldı (Şekil 34). Karışım tekrar fırın kabına alınarak fırına yerleştirildi. 3 saat sonunda karışım tekrar karıştırma kabına alındı ve bir önceki akşam benzin ile temizlenmiş olan kalıplara döküldü. Kalıbın alt ve üstüne yağlı kâğıt konuldu.

140-150 °C aralığında olan karışım Marshall tokmağına yerleştirildi ve her bir yüzüne 75 vuruş yapıldı Yağlı kağıtlar çıkarılarak briketler soğumaya bırakıldı. Soğuyan briketler krika ile çıkarıldı (Şekil 35).



Şekil 34. Briketlerin karıştırma kabındaki görüntüsü

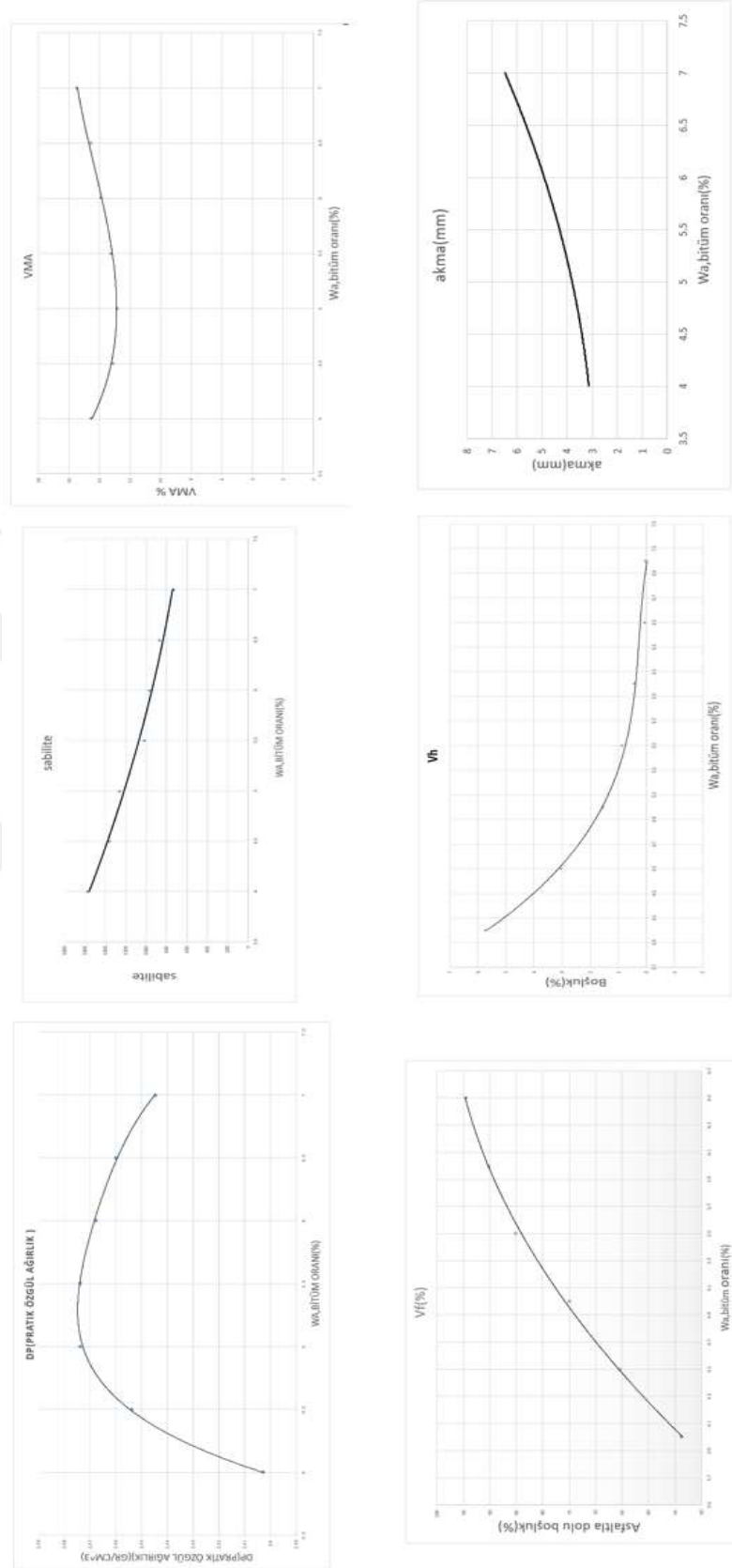


Şekil 35: Briketlerin krikolama işlemi

Briketlerin havadaki, sudaki ve doymun kuru yüzey ağırlıkları hesaplandı ve hacimleri belirlendi. Briketlerin akma ve stabilitelele Marshall aleti ile belirlendikten sonra optimum bitüm belirlenmesi için gerekli olan hesaplamalar Tablo 4 ve Şekil 36'da gösterildiği üzere yapıldı ve optimum bitüm yüzdesi 4,1 olarak saptandı.

Tablo 4. Marshall Tasarım Değerleri

[illegible]



Şekil 36. Marshall tasarım grafikleri

Bu çalışmada numune testi için 4 farklı deney yöntemi uygulanmıştır. Bunlar Su hasarı, Çatlama, Marshall stabilite ve sünme deneyleridir. Tüm deneyler Aashto Deney Standartlarına uygun olarak yapılmıştır. (AASHTO

2.4. Su Hasarı ve Çatlama Deneyleri

Su hasarı deneyi için toplamda 6 adet numune üretildi. Bu numunelerin 3 tanesi koşullu iken diğer üçü ise koşullandırılmadan test cihazında kırılmıştır. Su hasarı deneyi için 25 °C’de 2 saat su banyosunda bekletilen numuneler, Marshall cihazında kırılarak mukavemetleri ölçüldü.

Koşullu su hasarı için briketler vakum aletine konulup 0,7 bar basınç altında 12 dakika bekletildi (Şekil 37). Daha sonra 5 dakika dinlendirilip sonrasında streç film ile kaplanıp kilitli poşetlere konuldu. Kilitli poşetlere 10 ml su eklendikten sonra -18 °C’ye ayarlanan dondurucuda 20 saat bekletildi. Daha sonra; bekletilmeksizin +60 derecede su banyosunda 24 saat bekletilip, 25 derecede 3 saat bekletildi. Son olarak Marshall cihazında kırılarak mukavemetleri ölçüldü. Sonuçlar Tablo 5’te verilmiştir.



Şekil 37. Numunelerin vakumlanması

Tablo 5. Koşulsuz su hasarı kırım sonuçları

SU HASARI (kN)	
K1	8,48
K2	8,15
K3	8,97
D1	7,41
D2	7,97
D3	8,09
F1	6,65
F2	7,16
F3	6,97



Şekil 38. ITS test cihazı

Koşullama işlemi yapılan briketler Marshall cihazında kırılarak mukavemetleri ölçüldü. Sonuçlar Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. Koşullu numunelerin test sonuçları

KOŞULLU SU HASARI (kN)	
K4	5,99
K5	5,3
K6	5,75
D4	5,66
D5	5,65
D6	5,95
F4	5,37
F5	5,69
F6	5,52

Çatlama deneyi için koşullama işlemi yapıp 3 saat dinlendirilen briketler 0°C’de 12 saat bekletildikten sonra kırıldı. Sonuçlar Tablo 7’de verilmiştir. Kırılma işlemi sonrası örnek ZnB+ÖÜ katkılı briket numunesi Şekil 39’de gösterilmektedir.

Tablo 7. Çatlama deneyi sonrası test değerleri

DÜŞÜK SICAKLIK ÇATLAMASI	
	(kN)
K7	19,18
K8	11,49
K9	15,47
D7	16,51
D8	13,16
D9	19,37
F7	15,96
F8	16,92
F9	14,56



Şekil 39. Çatlama deneyi sonrası örnek numune

2.5. Marshall Stabilite Deneyi

Her test grubu için toplamda 3 numune ile bu deney yapılmıştır. Briketler 60 °C'lık suda 45 dk bekletildikten sonra kırılmıştır. Marshall deney aleti Şekil 40'da gösterilmiştir. Deney sırasında numunelerin deformasyona uğradığı stabilite değeri ile birlikte bu deformasyon gerçekleşinceye kadar numunede oluşan Şekil değişimi yani akma miktarı not alınmıştır. Marshall stabilite deney sonuçları Tablo 8'de verilmiştir.



Şekil 40. Marshall stabilite deney aleti

Tablo 8. Marshall stabilite deney sonuçları

	STABİLİTE(kN)	AKMA(mm)
K10	13,21	5,81
K11	12,34	3,83
K12	12,45	3,74
D10	11,81	2,92
D11	12,61	7,77
D12	11,9	4,45
F10	12,09	2,7
F11	12,64	3,91
F12	15,17	3,51



Şekil 42. Marshall test aleti çıktı ekranı

2.6. Tekrarlı Sünme Deneyi

Her test grubu için toplamda 3 numune ile bu deney yapılmıştır. Toplamda 6 saat 40 derece sıcaklıkta bekletilen her bir briket deney aletine yerleştirildi. Briket bilgileri programa girildi. Sıkıştırma işlemi yapıldı ve deney başlatıldı. Deney aleti Şekil 41’de verilmiştir. 10.000 vuruş ile deney tamamlandı.



Şekil 41. Tekrarlı Sünme Deney aleti

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Bor Minerallerinin Karakterizasyonu

3.1.1. Oksitli Bileşen Analizi

Tablo 9, öğütülmüş üleksit (ÖÜ) mineraline ait saf üleksit bileşen değerlerini vermektedir. Tedarikçi firma tarafından sağlanan bor trioksit bileşen değeri ağırlıkça %37,00±1,00 (Tablo 2) dikkate alınarak diğer saf bileşen değerleri, teorik değerler üzerinden bulunmuştur. Na₂O, CaO, B₂O₃ ve H₂O bileşenlerinin toplamı (Na₂O·2CaO·5B₂O₃·16H₂O) ağırlıkça %86 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgudan ÖÜ mineral tozunun (alındığı gibi, yani herhangi bir temizleme, kurutma, öğütme ve benzeri işlem yapılmamıştır) saf olmadığı anlaşılmıştır. Bu çalışmada tahmin edilen %30,64 H₂O değeri, tedarikçi firmanın TG/DTA eğrisinden (ETİ Maden, 2014) tespit edilen %27 H₂O değeri ile neredeyse uyumludur.

Tablo 10, ÖÜ mineral tozunun tahmini mineral kompozisyonunu göstermektedir. Hem tedarikçi firma tarafından sağlanan CaO bileşen değeri ağırlıkça maksimum %19,00 (Tablo 2) hem de CaCO₃ (kalsit) hesaba katıldığı zaman, kalsit minerali değeri ağırlıkça en fazla %13,00 olarak tahmin edilmiştir. Ayrıca ÖÜ mineral tozunun kil, dolomit, kolemanit ve benzeri gibi mineraller ihtiva ettiği bilinmektedir, böyle bir durumda bunların en az %1,00 olduğu düşünülmektedir.

Tablo 9. Öğütülmüş üleksit mineralinin saf bileşen değerleri

Bileşen	İçerik (% ağı.)	Teorik değer (% ağı.)
Na ₂ O	6,59	7,65
CaO	11,92	13,84
B ₂ O ₃	37,00	42,95
H ₂ O	30,64	35,57
Toplam	86,15	100,01

Tablo 10. Üleksit mineralinin tahmini mineral kompozisyonu

Mineral adı	İçerik (% ağı.)
Üleksit	86
Kalsit	≤13
Diğer	≥1
Toplam	100

Tablo 11, çinko borat (ZnB) tozunun hesaplanan kristalize su değerini vermektedir. Tedarikçi firma tarafından sağlanan çinko oksit ve bor trioksit bileşenleri (Tablo 3) dikkate alınarak mol hesabı üzerinden kristalize su değeri bulunmuştur. Asgari değerler için H₂O değeri ağırlıkça %14,0 olarak ve azami değerler için %14,8 olarak hesaplanmıştır. Başka ifadeyle bu değer %14,4±0,4'dir. Bununla birlikte, ZnO, B₂O₃ ve H₂O bileşenlerinin toplamı (2ZnO·3B₂O₃·3.5H₂O) ağırlıkça %99,9±2,8 olarak hesaplanmıştır. Bu neticeden ZnB tozunun (alındığı gibi) saf olduğunu sonucuna ulaşılmıştır. Bu çalışmada tahmin edilen %14 H₂O değeri, Özçelik vd. yapmış olduğu çalışmadaki (Özçelik vd,2022) TG/DTA eğrisinden tespit edilen %14 H₂O değeri ile tam olarak örtüşmektedir.

Tablo 10. Çinko boratın kristalize su miktarının hesabı

Bileşen	Asgari (% ağı.)	Molekül kütlesi (g/mol)	mol hesabı	mol hesabı tam sayı
ZnO	36,3	81,379	0,446	2,0
B ₂ O ₃	46,8	69,617	0,672	3,0
H ₂ O	14,0	18,015	0,778	3,5
Toplam	97,1	434,661		
Bileşen	Azami (% ağı.)	Molekül kütlesi (g/mol)	mol hesabı	mol hesabı tam sayı
ZnO	38,7	81,379	0,476	2,0
B ₂ O ₃	49,2	69,617	0,707	3,0
H ₂ O	14,8	18,015	0,824	3,5
Toplam	102,7	434,661		

3.1.2. SEM Analizi

Şekil 42, öğütülmüş üleksit mineral tozunun (a) x500 (b) x5k ve (c) x15k büyütme altındaki SEM mikrograflarını göstermektedir. x500 büyütme için, partiküllerin bazıları iri boyutlu, düzensiz şekle ve pürüzlü bir yüzeye sahip olduğu, bazılarının ise ince boyutlu ve yuvarlak şekle sahip olduğu görülmektedir. Partiküller bazı bölgelerde agglomerasyonlu yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Partikül boyutu en büyük 67 μm ve en küçük ise $<3 \mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir. Bu, partikül boyut dağılımının (PSD) çok geniş olduğu yani homojen bir dağılım olmadığı anlamına gelmektedir.

Şekil 42 (b)'deki x5k büyütme için, partiküllerin ince boyutlu ve düzensiz şekle sahip olduğu ve onların yer yer agglomerasyonlu bir yapıda olduğu görülmektedir. Bununla birlikte, büyük boyutlu toz partiküllerinin üzerine çok daha küçük boyutlu toz partiküllerinin yapıştığı (uydulaşma) fark edilmiştir. Uydulaşmanın, tozların üretimi aşamasında küçük toz partiküllerinin büyük toz partiküllerine göre daha hızlı şekilde katılaşmasının bir sonucu olduğu bilinmektedir (Üstündağ, 2022). Ayrıca, partikül boyutunun en büyük 6 μm ve en küçük ise $<300 \text{ nm}$ olduğu, dolayısıyla PSD'nin geniş olduğu belirlenmiştir.

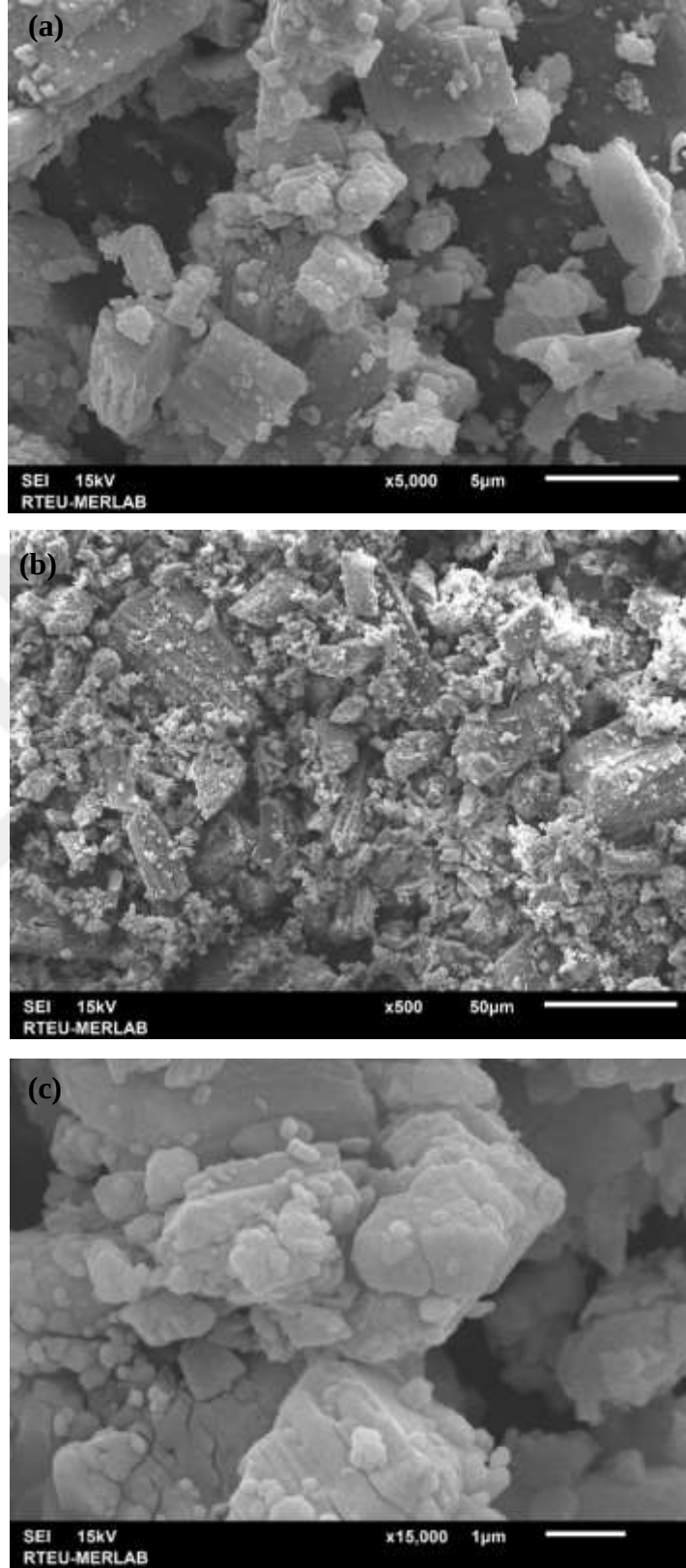
Şekil 42 (c)'deki x15k büyütme için, partiküllerin ultra ince boyutlu ve daha yuvarlak şekle sahip olduğu ve onların agglomerasyonlu ve uydulaşmalı bir yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Daha büyük boyutlu partiküllerde mikro çatlaklarının olduğu saptanmıştır ve bunun olası nedeni toz üretim yönteminin mekaniksel öğütme işlemi ile olmasındandır. Son olarak, en küçük partikül boyutu 77 nm olarak ölçülmüştür. Literatürdeki çalışmalarda (S. Kutuk vd, Haziran 2017),(T. Kutuk-Sert, Kasım 2017) –75 μm üleksit mineralinin (U_75 μ , 0 h) SEM mikrografi analiz edilmemiş, fakat lazer difraksiyonu partikül boyut analizi yapılmıştır. PSD'de ölçülen d_{90} , d_{50} , d_{10} ve d_{min} değerleri sırasıyla $\sim 45 \mu\text{m}$, 12 μm , 3 μm ve 500 nm olarak tayin edilmiştir. Bu çalışmadaki partikül boyutu ile kabaca karşılaştırıldığı zaman, ortalama partikül boyunun aynı seviyede olduğunu çıkarımı yapılabilir.

Şekil 43, çinko borat tozunun (a) x500 (b) x5k ve (c) x15k büyütme altındaki SEM mikrograflarını sunmaktadır. ÖÜ minerali ile kıyaslama yapabilmek için aynı büyütmelerde ölçümler alınmıştır. x500 büyütme için, partiküllerin çok çok küçük boyutlu olduğu görülmüştür. Partikül boyutunun 2 μm civarında olduğu tespit edilmiştir. Bu görüntüden partiküllerin uniform dağılımlı olduğu kanısına varılmıştır.

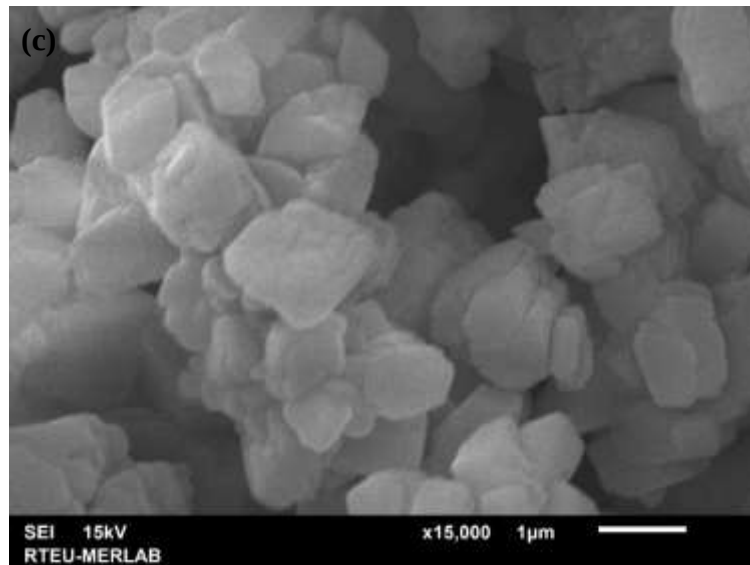
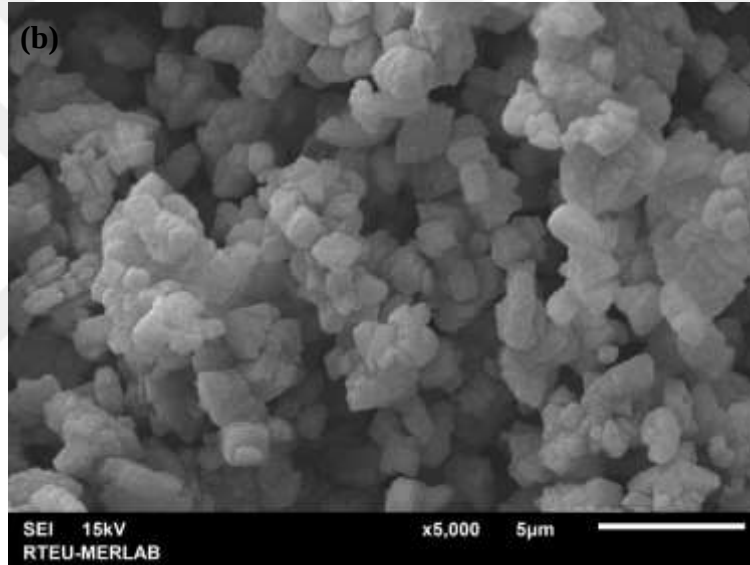
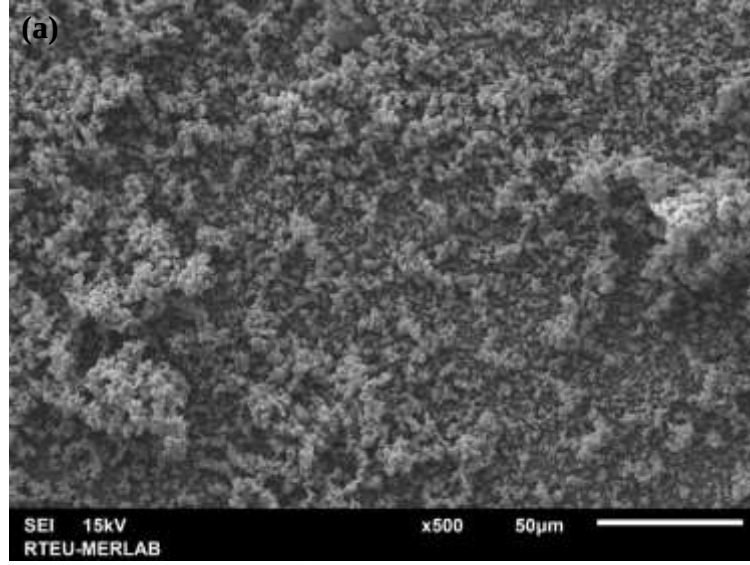
Şekil 43(b)'deki x5k büyütme için, partiküllerin ince boyutlu ve yuvarlak şekle sahip olduğu ve onların yer yer güçlü agglomerasyonlu bir yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, partikül boyutunun en büyük 4 μm ve en küçük ise 337 nm olduğu, dolayısıyla PSD'nin dar olduğu belirlenmiştir. Başka bir deyişle, partiküllerin uniform dağılıma sahip olduğu tespit edilmiştir.

Şekil 43(c)'deki x15k büyütme için, partiküllerin çok ince boyutlu ve yuvarlak şekle sahip olduğu ve onların agglomerasyonlu bir yapıda olduğu görülmüştür. En küçük partikül boyutu 187 nm olarak bulunmuştur. ÖÜ minerali ile mukayese edildiğinde, mikro çatlakların ve uydulaşmanın olmadığı fark edilmiştir. Bunun kuvvetle muhtemel nedeni toz üretim yönteminin kimyasal işlemi ile gerçekleştirilmesindendir.

Genel olarak ÖÜ minerali ile ZnB tozları kıyaslandığı zaman, ZnB tozunun partikül boyutunun çok küçük olduğu, homojen dağılımlı olduğu ve partikül şeklinin daha yuvarlak olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



Şekil 42. Öğütülmüş üleksit mineralinin (a) x500 (b) x5k ve (c) x15k altındaki SEM mikrografları



Şekil 43. Çinko boratın (a) x500 (b) x5k ve (c) x15k altındaki SEM

3.1.3. EDS Analizi

Şekil 44(a), öğütülmüş üleksit mineral tozunun EDS haritalama bölgesi görüntüsünü sunmaktadır. Bu görüntüye göre, elementlerin homojen bir dağılıma sahip olduğu anlaşılmıştır. ÖÜ mineralinin ağırlıkça yüzde spektrumunu ve atomik yüzde spektrumunu Şekil 44 (b)'de gösterilmiştir. ÖÜ mineral tozunda O, Ca, B ve Na elementlerinin toplam ağırlık yüzdesi %96.0 olarak dedekte edilmiştir. Bu veri $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{CaO} \cdot 5\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$ olan ÖÜ kimyasal bileşenlerini işaret etmektedir. Ancak, Si, Mg, Sr, S ve Al elementlerin toplam ağırlık yüzdesi %4 olarak belirlenmiştir. Bu veri ise harici elementler olduğu için ÖÜ mineral tozunun safsızlık ihtiva ettiği ortaya koymaktadır. Saf ÖÜ ait veriler, Tablo 9'daki saf oksitli bileşen analizinden hesaplanan %86 değeri ile çakışmamaktadır. Bunun, Tablo 10'daki mineral kompozisyonunda verilen safsızlık CaCO_3 mineralinden kaynaklandığı düşünülmektedir.

ÖÜ mineralinin atomik yüzde spektrumunu Şekil 44(c)'de verilmiştir. Oksijen hariç, bor elementinin en yüksek değerde çıkması Tablo 9'deki en yüksek değere sahip B_2O_3 ile uyum içindedir.

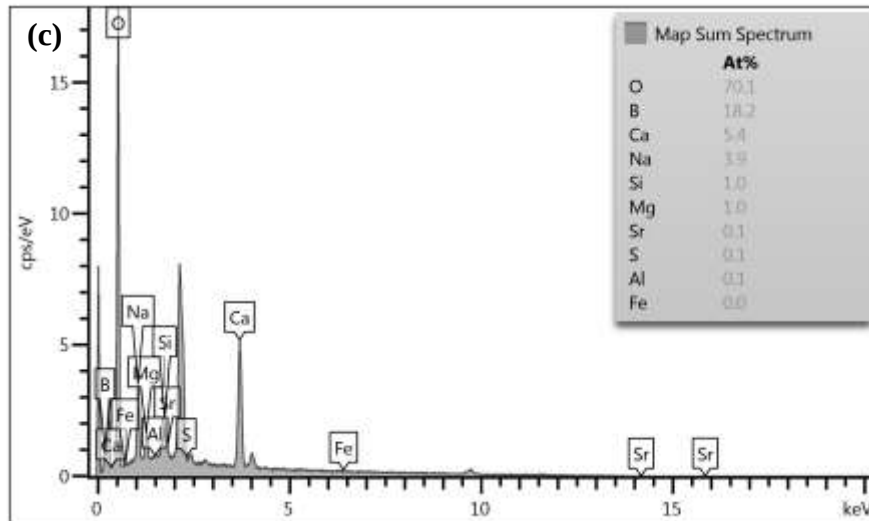
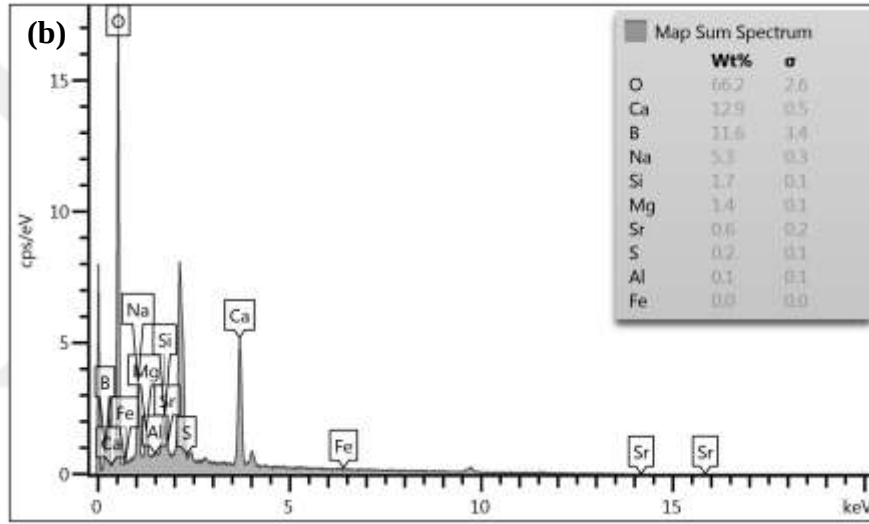
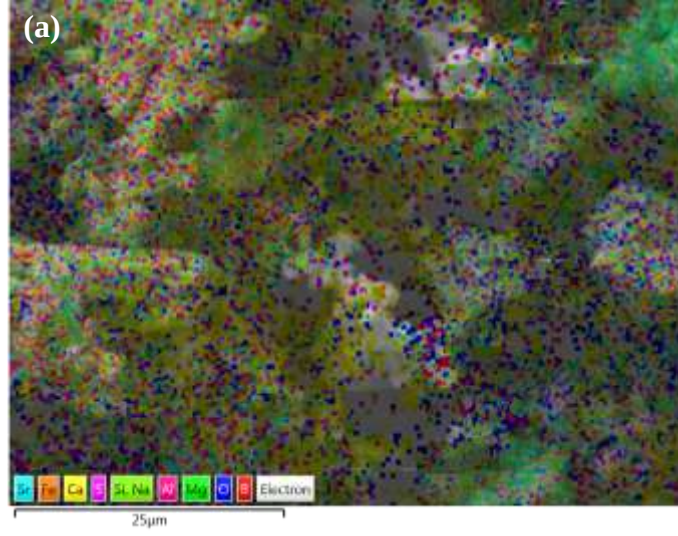
Şekil 45, öğütülmüş üleksit mineral tozuna ait elementel haritalama görüntüsünü sunmaktadır. Elementlerin genellikle homojen dağılımlı olduğu, fakat bazı yerlerde az da olsa Ca, Si, Mg ve Sr elementlerin daha parlak görüldüğü tespit edilmiştir.

Kutuk tarafından yapılan bir çalışmada (S. Kutuk, Influence of) -3 mm/iri boyutlu üleksit minerali (B_2O_3 : ağırlıkça $\%25,5 \pm 1,5$, alındığı gibi) yüksek enerjili bilyalı değirmende 30 dakika öğütülmüş ve akabinde elde edilen tozun (U_{5m}) EDS analizi yapılmıştır. Onun çalışması ile bu çalışma arasında küçük bir fark göze çarpmaktadır. Bu fark şu Şekilde izah edilebilir: Ağırlıkça yüzde spektrumunda Ca (en yüksek pik, $\%20,5$, fark: $+\%7,6$), Si ve Mg'ye ait piklerin şiddeti daha yüksek iken, B'ye ait pik şiddeti ($\%6,6$, fark: $-\%5,0$) ise daha küçüktür. Yani, bu fark B_2O_3 miktarı daha az olduğundan dolayı içerdiği safsızlık miktarının daha fazla olmasından ileri gelmektedir.

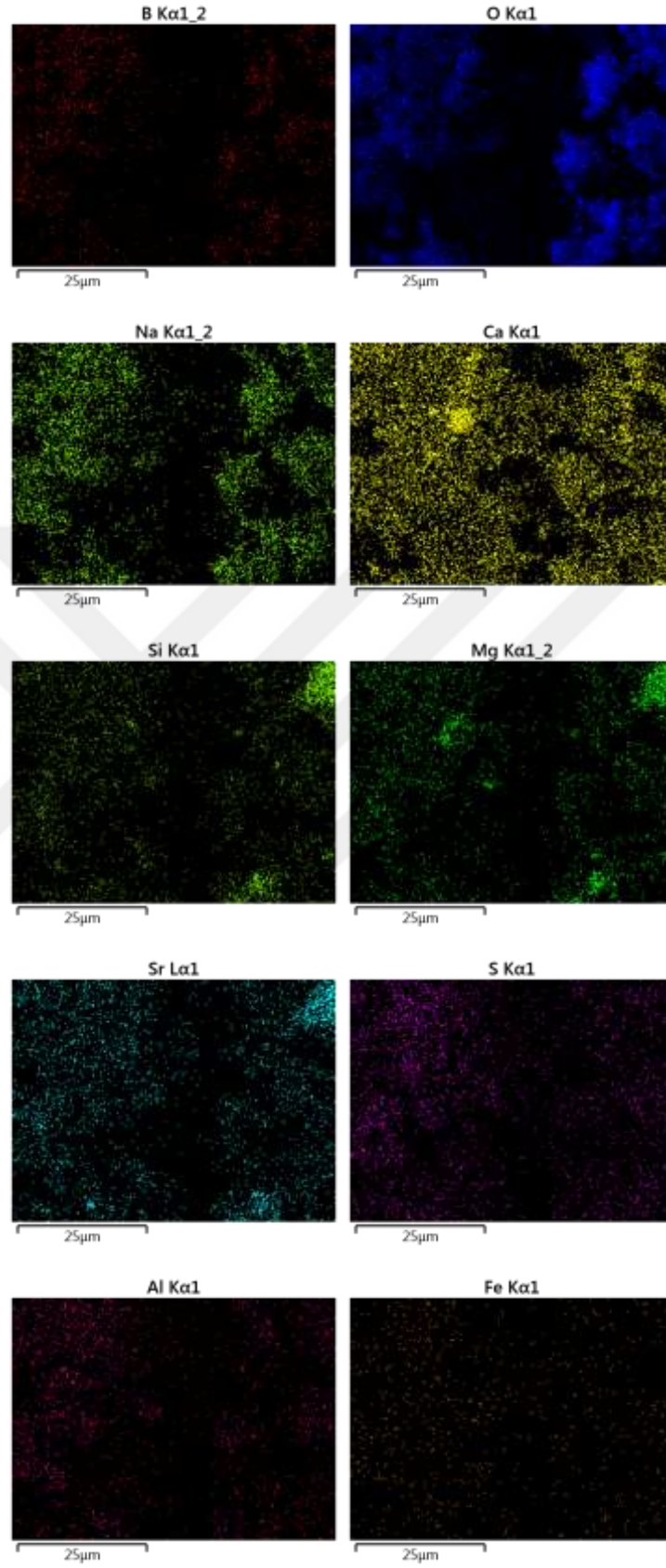
Şekil 46(a), çinko borat tozunun EDS haritalama bölgesi görüntüsünü vermektedir. Bu görüntüden, elementlerin homojen dağılımlı olduğu saptanmıştır. ZnB tozunun ağırlıkça yüzde spektrumunu ve atomik yüzde spektrumunu Şekil 46(b)'de gösterilmiştir. ZnB tozunda O, Zn ve B elementlerinin toplam ağırlık yüzdesi %100.0 olarak ölçülmüştür. Başka bir deyişle, bu veri ZnB tozunun $2\text{ZnO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 3.5\text{H}_2\text{O}$ olan kimyasal bileşenlerini işaret etmektedir ve dahası safsızlık içermediğini ifade etmektedir. Bu sonuçlar ile Tablo 10'deki saf oksitli bileşen analizi sonuçları oldukça iyi örtüşmektedir.

Şekil 46(c), ZnB tozunun atomik yüzde spektrumunu sunmaktadır. Oksijen haricinde bor elementinin en yüksek değerde dedekte edilmesi, Tablo 11'deki en yüksek değere sahip B_2O_3 ile benzer bir durum sergilemiştir. İlaveten, çinko elementi baz alınarak ampirik formül $\text{Zn}_{2.0}\text{B}_{7.7}\text{O}_{15.3}\text{H}_x$ olarak türetilmiştir. Hidrojenin hariç tutulduğu dikkate alınırsa ampirik formülün, $\text{Zn}_2\text{B}_6\text{O}_{14.5}\text{H}_7$ olan teorik değere kabaca yakın olduğu söylenebilir.

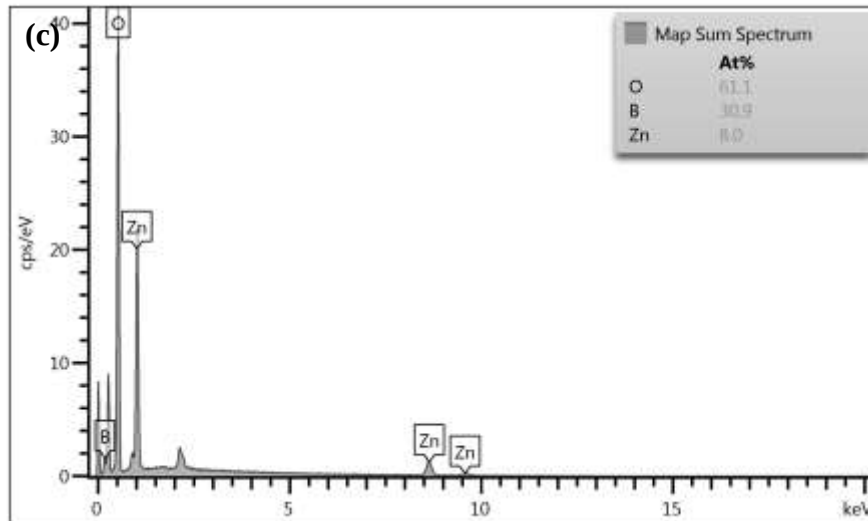
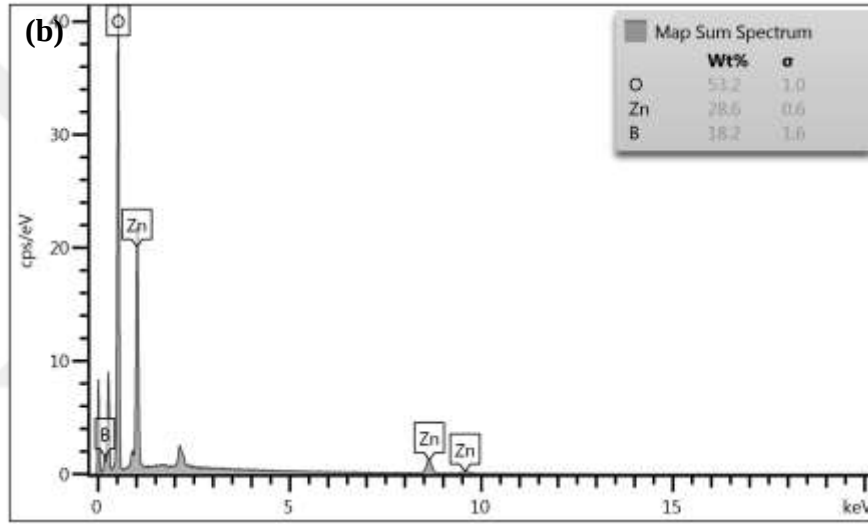
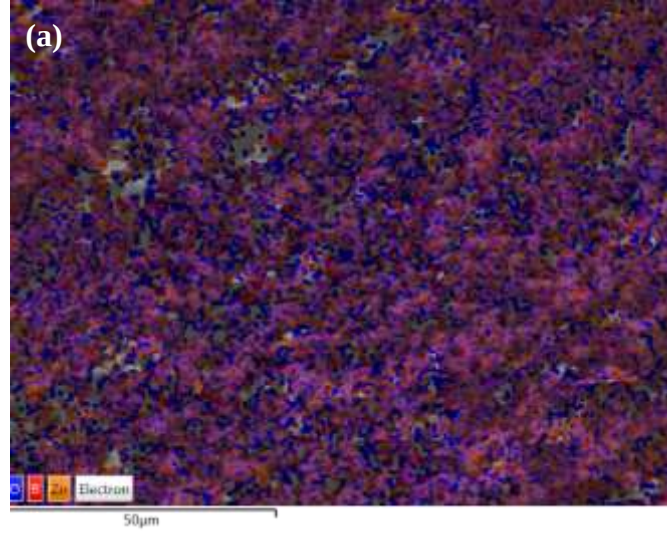
Şekil 47, ZnB tozuna ait elementel haritalama görüntüsünü vermektedir. Bu görüntüye göre, elementlerin iyi düzeyde homojen dağılımlı olduğu gözlemlenmiştir.



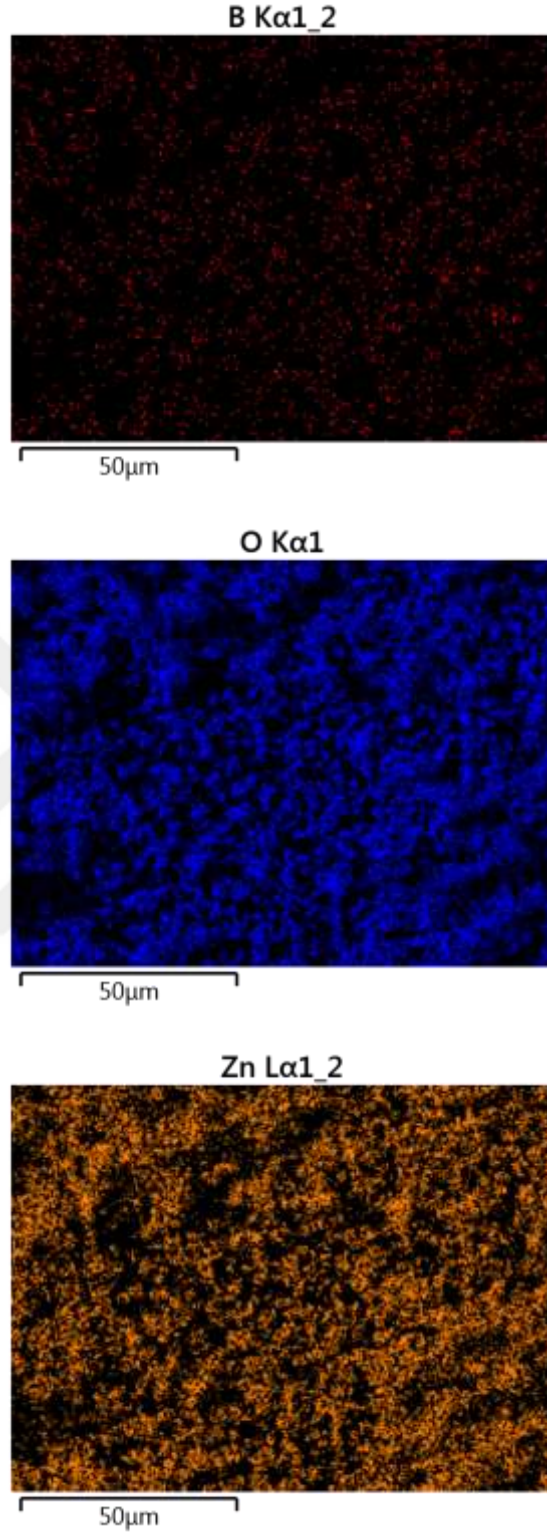
Şekil 44. Öğütülmüş üleksit mineralinin (a) EDS haritalama bölgesi (b) ağırlıkça yüzde spektrumu ve (c) atomik yüzde spektrumu



Şekil 45. Öğütülmüş üleksit mineralinin elementel haritalama görüntüsü



Şekil 46. Çinko boratın (a) EDS haritalama bölgesi (b) ağırlıkça yüzde spektrumu ve (c) atomik yüzde spektrumu



Şekil 47. Çinko boratın elementel haritalama görüntüsü

3.1.4. XRD Analizi

Şekil 48(a), öğütülmüş üleksit tozunun XRD kırınım desenini göstermektedir. En yüksek şiddetli üç pik sırasıyla $2\theta=7,14^\circ$ için $I=16256$ (cps), $2\theta=11,38^\circ$ için $I=9652$ (cps) ve $2\theta=14,74^\circ$ için $I=8822$ (cps)'dir ve bu pikler PDF kart no. 01-083-1664 olan üleksit minerali dosyasındaki (010), (-110) ve (-101) düzlemleri ile çok iyi örtüşmektedir. Bu bulguya göre majör fazın üleksit minerali olduğu aşikârdır.

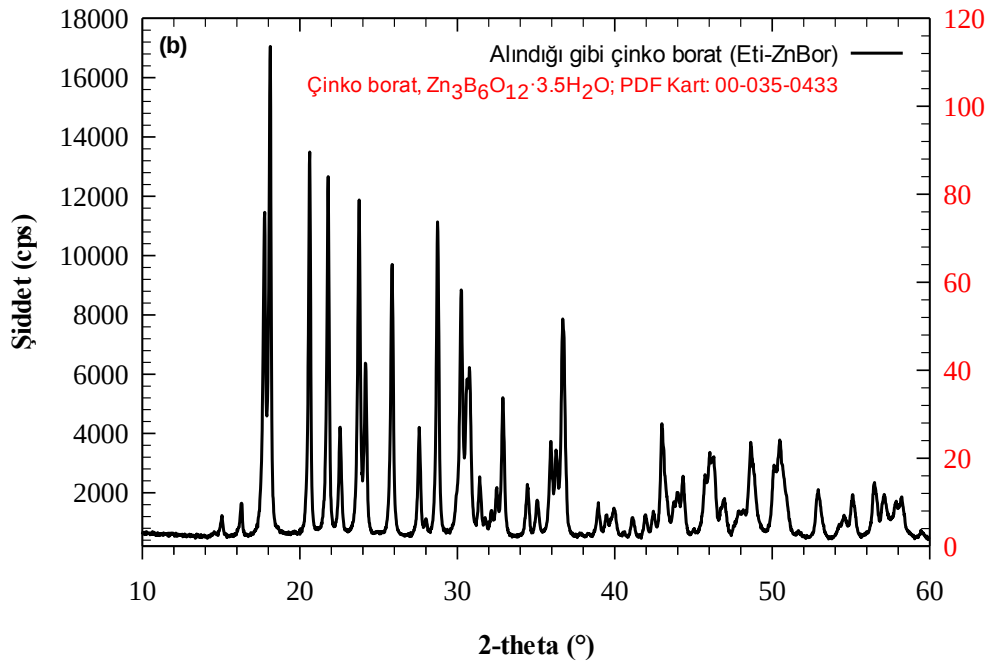
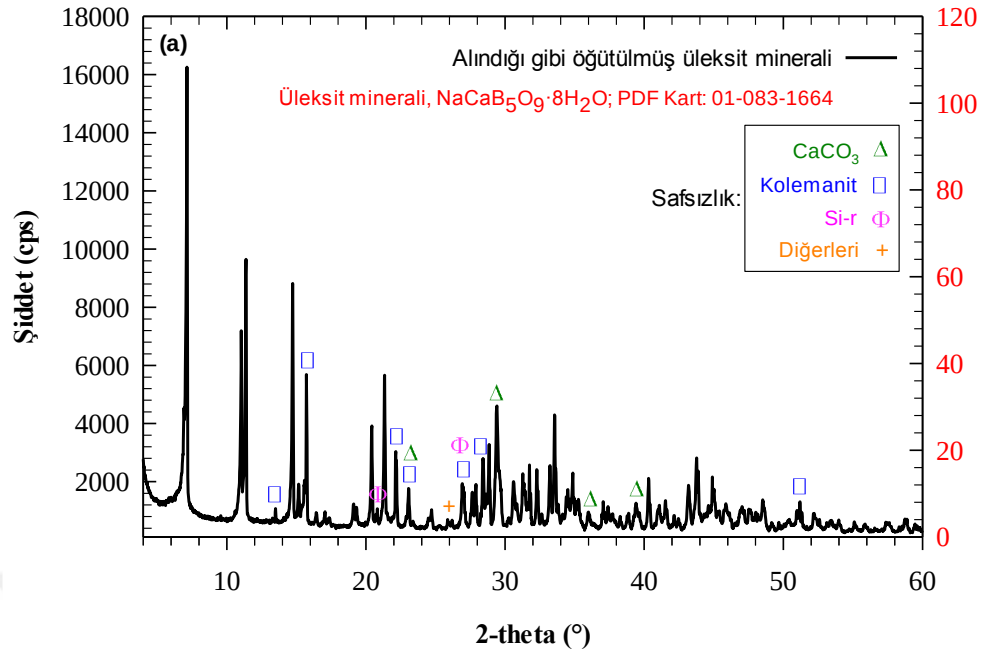
Saf üleksit mineralinin haricinde kolemanit, kalsit, silikat zengini ve diğer safsızlık minerallerinin varlığı saptanmıştır. $2\theta=15,72^\circ$ için $I=5687$ (cps) sahip pik, PDF card no. 01-074-2338 olan kolemanit minerali dosyasındaki (020) düzlemi ile kesişmektedir. Ayrıca, $2\theta=29,42^\circ$ için $I=4605$ (cps) sahip pik, PDF kart no. 01-085-0849 olan CaCO_3 (calcite) dosyasındaki karakteristik (104) düzlemi ile çakışmaktadır. $2\theta=26,92^\circ$ için $I=1935$ (cps) sahip pik, PDF card no. 01-078-1252 olan SiO_2 (quartz) minerali dosyasındaki $2\theta=26,62^\circ$ için (011) düzlemi ile tam olarak çakışmamaktadır. Literatürdeki yapılan çalışmalarda $26,9^\circ$ 'de zeolit minerali (Mg, Ca, Na vb. içeriğe sahip alümina silikat) gibi (AL-JUBOURİ, 2020) Si zengini fazlara rastlanmaktadır. Bu çalışmadaki minör Si zengini faz, hem tedarikçi firma tarafından sağlanan Tablo 2'deki SiO_2 , MgO ve Al_2O_3 bileşenlerini hem de Şekil 44(b)'deki EDS ölçümde tespit edilen Si, Mg ve Al bileşenlerini doğrulamaktadır. Daha önce yapılan çalışmalar incelendiğinde üleksit mineralinin XRD kırınım deseninde farklılıklar mevcuttur (T. Kutuk-Sert vd, Haziran 2017), (Çiftçi, 2012). Kısacası netleştirmek gerekirse, bu durum ham üleksit minerali %100 saf olmadığından dolayı içerdiği safsızlık minerallerinden kaynaklanmaktadır.

XRD cihazında yapılan ÖÜ tozuna ait mineral kompozisyonunun ağırlıkça %86 üleksit, %8,4 kalsit, %4,8 kolemanit, %0,4 dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) ve %0,3 silikat zengini mineral içerdiği (Toplam %99,9) bulunmuştur. XRD analizinde saf üleksit mineralinin ağırlıkça %86 çıkması, oksitli bileşen analizinde hesaplanan %86 değerini teyit etmektedir.

Şekil 48 (b), çinko borat tozunun XRD kırınım desenini sunmaktadır. En yüksek şiddetli üç pik art arda $2\theta=18,12^\circ$ için $I=17051$ (cps), $2\theta=20,62^\circ$ için $I=13493$ (cps) ve $2\theta=21,80^\circ$ için $I=12665$ (cps)'dir ve üstelik bu pikler PDF kart no. 00-035-0433 olan çinko oksit borat hidrat dosyasındaki (020), (101) ve (120) düzlemleri ile oldukça iyi örtüşmektedir.

Safsızlık piklerin varlığına rastlanmamıştır, bu yüzden ZnB tozunun tamamen saf olduğu anlaşılmıştır. Ek olarak, XRD cihazında yapılan mineral kompozisyonunun ağırlıkça %100 ZnB'ye ait olduğu tespit edilmiştir. Buradan bulunan sonuçlar, Tablo 11'de verilen oksitli bileşen analizi ve Şekil 46(b)'de gösterilen EDS analizi sonuçlarını destekler niteliktedir.





Şekil 48. (a) Öğütülmüş üleksitin ve (b) çinko boratın XRD kırınım desenleri

3.2. Asfalt Karışımların Karakterizasyonu

3.2.1. Su Hasarı ve Çatlama Analizleri

Su hasarı ve çatlama deney sonuçları Tablo 12’de verilmiştir. Şekil 49, 50 ve 51 incelendiğinde kontrol numuneleri, ZnB+ÖÜ katkılı numuneler ve yalnız ÖÜ katkılı numunelerde beklendiği üzere koşullandırma işlemi sonrası performansın azaldığı görülmektedir.

Şekil 52 incelendiğinde tüm grupların koşulsuz durum performanslarının karşılaştırılması yapılmış olup en iyi performansı ZnB+ÖÜ katkılı grubun gösterdiği ve sırasıyla ÖÜ ve K numune gruplarının takip ettiği tespit edilmektedir. Bu durumda performans arttırıcısı olarak kullandığımız ZnB ilavesinin olumlu sonuçlar verdiğini ve performansı arttırdığı sonucuna varılmaktadır.

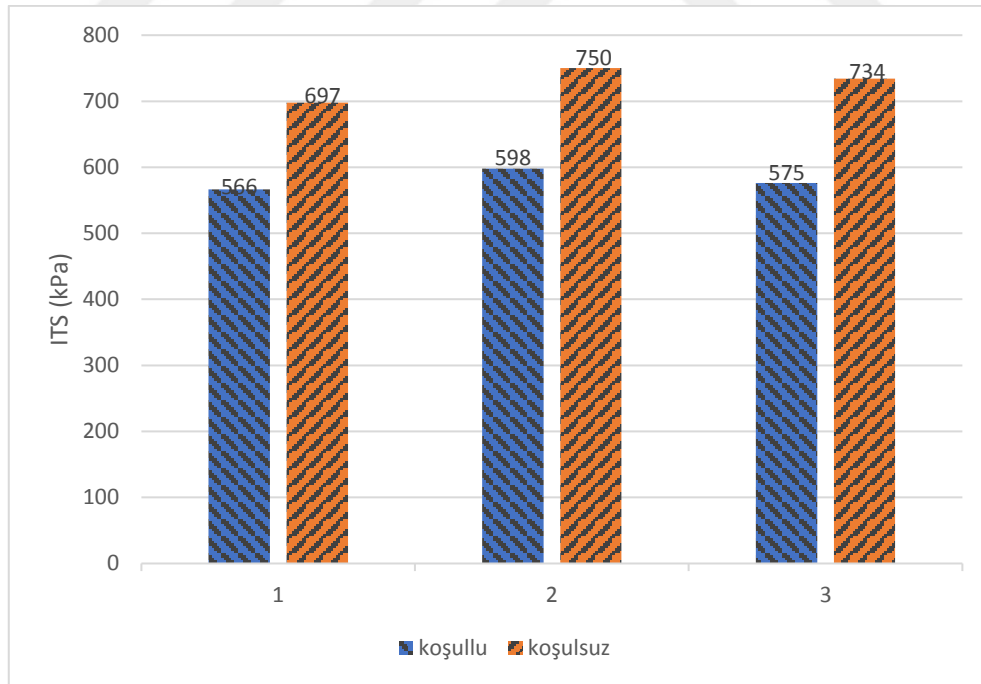
Şekil 53 incelendiğinde tüm grupların koşullu durum performanslarının karşılaştırılması yapılmış olup ZnB+ÖÜ ve ÖÜ katkılı numunelerin yakın değerler gösterdiği, K numunelerine kıyasla performanslarının daha iyi olduğu tespit edilmektedir.

Şekil 54 ve 55 incelendiğinde tüm grupların koşullu ve koşulsuz ortalamalarının karşılaştırılması yapılmış olup koşullu durumda ZnB+ÖÜ ve ÖÜ katkılı numunelerin yakın değer izlemesine rağmen koşulsuz durumda ZnB+ÖÜ katkılı numunelerin daha iyi performans gösterdiği bu sebeple en iyi sonuçların ZnB+ÖÜ katkılı numunelerde gözlendiği dolayısıyla ZnB+ÖÜ ilaveli kullanımın yalnızca ÖÜ kullanımına göre performansa daha fazla katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Bu durumun ayrıca asfaltın yaşlanmasını geciktirdiği yönünde açıklanabilir. (Aksoy, 2002)

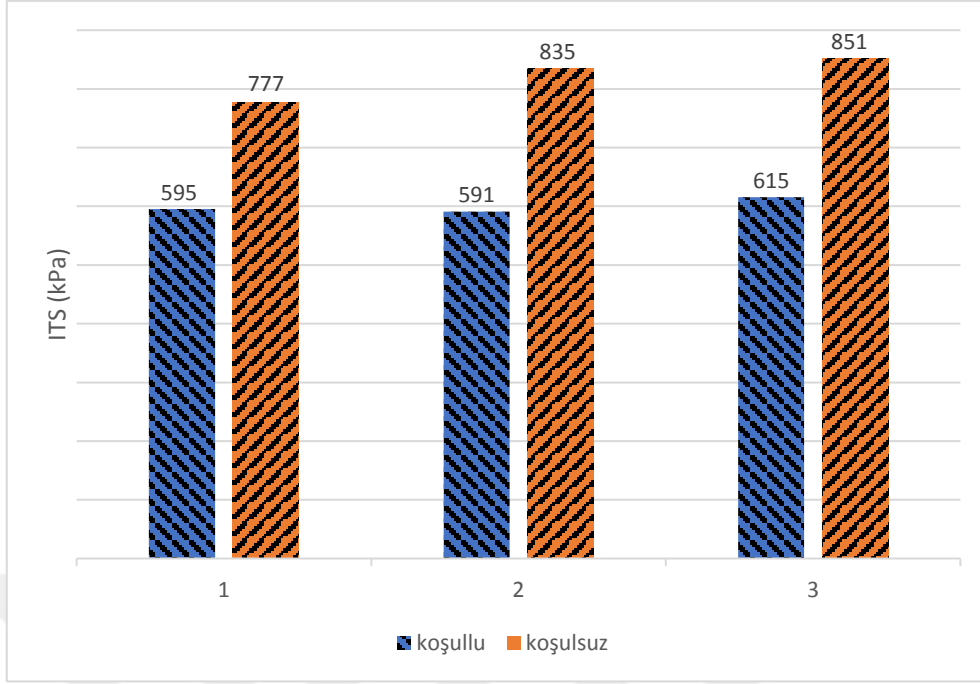
Bardakçı (2011) bor minerallerinin hidrofobik özellikleri üzerine bir çalışma yapmıştır. Sonuçta bor minerallerinin su itici davranış sergilediklerinden bahsetmiştir. Zheng ve arkadaşları (2009) polimerlerde oluşan mikro çatlak yüzeylere ZnB eklemiş ve sonuçta polimer içindeki çatlakların giderildiği, adezyonda iyileşmeler olduğu belirtilmiştir. Bu iyileşmelerin sebebi, ZnB’nin hidrofobik özelliğine atfedilmiştir. Bu çalışmada su hasarı deneyinde koşullu durumdaki ZnB+ÖÜ ve ÖÜ katkılı numunelerin K numunelerinden daha iyi sonuçlar vermesinin nedeni, hidrofobik özellik nedeniyle suyun itildiği ve numune içinde barındırılmadığı düşünülmektedir.

Tablo 11. Tüm gruplar için kPa değerleri

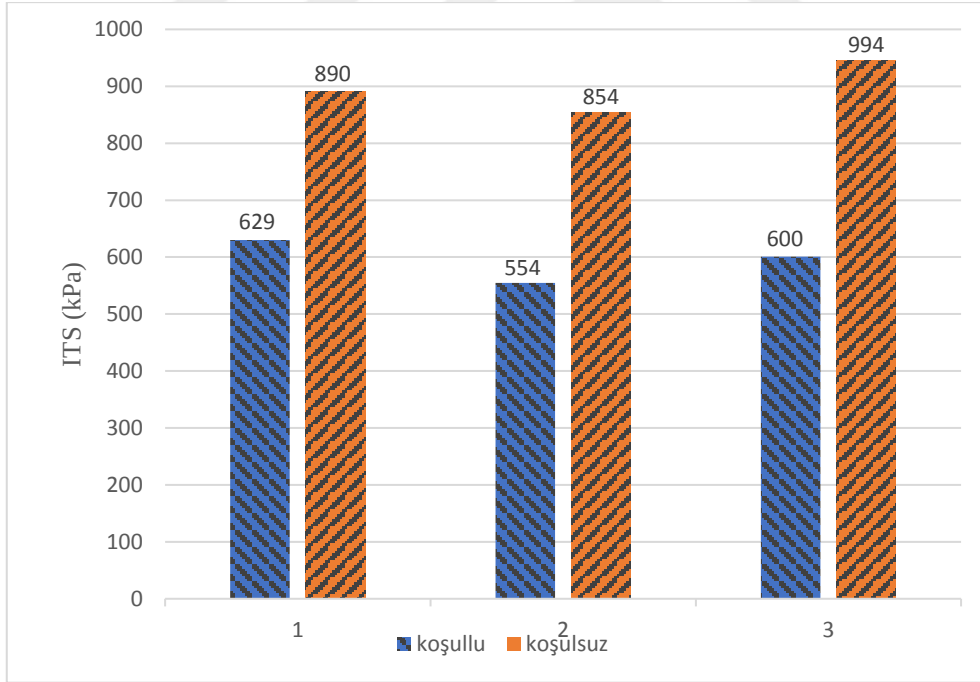
	SU HASARI (kPa)						ÇATLAMA (kPa)		
	Koşulsuz			Koşullu			Koşullu		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
KARIŞIK (ZnB+ÖÜ)	890	854	944	629	554	600	1987	1194	1614
ÜLEKSİT (ÖÜ)	777	835	851	595	591	615	1726	1375	2010
KONTROL (K)	697	750	734	566	598	575	1648	1539	1496



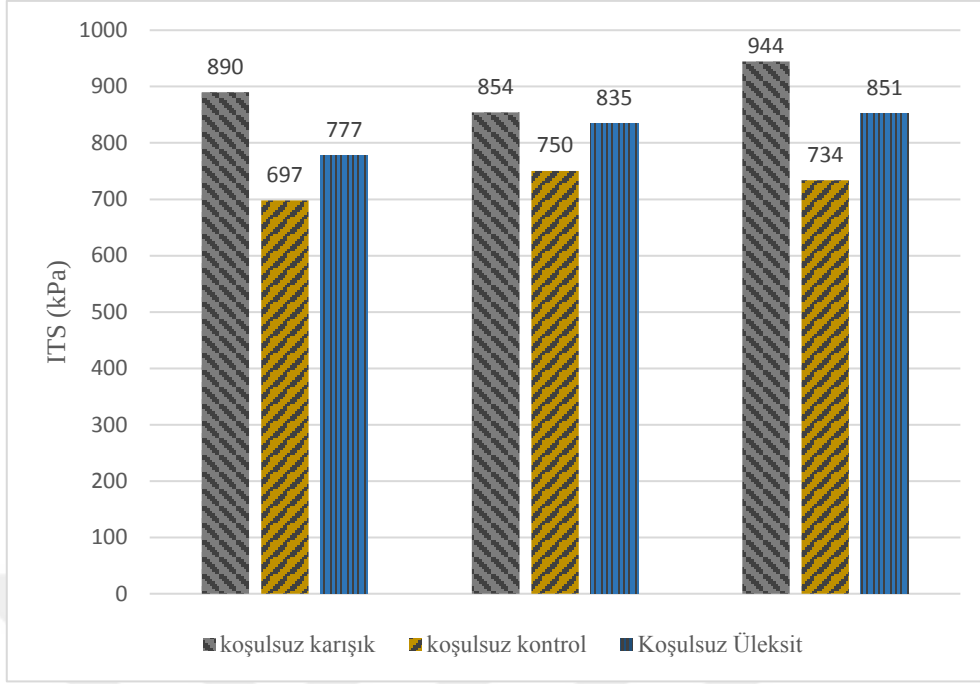
Şekil 49. Su hasarı kontrol numuneleri kıyası



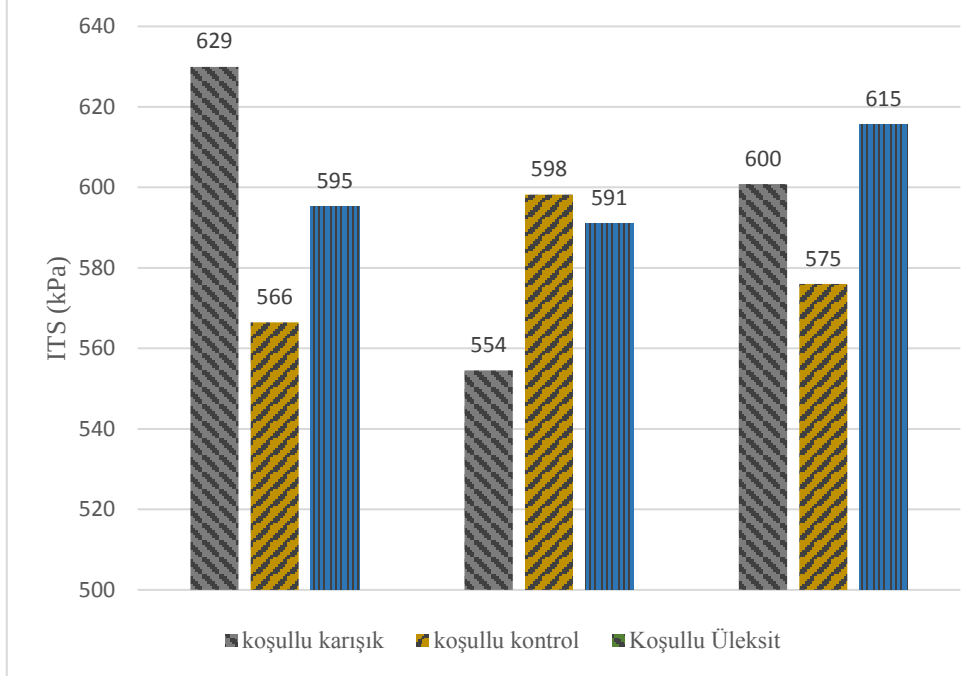
Şekil 50. Su hasarı sadece üleksit katkılı numunelerin kıyası



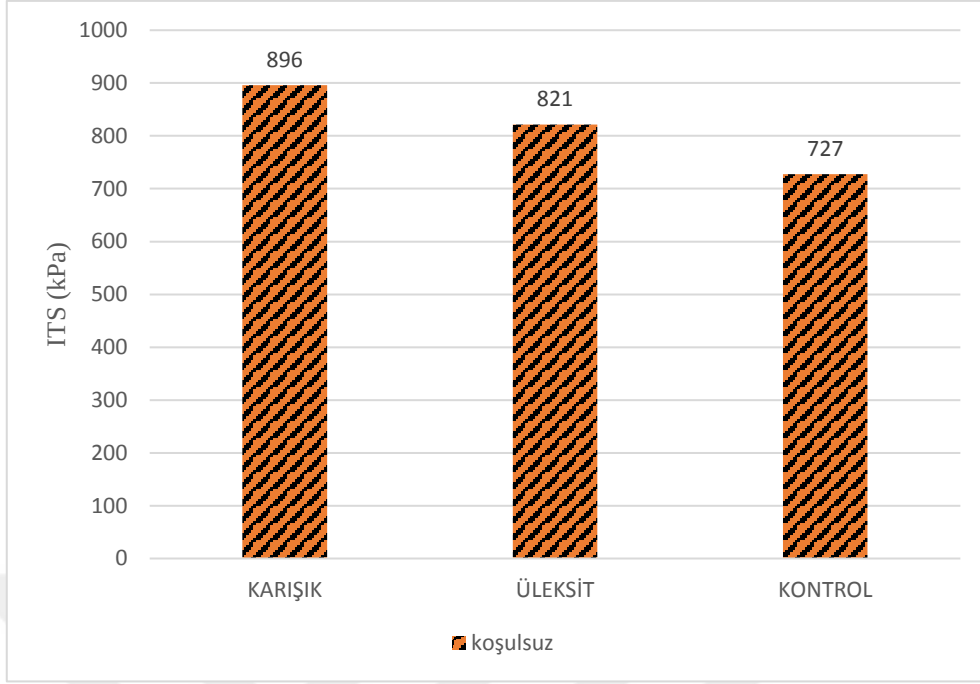
Şekil 51. Su hasarı üleksit ve çinko borat katkılı numunelerin kıyası



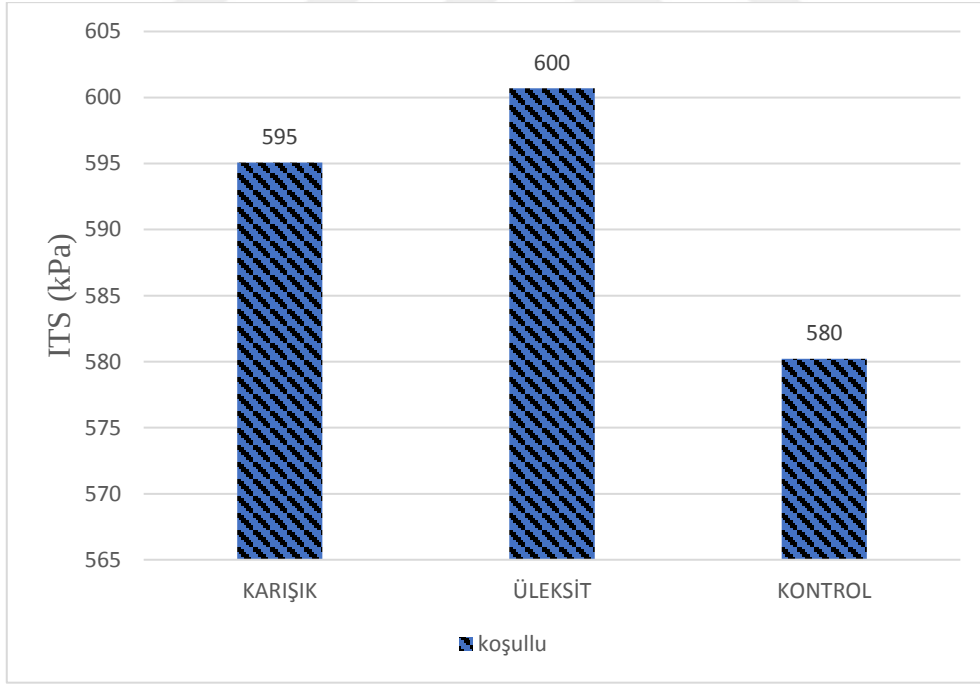
Şekil 52. Koşulsuz tüm gruplar için numunelerin ITS değerleri kıyası



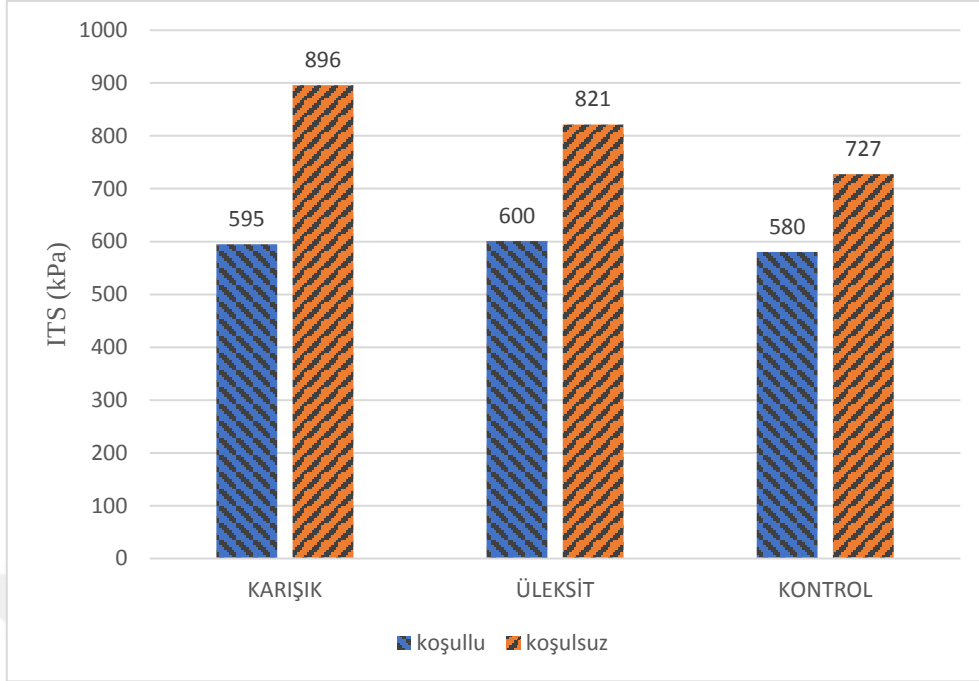
Şekil 53. Koşullu tüm gruplar için numunelerin ITS değerleri kıyası



Şekil 54. Koşulsuz tüm gruplar için ort. ITS değerleri kıyası



Şekil 55. Koşullu tüm gruplar için ort. ITS değerleri kıyası

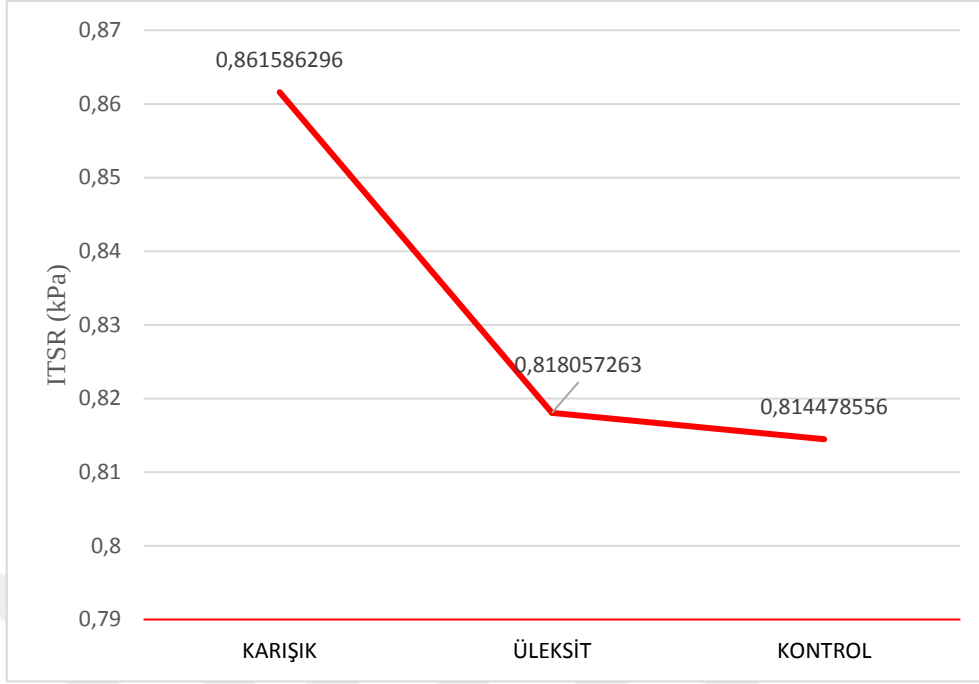


Şekil 56. Koşullu-koşulsuz tüm gruplar için ort. ITS değerleri kıyası

Nem duyarlılığı ölçüsü olan indirekt çekme mukavemeti oranları (ITSR) değerleri, koşulsuz indirekt çekme mukavemet değerlerinin koşullu indirekt çekme mukavemet değerlerine oranlanması ile bulunur. (AASHTO, 2016)

Şekil 57’ de tüm grupların ITSR değerleri karşılaştırılması verilmektedir. Şekil 57 incelendiğinde tüm gruplar için ITSR değerlerinin %.80’in üzerinde olduğu gözlemlenmektedir. Bu durumda sonuçların şartname sınırları ile uyum içinde olduğu ve deneylerin istenilen hassasiyeti sağladığı gözlenmiştir.

Ayrıca ZnB+ÖÜ ilaveli karışımda ITSR değerinin en yüksek olduğunu gözlemlenmektedir. Bu durum koşulsuz ve koşullu numunelerde değişim oranının en az olması sebebiyle oluşmaktadır. ITSR değerleri, açık hava koşullarından en az etkilenenin çinko borat ilaveli karışım olduğunu göstermektedir. Bu durumda numunenin yağış oranı yüksek bölgelerde kullanımının asfalt ömründe iyileştirmeler söylenebilmektedir.

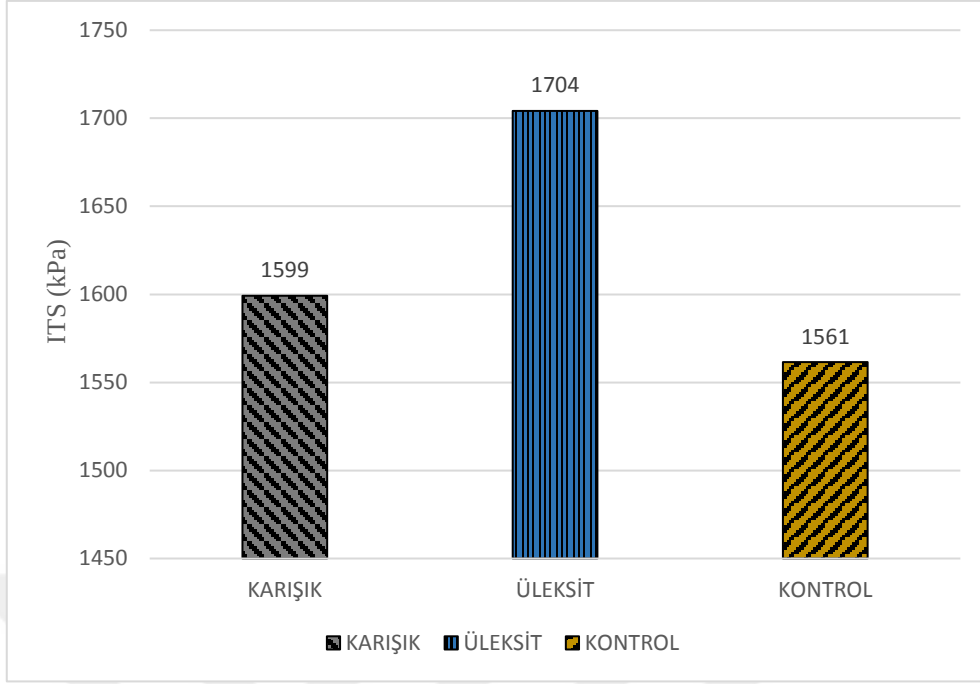


Şekil 57. Tüm gruplar ITRS değerleri grafiği

3.2.2. Çatlama Analizi

Şekil 58 incelendiğinde tüm grupların ortalama çatlama deney analizleri karşılaştırılması yapılmış olup ÖÜ katkılı numunelerin daha iyi performans gösterdiği gözlemlenmiştir. Performans değerini sırasıyla ZnB+ÖÜ katkılı ve K numuneleri takip etmektedir. ZnB+ÖÜ katkılı numuneler tek aşına ÖÜ katılı numuneler kadar performans değeri gösterememiştir. Ayrıca çinko borat katkılı karışımın kontrol numunelerine kıyasla daha iyi performans değerleri verdiği ve su hasarı deneylerindeki performans iyileştirmesi de dikkate alınırsa kaplamaya çinko borat katkısının yapılması hiç katkı bulunmayan duruma göre çok daha fazla performans elde edilmesini sağlamıştır.

Yang Xiaolong ve arkadaşları (2021) aralarında çinko boratın da bulunduğu farklı katkı malzemeleri ile asfalt malzemesinin yanma mekanizması incelediler. Çalışma sonuçta yangın geciktiricilerin su hasarı direncini arttırabileceğini, düşük sıcaklık performansını iyileştirebileceğini ve asfalt çatlamasını etkili bir şekilde önleyebileceğini söyleyerek yeni deney ve araştırmalarla desteklenmesini belirtmişlerdir. Bu çalışmada bulunan su hasarı ve çatlama analizleri sonuçları ile uyum içersindedir.



Şekil 58. Çatlama deneyi tüm gruplar için ort. ITS değerleri kıyası

3.2.3. Marshall Stabilite Deneyi Sonuçları

Marshall stabilite deney sonuçları Tablo 13’de verilmiştir. Grafikler incelendiğinde çinko borat ilaveli karışımın en yüksek değeri verdiğini gözlemlenmiştir. Bu değer sadece ÖÜ ve kontrol numunelerinin çok üzerinde çıkmıştır. ZnB ilavesinin karışım performansını ne kadar önemli derecede etkilediği bu sonuçlarda gözlemlenmiştir.

Şekil 59, 61 ve 66 incelendiğinde ÖÜ ilavesi Marshall stabilite sonuçlarında, su hasarı ve çatlama deneylerinde olduğu gibi performansı istenilen ölçüde etkilememiştir. Sonuç değerler kontrol numunelerinininkinden daha düşük çıkmıştır. Bu durumun oluşmasına sebep olarak üleksit içerisindeki kristalize suyun 180 °C’de (Künkül, 1997) belli bir mol değerinde buharlaşmış olması tahmin edilmektedir. Buna karşın Şekil 43’de verilen SEM görüntüsünde tespit edildiği üzere, çinko borat partiküllerinin üleksit partiküllerinden daha homojen ve daha küçük olması üleksit mineralinden daha iyi bir aderans geliştirmesine neden olduğundan bu durumun Marshall sonuçlarını çinko borat lehine iyileştirdiği düşünülmektedir. Bu durum Li ve arkadaşlarının (2015) yapmış olduğu çalışmadaki sonuçlar ile uyum içindedir.

Kütük-Sert (2020) ılık karışım asfalta bor minerallerinden birisi olan ham üleksit mineralli katkı malzemesi olarak mikron boyutta (+53 μm) ve nano boyutta (-25 μm) kullanılmış ve Marshall deneyleri yapılmıştır. Mikron boyutlu üleksit mineraline sahip karışımların daha iyi Marshall stabilite değerine sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Ancak bu çalışmada kullanmış olduğumuz üleksit minerali -75 μm olup partikül boyutu, kristal yapısı, termal özellikleri farklıdır. Bununla birlikte nano boyutlu üleksit mineraline sahip karışımların referans karışımdan daha yüksek Marshall stabilitesine sahip olduğunu tespit etmişlerdir bu durum bu çalışmadaki çinko boratın daha küçük boyutlu oluşu ile uyum içindedir.

Yu (2009), alev geciktirici içeren modifiye (ZnB, 75 μm elek altı geçen % 89, maksimum partikül boyutu 5 μm maksimum kızdırma kaybı %15,5 ; ATH ve diğerleri) karışımların Marshall stabilite değerlerini incelemiştir. Alev geciktirici modifiyeye sahip karışımlar en iyi Marshall değerine sahip olduğunu bulmuştur. Bu çalışmadaki Marshall stabilite için en iyi değer ZnB mineraline sahip karışımda elde edilmesi ile oldukça iyi örtüşmektedir.

Şekil 59, 61, 63 ve 64 incelendiğinde akma değerlerini incelediğimizde yine sonuçlar Stabilite sonuçlarıyla örtüşmektedir, yani en stabil, akması en düşük olan grup ZnB ilaveli olan grup çıkmıştır. En çok akma değeri ise Marshall stabilitesi en düşük olan sadece üleksit ilaveli numunelerde gerçekleşmiştir.

Tablo 13 ve tablo 14 incelendiğinde, Va değerlerinin Kontrol, ZnB+ÖÜ katkılı ve ÖÜ katkılı yaklaşık sonuçlar verdiği görülmüştür. VMA değerinde en yüksek sonuç kontrol numunesine iken sırasıyla ZnB+ÖÜ katkılı ve ÖÜ katkılı numuneler takip etmekte ve değerler şartname sınırları içerisinde. VFA değerlerinin kontrolünde en yüksek sonuç kontrol numunesinde iken sırasıyla ZnB+ÖÜ katkılı ve ÖÜ katkılı numuneler takip etmiştir. Ayrıca, şartname sınırlarına bakıldığında kontrol numunesi şartname sınırları içerisinde iken ZnB+ÖÜ katkılı ve ÖÜ katkılı numuneler küçük bir oranla şartname alt sınırının altında kalmaktadır. Ayrıca Karayolları Teknik şartnamesi(KGM), sınırları asgari Marshall stabilite değerinin 900 kg (8,83 kN) olması gerektiğini belirtmektedir. Oluşturulan tüm numuneler bu sınır üzerindedir.

Tablo 12. Marshall stabilite deneyi sonuçları

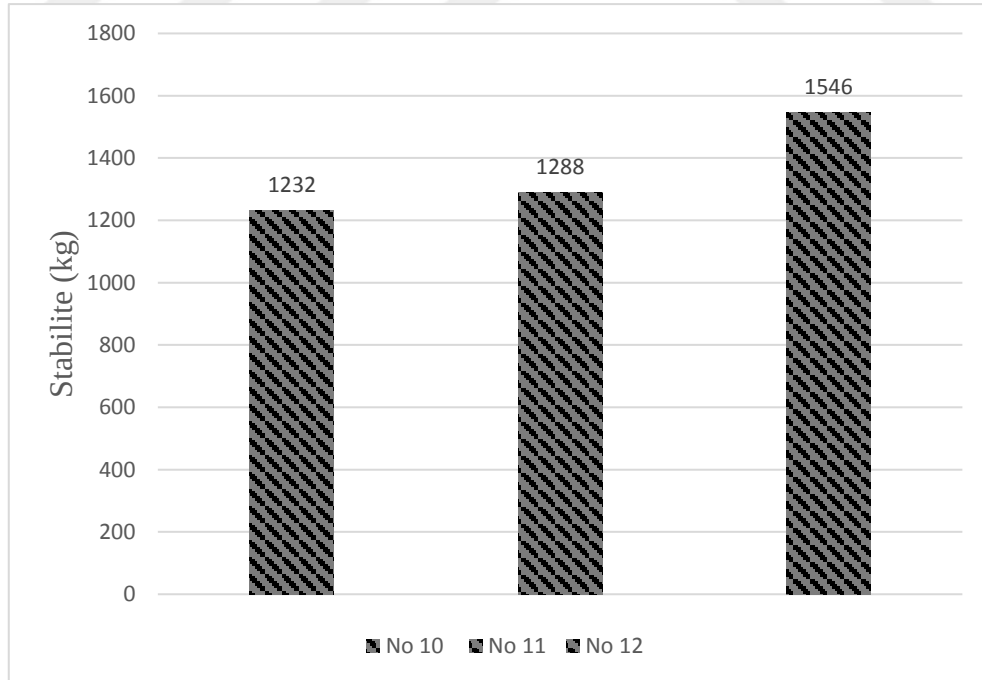
Marshall Stabilite Deney Sonuçları			
	No	STABİLİTE (kg)	AKMA(mm)
KONTROL	K10	1429	5,81
	K11	1335	3,83
	K12	1357	3,74
ÖÜ	D10	1271	2,92
	D11	1357	7,77
	D12	1288	4,45
ZnB+ÖÜ	F10	1234	2,7
	F11	1349	3,91
	F12	1607	3,51

Tablo 13. Marshall stabilite deneyi

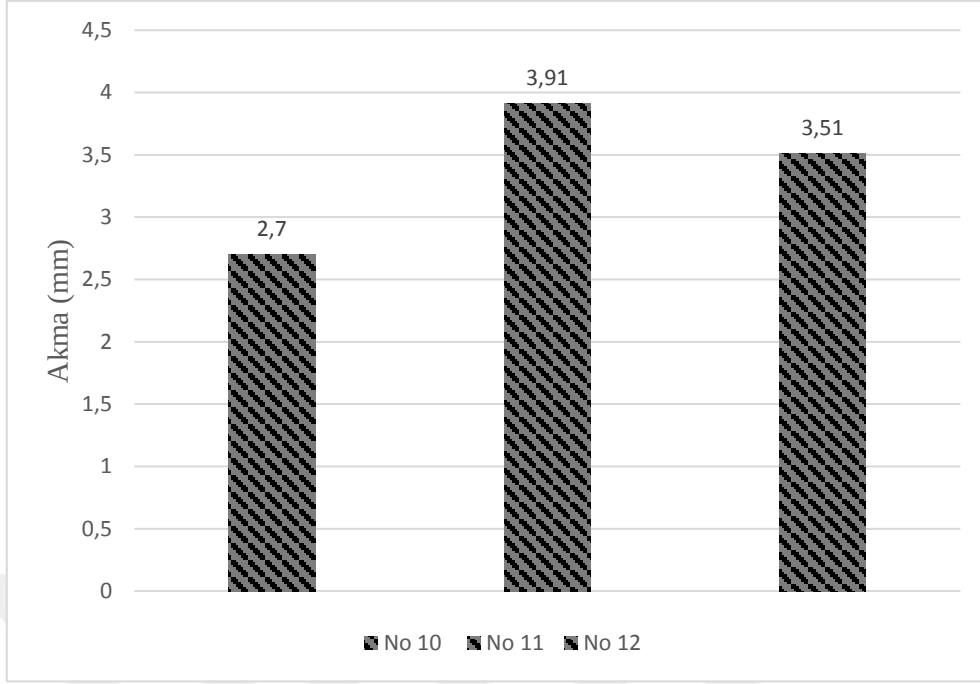
BRIKET NO:	BİTÜM	HAYADAKI										DÜZELTME				DÜZELTİL.
		YÜKSEKLİK (mm)	AGIRLIK(gr)	SUDAKI	DOY.YÜZL.	HACİM	HAC.ÖZG.	BOŞLUK	VNA	ASF.DOLU	AKMA	STABİLİTE	(kg)	FAKTÖRÜ	STABİLİTE	
	Wt(%)		(gr)		AGIRLIK(gr)	(cm ³)		%	%	VTA						
K10	4.1	47.15	1197.4	797	1198.9	491.90	2.434				5.51	1821	1.882			1429
K11	4.1	47.15	1198.5	795	1199.8	494.80	2.422	4.9	14.032	65.079	3.33	1234	1.882			1335
K12	4.1	47.15	1198.8	792	1200.4	495.40	2.405				3.74	1245	1.890			1357
ORTALAMALAR(kontrol numunesi)																
F10	4.1	47.15	1202.9	745	1203.9	512.9	2.425				3.75	1209	1.921			1234
F11	4.1	47.15	1264.8	743	1264.5	521.5	2.402	4.9	14.012	64.994	3.3	1264	1.867			1349
F12	4.1	47.15	1265.5	741	1267.8	522.8	2.427				3.87	1257	1.859			1307
ORTALAMALAR(kontrol + %4.5 ÖÜ+ %1.5 ZnB)																
D10	4.1	47.15	1257.9	740	1258.2	518.2	2.427				2.92	1181	1.876			1271
D11	4.1	47.15	1259.8	738	1257.9	519.9	2.423	4.908	14.014	64.98	7.7	1261	1.876			1357
D12	4.1	47.15	1259.5	737	1259.5	521.5	2.411				4.45	1190	1.882			1288
ORTALAMALAR(kontrol + %6 ÖÜ)																
							2.420				5.033333					1305

Tablo 14. Modifiye karışımların Va, VMA , VFA , stabilite değerleri

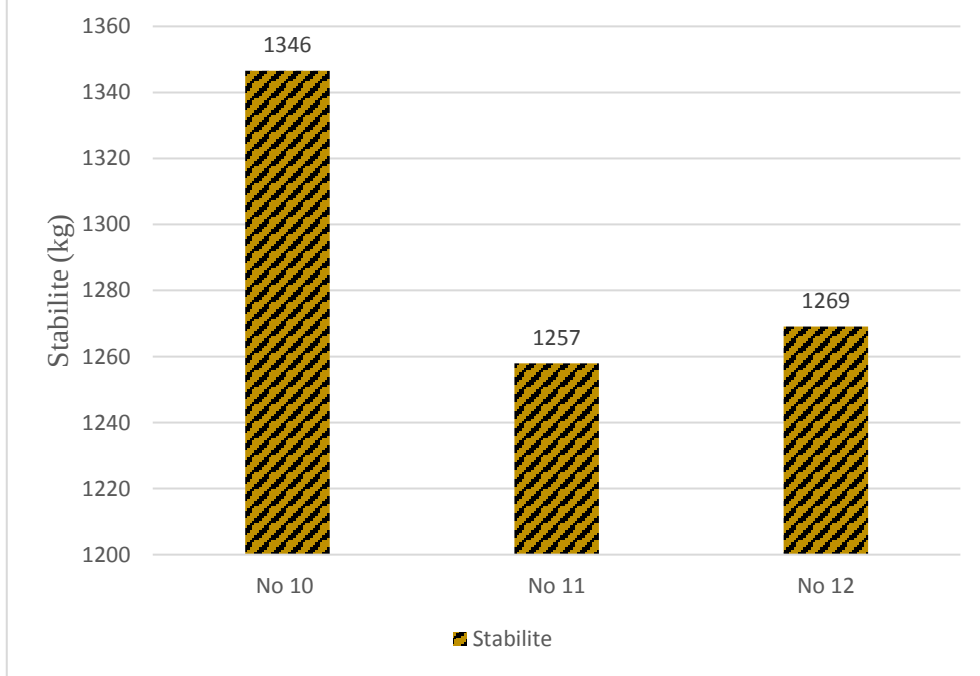
	boşluk	VMA	Asf.dolu	STABİLİTE
BRIKET	%	%	boşluk %	(kg)
	Va		VFA	
KONTROL	4,9	14,032	65,079	1373
ÖÜ+ZnB	4,9	14,012	64,994	1397
ÖÜ	4,908	14,014	64,98	1305



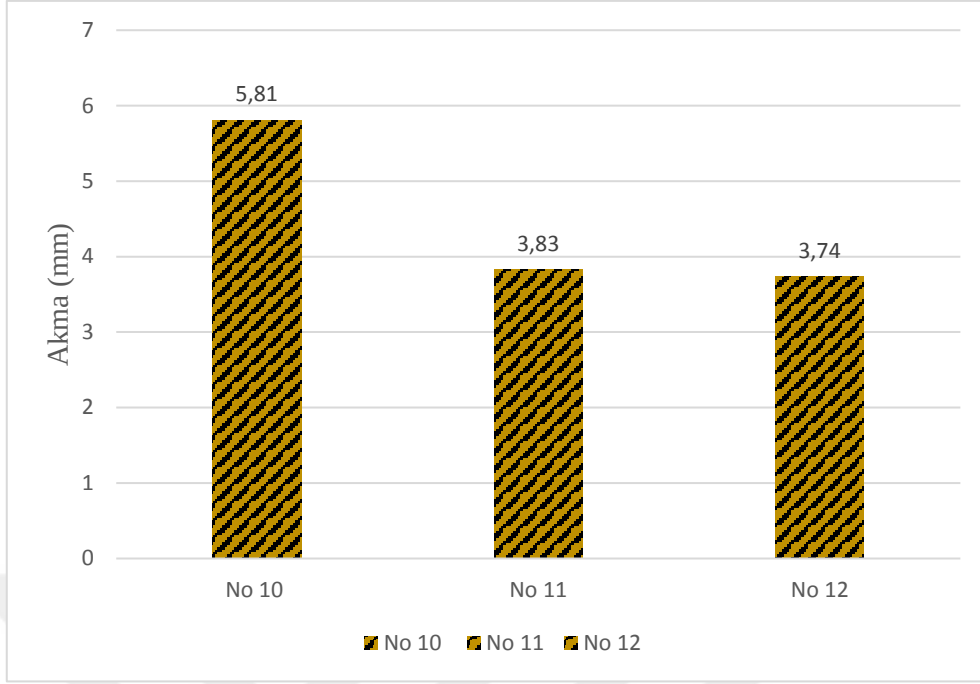
Şekil 59. Üleksit ve çinko borat içeren numunelerin stabilite değerleri



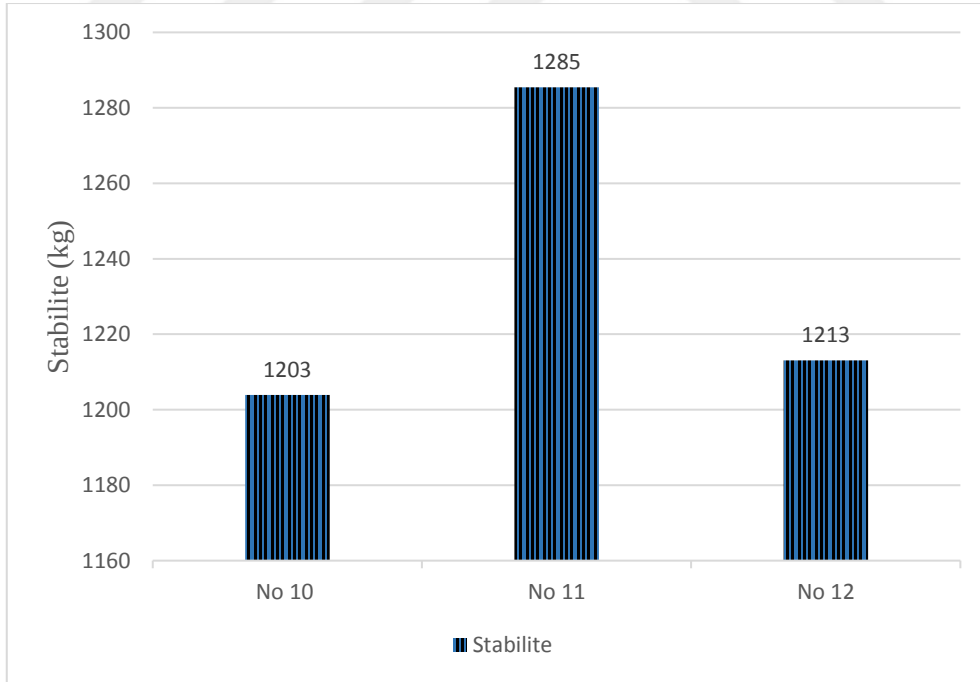
Şekil 60. Üleksit ve çinko borat içeren numunelerin akma değerleri



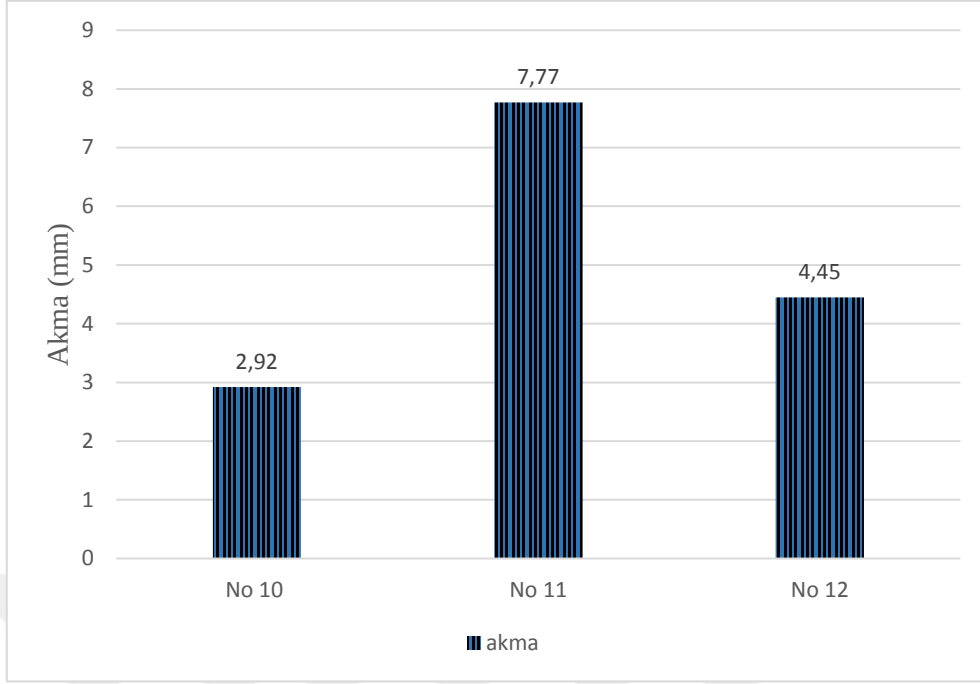
Şekil 61. Kontrol numunelerinin stabilite değerleri



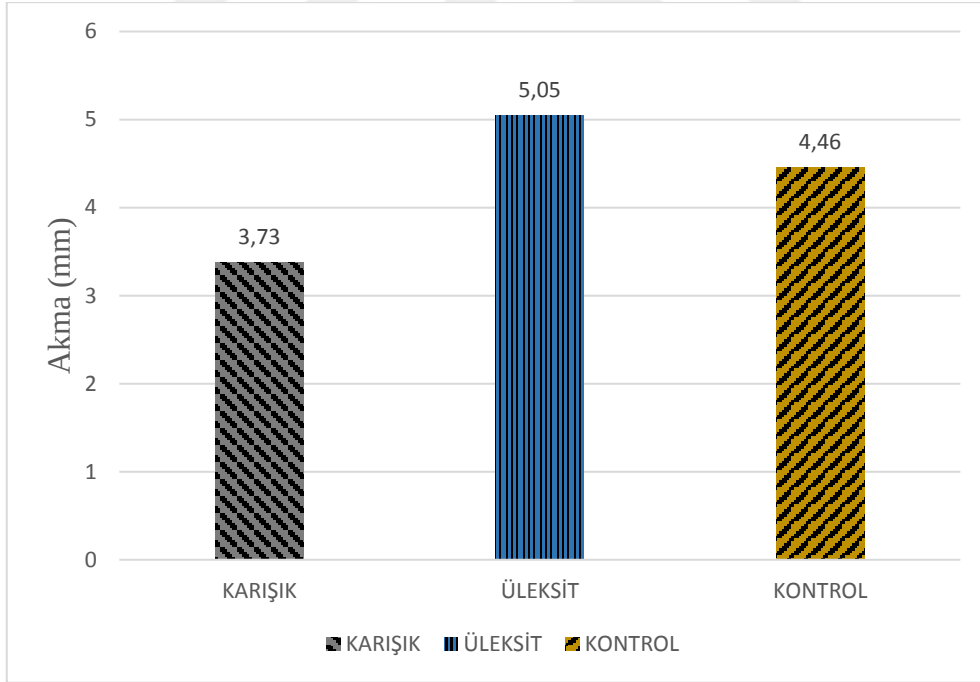
Şekil 62. kontrol numunelerinin akma değerleri



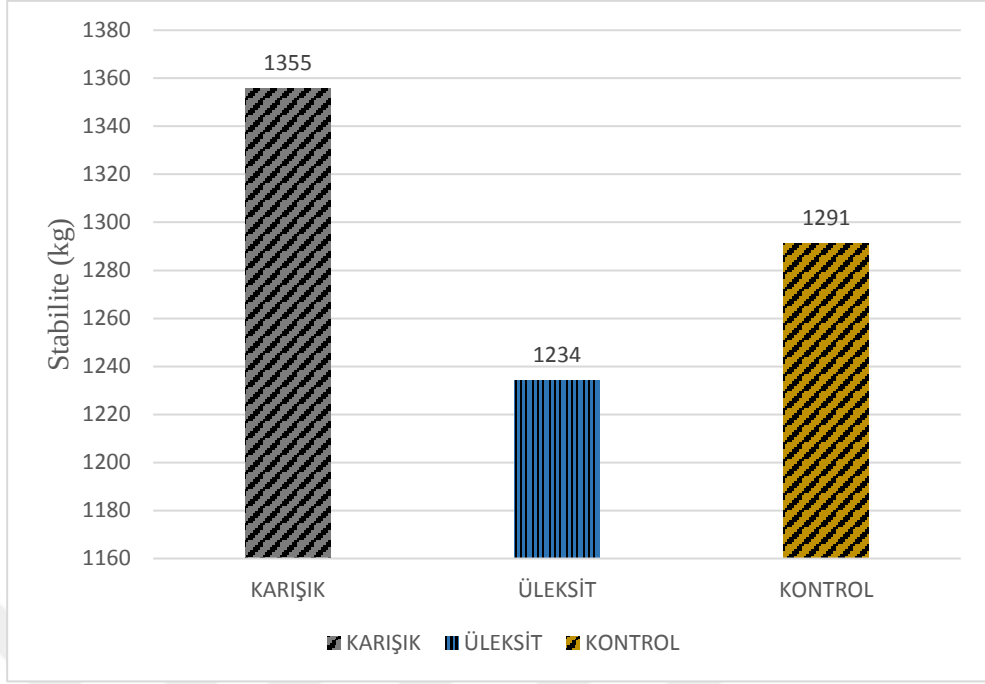
Şekil 63. Üleksit içeren numunelerin stabilite değerleri



Şekil 64. Üleksit içeren numunelerin akma değerleri



Şekil 65. Tüm grupların ort. akma değerleri



Şekil 66. Tüm grupların ort. stabilite değerleri

3.2.4. Sünme analizi

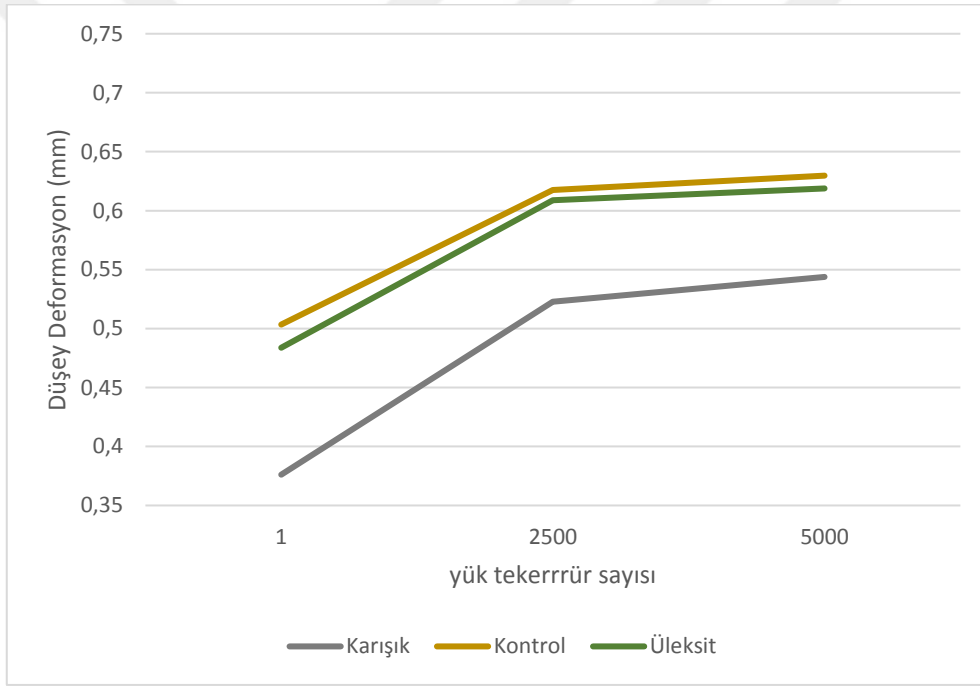
Şekil 64 tüm gruplar için sünme grafiği göstermektedir. En iyi sünme sonucunun çinko borat ilaveli karışımda alındığı gözlemlenmiştir. Sadece üleksit ilavesinin performansı iyileştirdiği; çinko borat içeren karışıma kıyasla daha düşük kontrol numunelerine kıyasla daha yüksek performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Çinko borat ilaveli karışımın tekerlek izi oluşumunu engellemek için kullanılabileceğini gözlemlenmiştir ayrıca üleksit ilavesinin de performansı arttırdığı ve diğer performans etkileri göz önüne alındığında katkı olarak kullanımının faydalı olacağı kanısına varılmıştır.

Kütük ve Kütük-Sert (2020) ılık karışım asfalta (WMA) bor minerallerinden birisi olan ham kolemanit mineralini katkı malzemesi olarak mikron boyutta (+53 μm) ve nano boyutta (-25 μm) kullanmıştır ve sünme davranışını incelemiştir. Tüm kolemanit katkısının performansı iyileştirdiği tespit edilmiştir. Bu çalışmadaki ÖÜ ile çinko boratlı karışımın sünme değeri ile uyumludur. Ayrıca, Kütük ve Kütük-Sert (2020) nano boyutlu kolemanit mineralinin mikron boyuta göre tekrarlı sünme değerlerinin çok daha iyi olduğunu tespit etmiştir. Bu durum, bu çalışmadaki Şekil

42’de SEM mikrografında gözlenen daha küçük boyutlu çinko borat mineraline sahip karışıma ait sünme değerinin daha üstün olmasıyla benzer bir davranış sergilemiştir.

Zhang (2018) 2 μm , 350 nm ve 80 nm olan mikron boyutlu ve nano boyutlu çinko oksit modifikasyonunun asfalt karışımları üzerindeki etkilerini gözlemlemiştir. Tekerlek izi direnci sonuçları karşılaştırıldığında, partikül boyutunun 2 μm 'den 80 nm'ye düşürülmesinin 64 °C'de %22,3'lük bir iyileşme sağladığı tespt edilmiştir. Bu çalışmada SEM analizinde belirlenen ortalama 2 μm partikül boyutu ve 60 °C'deki yaklaşık %19 iyileşme ile oldukça iyi bağdaşmaktadır.



Şekil 67. Tüm gruplar için sünme grafiği

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

4.1. Sonuçlar

Bu çalışmada katkı malzemesi olarak dünyada bol miktarda rezervi bulunan bor minerallerinden çinko borat (ZnB) ve üleksit (ÖÜ) mineralleri kullanılmıştır ve ayrıca oksitli bileşen, SEM, EDS ve XRD analizleri yapılmıştır. ZnB ve ÖÜ mineralleri sıcak karışım asfalta katkılanmıştır ve su hasarı, çatlama, Marshall stabilite ve sünme deneyleri gerçekleştirilmiştir.

Oksitli bileşen analizi ile ÖÜ mineral tozunun saf olmadığı fakat ZnB tozunun saf olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

SEM analizi sonucunda ZnB tozunun ÖÜ tozuna kıyasla partikül boyutunun çok küçük ve homojen dağılımlı olduğu, partikül şeklinin ise daha küresel olduğu tespit edilmiştir.

EDS analizi ile ÖÜ mineral tozunda az da olsa Ca, Si, Mg, Sr safsızlık elementlerine rastlandığı, ZnB tozunda elementlerin iyi düzeyde homojen dağılımlı olup safsızlık içermediği sonuçlarına ulaşılmıştır.

Su hasarı ve analizleri sonucu ÖÜ katkılı karışımların su hasarı direncine karşı olumlu performanslar gösterdiği, ÖÜ'e ZnB ilavesinin performans derecesini artırdığı gözlenmiştir.

ZnB ve ÖÜ katkısı için koşullama yapılan numunelerin kontrol numunelerine göre koşullardan daha az etkilendiği ITSR değerleri ile tespit edilmiştir. Bu sonuca bakarak ÖÜ veya ZnB katkılı numunelerin kaplama tasarımında asfaltın yaşlanmasını geciktireceği ve uzun ömürlü olmasını sağlayabileceği şeklinde yorumlanmıştır. Bu önemli bir araştırma konusu olup üzerinde ayrıca çalışmalar yapılması önerilmektedir.

Çatlama analizine bakıldığında tek başına ÖÜ kullanımının en iyi değeri verdiği fakat ZnB+ÖÜ ile takviye edilen karışımın hiç katkısız numunelere göre daha iyi performans değerleri verdiği görülmüştür.

Marshall stabilite deney sonuçları incelendiğinde, ZnB+ÖÜ katkılı numunelerin katkısız numunelere göre ciddi bir performans fazlası gösterdiğini, ÖÜ katkılı numunelerin ise hem Marshall stabilite değerlerinin hem de akma değerlerinin

kontrol numunelerine kıyasla daha düşük performans değerlerinde kaldığı tespit edilmiştir.

Va değerlerinin kontrol, ZnB+ÖÜ katkı ve ÖÜ katkı yaklaşık sonuçlar verdiği görülmüştür. VMA değerinde en yüksek sonuç kontrol numunesine iken sırasıyla ZnB+ÖÜ katkı ve ÖÜ katkı numuneler takip etmektedir ve değerler şartname sınırları içerisinde. VFA değerlerinin kontrolünde en yüksek sonuç kontrol numunesinde iken sırasıyla ZnB+ÖÜ katkı ve ÖÜ katkı numuneler takip etmiştir, şartname sınırlarına bakıldığında kontrol numunesi şartname sınırları içerisinde olmasına karşın ZnB+ÖÜ katkı ve ÖÜ katkı numuneler küçük bir oranla şartname alt sınırının altında kalmıştır.

Tekrarlı sünme deneyi irdelendiğinde, ZnB+ÖÜ katkı numunelerin tekerlek izi oluşumuna karşı maksimum direnç oluşturduğu ve kontrol numuneleri baz alındığında çok iyi performans değerleri verdiği bulunmuştur. ÖÜ katkı numuneler için bakıldığında ise yine performans iyileşmelerinin olduğu, ancak kontrol numunelerine yakın sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Sonuç olarak, ÖÜ katkısına ZnB ilavesi performansı artırmıştır.

4.2. Öneriler

Yapılacak yeni çalışmalarda yeni bir gradasyon eğrisi ile optimum bitüm miktarının artırılması önerilmektedir.

Asfalt karışımların alev geciktirici deneylerinin yapılması tavsiye edilmektedir.

ZnB+ÖÜ (karışık) mineral katkısının yüksek enerjili bilyalı değirmende öğütülmesi ve asfalt karışım deneylerinin yapılması önerilmektedir.

Asfalt karışım deneylerinden BBR, DSR, tekerlek izi vb. deneylerin yapılması tavsiye edilmektedir.

Birim maliyeti hesabının yapılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- AASHTO T 283-03. , 2016. Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- Akbulut, H. , Çetin, S. , Güner, C. (2009). Andezit agregasının Sıcak Karışım Asfalt Kaplamalarında kullanılabilirliğinin Araştırılması. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Karabük.
- Aksoy. A. (2002). Bitüm Reolojik Yapısının Bitümün Yaşlanmasına ve Kaplamanın Performansına Olan Etkisinin İncelenmesi, Uluslararası Yol Trafik ve Yol Güvenliği Kongresi-Fuarı, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- Aksoy, A. (2001). Bitüm reolojik yapısının bitümün yaşlanmasına ve kaplamanın performansına olan etkisinin incelenmesi.
- Altaş, Ö. (2022), Bitümlü Malzemeler ve Karışım Şartnamelerinin Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Al-jubouri S.M. (2020), Synthesis of hierarchically porous ZSM-5 zeolite by self-assembly induced by aging in the absence of seeding-assistance, Microporous Mesoporous Mater. 303 110296. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2020.110296>.
- Ayyıldız D. , Aksoy A., İskender E. (2021), Investigation of optimum composition ratio for SBS / nanoclay / bitumen nanocomposites. Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, s. 1847-1861.
- Bardakçı, M. 2011. Çeşitli Bor Minerallerinden Hidrofobik Çinko Borat Üretim Yöntemlerinin Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 214 s., 94-96.
- BİTÜMEN, S. (1990). The Shell bitumen handbook (p. 232). Shell Bitumen UK.
- Brown, E.R. , Kandhal, P.S. ve Zhang, J. (2001). Performance Testing for Hot Mix Asphalt, National Center for Asphalt Technology Report No.01-05, Auburn University, Alabama.
- Büyüksaraçoğlu, Y. (2009, Ocak). Asfalt Yol İnşaatının Tedarik Zincirinin Simülasyon Tabanlı Modellenmesi. Yüksek lisans tezi. İstanbul teknik üniversitesi fen bilimleri enstitüsü.

- Ceylan, S. (2006). Bitümlü Sıcak Karışımlarda Filler Olarak Carboniferous Triassic Kayaç Tozlarının Kullanılması ve Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, SÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Chen, J. S., Liao, M. C. ve Shiah, M. S. (2002), Asphalt Modified by Styrene-Butadiene-Styrene Triblock Copolymer: Morphology and Model, Journal of Materials in Civil Engineering, 14 224-229.
- Chen R. &, (2018), Halogen-free flame retarded cold-mix epoxy asphalt binders: Rheological, thermal and mechanical characterization. Construction and Building Materials 186 (2018) 863–870
- Çiftçi H. (2012), Modelling and kinetic analysis of boric acid extraction from ulexite in citric acid solutions, Can. Metall. Q. 51 1–10. <https://doi.org/10.1179/1879139511Y.0000000024>.
- Cong P. ,Chen S. , Yu J. , Wu S. (2010), Effects of aging on the properties of modified asphalt binder with flame retardants. Construction and Building Materials 24 2554–2558
- Çubuk, M. (2007). Katkı Maddeleri ile Bitümün Reolojik Özelliklerinin Geliştirilmesi ve Esnek Kaplama Malzeme Oluşumunda Problemlerin Giderilmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Demir , P. (2008). Atık Sulardan Kesikli ve Sürekli Sistemlerle Bor Giderimi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- ETİ Maden, (2014) , Ground ulexite product data sheet, Eti Maden Operations General Directorate, Ankara, Turkey.
- Eti maden, (2022),Zinc borate product data sheet, Eti Maden Operations General Directorate, Ankara, Turkey,
- ETİ Maden teknik bilgi formu, (2022), <https://www.etimaden.gov.tr/rafine-urunler>
- Fakhri M. (2021),The effects of nano zinc oxide (ZnO) and nano reduced graphene oxide (RGO) on moisture susceptibility property of stone mastic asphalt (SMA). Case Studies in Construction Materials.
- Feipeng Xiao, R. G. (2019, Temmuz 10). Flame retardant and its influence on the performance of asphalt – A. Construction and Building Materials, s. 841-861

- Güngör, A. &. (2009). Polimer Modifiye Bitümlerin Superpave Performans Sınıflarının Belirlenmesi. 5. Ulusal Asfalt Sempozyumu. Ankara.
- Hacıosmanoğlu, G. G. , Genç, S. , & Can, Z. S. (2021). Efficient removal of methyl orange from aqueous solutions using ulexite. Environmental Technology & Innovation, 22, 101466.
- Ilıcalı, M. , Tayfur, S. , Özen, H. , Sönmez, İ. , ve Eren, K. , 2001. Asfalt ve Uygulamaları, İSFALT Bilimsel Yayınları, 1, 280.
- İskender, E. , 2008. Koşullandırma Sistemlerinin Geleneksel ve Modifiye Asfalt Karışımlar Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması, Doktora Tezi, K.T.Ü. , Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Karadağ Ö. , M. S. (2021). Bitümlü bağlayıcı ve agregaların arasındaki adezyon üzerine Cocamide Diethanolamide kimyasalının etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, s. 312-317.
- Karaşahin, M. , 2014, Karayolu üstyapısı ders notları, İstanbul Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ders Notları.
- Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) , 2013. Karayolu Teknik Şartnamesi. Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara,
- Karpuz, O. (2000). Asfalt emülsiyonu ile hazırlanan soğuk karışımların stabiliteilerinin araştırılması (Doctoral dissertation)
- Kalafatoğlu İ.E. , M. Koral, S.N. Örs, Köroğlu H.J. (1996), Bor Bileşikleri Araştırmaları Türkiye Bibliyografyası, TÜBİTAK-Marmara Araştırma Merkezi, Gebze,
- Keleşer S. (2022). Bor Üretim ve Ürün Değer Zincirinin Tamamı İlk Defa Türkiye’de Gerçekleşecek, <https://madencilikturkiye.com/serkan-keleser-bor-uretim-ve-urun-deger-zincirinin-tamami-ilk-defa-turkiyede-gerceklescek/> (accessed December 21, 2022).
- Kütük-Sert, T. , & Kütük, S. (2013). Physical and Marshall properties of borogypsum used as filler aggregate in asphalt concrete. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(2), 266-273.
- Kütük S. , Influence of milling parameters on particle size of ulexite material, Powder Technol. 301 (2016) 421–428. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2016.06.020>.

- Kütük S. , Kütük-Sert T. , Particle size distribution of nanoscale ulexite mineral prepared by ball milling, MATTER Int. J. Sci. Technol. 3 (18.11.2017) 86–103. <https://doi.org/10.20319/mijst.2017.33.86103>.
- Kütük S. , Kütük-Sert T. , Effect of PCA on nanosized ulexite material prepared by mechanical milling, Arab. J. Sci. Eng. 42 (07.06.2017) 4801–4809. <https://doi.org/10.1007/s13369-017-2643-7>.
- Kütük, S. ve Kütük-Sert, T. , Nanopartikül kolemanit mineral katkılı ılık karışım asfaltın incelenmesi. İNŞAAT VE YAPI MALZEMELERİ , vol.243 2020
- Kütük-Sert T, Günbey R. Investigation of nano ulexite mineral effects on mechanical behaviour of warm mix asphalt pavements. Građevinar, 6/2020. <https://doi.org/10.14256/JCE.2568.2018>
- Li N. , Xu xi J. , Experimental Study on Properties of Modified Asphalt Mortar with Different Flame Retardants. China Highway Research Institute.
- Li,R., Pei, J. ve Sun, C., Effect of Nano-ZnO With Modified Surface on Properties of Bitumen, Construction and Building Materials, 98 (2015) 656–661.
- Mohammadi, Z. , Yol Üstyapısının Trafik ve Çevresel Koşullar Altındaki Performans Karakteristiklerinin Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Mart 2021 İstanbul, İstanbul Üniversitesi, Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
- Na Li, X. j. , Experimental Study on Properties of Modified Asphalt Mortar with Different Flame Retardants. Çin : Highway Research Institute.
- Orhan, F. , 2012. Bitümlü Karışımlar Laboratuvarı Çalışmaları, Araştırma Geliştirme Dairesi Başkanlığı Üstyapı Geliştirme Şubesi Müdürlüğü, Ankara.
- Oruç, Ş., Yılmaz, B. ve Bostancıoğlu, M., Borik Asitin Asfaltın Fiziksel Özelliklerine Etkisi, 6. Ulusal Asfalt Sempozyumu ve Sergisi, Kasım 2013, Ankara, 297-306
- ÖCAL, A. (2018, Nisan). Nano Malzemelerin Bitümlü Sıcak Karışımların Marshall ve Superpave Karakteristikleri Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması ve Modellenmesi. DOKTORA TEZİ. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Sahin Ö., E. S. , Thermal decomposition of potassium tetraborate tetrahydrate. Thermochemica Acta. 2006

- Özçelik G. , O. Elcin, S. Guney, A. Erdem, F. Hacıoglu, M. Dogan, Flame retardant features of various boron compounds in thermoplastic polyurethane and performance comparison with aluminum trihydroxide and magnesium hydroxide, *Fire Mater.* 46 (2022) 1020–1033. <https://doi.org/10.1002/FAM.3050>
- Öztürk, D. , Türkiye’de Poroz Asfaltın Uygulanabilirliği, Yüksek Lisans Tezi, OMÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Samsun. 2008
- Ramazani S.A. A. , Rahimi A. , Frounchi M. , Rahman S. , Investigation of flame retardancy and physical–mechanical properties of zinc borate and aluminum hydroxide propylene composites. *Materials and Design* 29 (2008) 1051–1056
- Ru Chen, J. G. (2018, Ekim 20). Halogen-free flame retarded cold-mix epoxy asphalt binders: Rheological, thermal and mechanical characterization. *Construction and Building Materials*, s. 863-870.
- Soon W. K. , K. N. Characteristic of Nano Zinc Oxide Modified Asphalt Binder and Asphalt Mixture. *Recent Trends in Civil Engineering and Built Environment*, s. 782–793. 2022
- Şahin, Ö. , Cennetkusu, E. S., Dolaş, H., & Özdemir, M. , Thermal decomposition of potassium tetraborate tetrahydrate to anhydrous potassium tetraborate in a fluidized bed. *Thermochimica acta*, 440(1), 7-12. 2006
- TMMOB, , Bor Raporu, Metalurji Mühendisleri Odası, Ankara 2003
- Turan M.A., SBS VE Sönmüş Kireç Katkılı Sıcak Asfalt Karışımlarda Tekerlek İzi Direncinin Marshall Oranı Yaklaşımı İle Değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Şubat 2012 Gümüşhane, Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
- Umar, F. ve Yayla, N. , Yol İnşaatı, IV. Baskı, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, 1994.
- URL-1, <http://www.etimaden.gov.tr/dunyada-bor> erişim tarihi: 01.05.2020
- URL-2, <https://www.kgm.gov.tr/sayfalar/kgm/sitetr/kurumsal/tarihce.aspx>
- Üstündağ M. , Varol R. , TM Titanyum Alaşımlarına Sinter-HIP Yönteminin Uygulanması, *Harran Üniversitesi Mühendislik Derg.* 4 (2019) 48–55. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/humder/issue/44912/488981> December 14 2022

- WU Shaopeng , CONG Peiliang , YU Jianying, LUO Xiaofeng, MO Liantong, Experimental investigation of related properties of asphalt binders containing various flame retardants. Science Direct Fuel 85 (2006) 1298–1304
- Yayla, N. , Karayolu Mühendisliği, Birsen Yayinevi, İstanbul, 2004
- Yang X., A. S. Properties and mechanism of flame retardance and smoke suppression in asphalt binder containing organic montmorillonite. Construction and Building Materials. 2021
- Yu J. , Cong P., Wu S., Investigation of the properties of asphalt and its mixtures containing flame retardant modifier. Construction and Building Materials 23 (2009) 2277–2282
- Yu J., P. C. Investigation of the properties of asphalt and its mixtures containing flame. Construction and Building Materials, s. 2277–2282. 2009
- Yunus K. N. M., A. Z. , Physical and Chemical Properties of Nano Zinc Oxide Modified Asphalt Binder. The International Journal of Integrated Engineering, s. 133-139. 2022
- Zhang H. , Effects of ZnO particle size on properties of asphalt and asphalt mixture. Construction and Building Materials 159 (2018) 578-586
- Zhenga Y. , Y. T. (2009, Mayıs). Synthesis and performance study of zinc borate nanowhiskers. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, s. 178–184.