



**TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ADANA ALPARSLAN TÜRKER BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ**

**LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**ENDÜKTİF (KABLOSUZ) ELEKTRİKLİ YOL TEKNOLOJİSİNDE
KULLANILMAK ÜZERE ELEKTROMANYETİK DALGALARI
İLETİM ÖZELLİĞİ ARTTIRILMIŞ ASFALT BETONU ÜRETİMİ**

**HATİCE MERVE ANNAGÜR
DOKTORA TEZİ**



TÜRKİYE CUMHURİYETİ
ADANA ALPARSLAN TÜRKEŞ BİLİM VE TEKNOLOJİ
ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ENDÜKTİF (KABLOSUZ) ELEKTRİKLİ YOL TEKNOLOJİSİNDE
KULLANILMAK ÜZERE ELEKTROMANYETİK DALGALARI
İLETİM ÖZELLİĞİ ARTTIRILMIŞ ASFALT BETONU ÜRETİMİ

HATİCE MERVE ANNAGÜR
DOKTORA TEZİ

DANIŞMAN
DOÇ. DR. ORHAN KAYA

ADANA, 2024

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Adana Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak, bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yol ve yardıma başvurmaksızın hazırladığım bu tez çalışmada;

Bu tezin özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin akademik kurallara ve etik davranışa uygun olarak elde edilerek sunulduğunu beyan ederim. Ayrıca, tez kapsamında bu kuralların ve davranışların gerektirdiği şekilde bu çalışmaya özgün olmayan tüm veri ve bilgiler için bilimsel etik ve gelenek çerçevesinde kaynak gösterdiğimi; bu kaynakları da kaynakçada belirttiğimi beyan ederim. Çalışmam ile ilgili yaptığım beyana aykırı bir durum saptanması halinde tüm ahlaki ve hukuki sonuçları kabul ettiğimi bildiririm.

23/12/2024

[İmza]

Hatice Merve ANNAGÜR

ÖZET

ENDÜKTİF (KABLOSUZ) ELEKTRİKLİ YOL TEKNOLOJİSİNDE KULLANILMAK ÜZERE ELEKTROMANYETİK DALGALARI İLETİM ÖZELLİĞİ ARTTIRILMIŞ ASFALT BETONU ÜRETİMİ

Hatice Merve ANNAGÜR

Doktora, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Orhan KAYA

Aralık 2024, 169 sayfa

Yapılan bu doktora tez çalışmasında endüktif (kablesuz) elektrikli yol teknolojisinde kullanmak amacıyla elektromanyetik dalgaları iletim özelliği artırılmış farklı oranlarda çeşitli katkı malzemeleri içeren asfalt betonları üretilmiştir. Öncelikle Marshall karışım tasarımına göre karışımın optimum bitüm içeriği belirlenmiş, daha sonra grafit tozu, atık cam tozu, atık seramik, kuvars, ferrokrom ve çelik cürufu kullanılarak asfalt beton numuneleri elde edilmiştir. Numuneler üzerinde Marshall Stabilité deneyi ile karışımların mekanik ve hacimsel özellikleri, ince kesit analizleri ile ise Mikromorfolojik (doku/fabric) özellikleri incelenmiştir. Elektromanyetik iletimi ölçmek amacıyla Marshall karışım tasarımına göre hazırlanan numunelerle aynı hacimde ancak daha geniş yüzeye sahip asfalt betonları üretilmiştir. Sonuç olarak atık cam tozu ve atık seramik agregasının asfalt karışımlarda düşük oranlarda olmak şartıyla mekanik ve hacimsel açıdan kullanılabilir olduğu fakat asfalt betonlarda elektromanyetik iletimi azaltarak kalkanlama özelliğini arttırdığı, kuvars ise aşınma dayanımı yüksek bir malzeme olmasından dolayı karışımında yeterli dayanımı sağlamış ancak hava içeriğinin şartname limitlerini aştığı ortaya çıkmıştır. Grafit tozu ve çelik cürufu karışımların dayanım özelliklerini olumlu yönde etkilemiş ancak karışımdaki oranları arttıkça daha fazla bağlayıcıya ihtiyaç duyulmuştur. Ferrokrom ise karışımında %50 ve %75 oranda kullanıldığında, hem karışımın hacimsel ve mekanik özelliklerinde hem de elektromanyetik iletim özelliklerinde diğer malzemelere göre en yüksek performansı göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektrikli Yol Teknolojisi, Asfalt Betonu, Mekanik ve Hacimsel Özellik, Elektromanyetik Performans, Mikromorfoloji

ABSTRACT

PRODUCTION OF ASPHALT CONCRETE WITH INCREASED ELECTROMAGNETIC WAVE TRANSMISSION FEATURES FOR USE IN INDUCTIVE (WIRELESS) ELECTRIC ROAD TECHNOLOGY

Hatice Merve ANNAGÜR

PhD, Department of Civil Engineering

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Orhan KAYA

December 2024, 169 pages

In this doctoral thesis study, asphalt concrete containing various additives in different proportions with increased electromagnetic wave transmission properties was produced for potential use in inductive (wireless) electric road technology. According to the Marshall mixture design, the optimum bitumen content of the mixture was determined, and then asphalt concrete samples were obtained using graphite powder, waste glass powder, waste ceramics, quartz, ferrochrome and steel slag additives. The mechanical and volumetric properties of the samples were investigated performing Marshall Stability tests, while the micromorphological (structure/fabric) relationships between the constituents were studied by employing thin section and polished block analyses. To measure electromagnetic transmission, asphalt concrete with the same volume but larger surface area was produced as samples prepared according to the Marshall mix design. As a result, it has been revealed that waste glass powder and waste ceramic aggregate can be used in asphalt mixtures in terms of their mechanical and volumetric properties, at low rates and that they increase the shielding feature by reducing electromagnetic transmission in asphalt concrete. Quartz provides sufficient strength in the mixture due to its high hardness, but its air content exceeds the specification limits. Graphite powder and steel slag positively affected the strength properties, but as their proportions in the mixture increased, more binder was needed. Ferrochrome slag, on the other hand, showed the highest performance compared to the other materials, both in volumetric and mechanical properties of the mixture and in electromagnetic transmission properties, when used at 50% and 75% in the mixture.

Keywords: Electric Road Technology, Asphalt Concrete, Mechanical and Volumetric Properties, Electromagnetic Performance, Micromorphology

İthaf

Değerli aileme ve eşime...

TEŞEKKÜR

Doktora tezi çalışmamda; tez konusunun belirlenmesi, deneysel çalışmaların yapılması ve tezin son aşamasına kadar desteklerini ve fikirlerini esirgemeyen tez danışmanlarım Prof. Dr. Ahmet BEYÇİOĞLU ve Doç. Dr. Orhan KAYA' ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışması kapsamında yapılan elektromanyetik iletim ölçümlerinin yapılmasında ve yorumlanmasında desteklerini ve fikirlerini esirgemeyen İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. Muharrem KARAASLAN'a ve Ar. Gör. Fatih Özkan ALKURT'a ve Havacılık Elektrik-Elektronik bölümü öğretim üyesi Dr. Öğr. Üyesi Olcay ALTINTAŞ'a şükranlarımı sunarım. Deneysel çalışma aşamasında desteklerini, yardımlarını ve güler yüzünü esirgemeyen Ar. Gör. Hüsamettin ÜRÜNVEREN ve Ar. Gör. Serin DEĞERLİ ŞİMŞEK'e teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak doktora çalışmasının başlangıcından sonuna kadar bana inanan, güvenen, motive eden ve destekleriyle her zaman yanımda olan babama, anneme, kardeşime ve eşime sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

JÜRİ ONAY SAYFASI

Hata! Yer işareti tanımlanmamış.

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANNAMESİ

i

ÖZET

ii

ABSTRACT

iii

İthaf

iv

TEŞEKKÜR

v

İÇİNDEKİLER

vi

ŞEKİL LİSTESİ

ix

TABLO LİSTESİ

xiv

KISALTMALAR

xviii

1. GİRİŞ

1

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

3

2.1. Elektrikli Araçların Gelişim Süreci

3

2.2. Elektrikli Araç Teknolojileri

5

2.2.1. Tümü elektrikli araçlar (Battery Electric Vehicles (BEV))

6

2.2.2. Hibrit elektrikli araçlar (Hybrid Electric Vehicles (HEV))

6

2.2.3. Yakıt hücresi elektrikli araçlar (Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV))

7

2.3. Elektrikli Araçların Şarj Yöntemleri

8

2.3.1. İletken bağlantı

8

2.3.1.1. Şarj istasyonu tipleri

9

2.3.2. Endüktif (Kablosuz) bağlantı

10

2.4. Literatür Taraması

15

2.4.1. Grafit tozu ile ilgili yapılan çalışmalar

16

2.4.2. Atık cam ile ilgili yapılan çalışmalar

20

2.4.3. Atık seramik ile ilgili yapılan çalışmalar

22

2.4.4. Kuvars ile ilgili yapılan çalışmalar

24

2.4.5. Ferrochrom ile ilgili yapılan çalışmalar

25

2.4.6. Çelik cürufu ile ilgili yapılan çalışmalar

27

3. MATERYAL VE METOT

29

3.1. Materyal

32

3.1.1. Bitüm

32

3.1.2.	Agrega	32
3.1.3.	Grafit tozu	33
3.1.4.	Atık cam tozu	34
3.1.5.	Atık seramik agregası	36
3.1.6.	Kuvars agregası	38
3.1.7.	Ferrokrom cürufu	39
3.1.8.	Çelik cürufu	40
3.1.9.	Asfalt betonunda kullanılan katkı malzemelerinin elektriksel özellikleri	41
3.1.9.1.	Malzemelerin dielektrik özellikleri ve dielektrik geçirgenlik	42
3.2.	Metot	45
3.2.1.	Elek analizi	45
3.2.2.	Özgöl ağırlık deneyi ve su emme tayini	46
3.2.3.	Los Angeles (Aşınma) deneyi	49
3.2.4.	Marshall Metodu ile karışım tasarımı ve Marshall Stabilitate deneyi	51
3.2.4.1.	Asfalt karışımın optimum bitüm içeriği tayini	54
3.2.4.2.	Marshall karışım tasarımında kullanılan hesaplamalar için gerekli kavramlar ve bağıntılar	54
3.2.5.	Mikromorfolojik analiz	58
3.2.6.	Vektör Network Analizör	59
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	62
4.1.	Asfalt Karışımlarda Kullanılan Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi	62
4.1.1.	Elek analizi deney sonuçları	62
4.1.2.	Özgöl ağırlık deneyi ve su emme tayini sonuçları	63
4.1.3.	Los Angeles (Aşınma) deney sonuçları	64
4.2.	Marshall Tasarım Deneyi ve Sonuçları	65
4.2.1.	Optimum bitüm içeriği tayini	65
4.3.	Katkı Malzemesi İçeren Asfalt Karışımların Mekanik ve Hacimsel Özellikleri	67
4.3.1.	Grafit tozu içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel özellikleri	67
4.3.2.	Atık cam tozu içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel özellikleri	70
4.3.3.	Atık seramik içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel özellikleri	73
4.3.4.	Kuvars içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel özellikleri	76
4.3.5.	Ferrokrom içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel özellikleri	78

4.3.6.	Çelik cürufu içeren asfalt karışımlarının mekanik ve hacimsel özellikleri	81
4.4.	Katkı Malzemeleri İçeren Asfalt Karışımların Mikromorfolojik Analizleri	84
4.4.1.	Grafit tozu içeren asfalt karışımın Mikromorfolojik analizi	84
4.4.2.	Atık cam tozu içeren asfalt karışımın Mikromorfolojik analizi	85
4.4.3.	Atık seramik içeren asfalt karışımın Mikromorfolojik analizi	86
4.4.4.	Kuvars içeren asfalt karışımın Mikromorfolojik analizi	87
4.4.5.	Ferrokrom içeren asfalt karışımın Mikromorfolojik analizi	89
4.4.6.	Çelik cürufu içeren asfalt karışımın Mikromorfolojik analizi	90
4.5.	Katkı Malzemesi İçeren Asfalt Karışımların Elektromanyetik İletim Özellikleri	92
4.5.1.	Grafit tozu içeren asfalt karışımların elektromanyetik iletim özellikleri	93
4.5.2.	Atık cam tozu içeren asfalt karışımların elektromanyetik iletim özellikleri	95
4.5.3.	Atık seramik içeren asfalt karışımların elektromanyetik iletim özellikleri	97
4.5.4.	Kuvars içeren asfalt karışımların elektromanyetik iletim özellikleri	98
4.5.5.	Ferrokrom içeren asfalt karışımların elektromanyetik iletim özellikleri	100
4.5.6.	Çelik cürufu içeren asfalt karışımların elektromanyetik iletim özellikleri	101
4.6.	Katkı Malzemeleriyle Üretilen Asfalt Beton Numunelerinin Marshall Sonuçları ve Elektromanyetik İletim Değerlerinin Yorumlanması	103
4.6.1.	Grafit tozu içeren asfalt betonlarının Marshall ile elektromanyetik iletim verilerinin değerlendirilmesi	103
4.6.2.	Atık cam tozu içeren asfalt betonlarının Marshall ile elektromanyetik iletim verilerinin değerlendirilmesi	113
4.6.3.	Atık seramik içeren asfalt betonlarının Marshall ile elektromanyetik iletim verilerinin değerlendirilmesi	123
4.6.4.	Kuvars içeren asfalt betonlarının Marshall ile elektromanyetik iletim verilerinin değerlendirilmesi	132
4.6.5.	Ferrokrom içeren asfalt betonlarının Marshall ile elektromanyetik iletim verilerinin değerlendirilmesi	143
4.6.6.	Çelik cürufu içeren asfalt betonlarının Marshall ile elektromanyetik iletim verilerinin değerlendirilmesi	152
5.	SONUÇLAR	162
6.	ÖNERİLER	169
	KAYNAKÇA	170

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. “New York Taxi” firmasının kullandığı elektrikli taksi	4
Şekil 2.2. Ticari olarak satışa sunulan hibrit elektrikli araçlar.....	5
Şekil 2.3. Tümü elektrikli araç	6
Şekil 2.4. Hibrit elektrikli araçların basit gösterimi	7
Şekil 2.5. Yakıt hücreli elektrikli araçların basit gösterimi	7
Şekil 2.6. Kablosuz şarj yöntemi	10
Şekil 2.7. Statik şarj sistemi	10
Şekil 2.8. Kablosuz şarj yöntemleri	11
Şekil 2.9. Smartroad Gotland projesi	12
Şekil 2.10. Çevrimiçi Elektrikli Araç (OLEV)	12
Şekil 2.11. Qualcomm Halo projesi	13
Şekil 2.12. İletken raylı elektrikli yol örneği	14
Şekil 2.13. İletken kablolu elektrikli yol örneği.....	14
Şekil 2.14. Endüktif (kablosuz) elektrikli yol teknolojisi	15
Şekil 3.1. Doktora tez çalışması akış diyagramı	31
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan kırmataş kalker agregası	33
Şekil 3.3. Grafit tozunun kimyasal yapısı ve görseli	34
Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan atık camların öğütülmesinde kullanılan çeneli kırıcı aleti	35
Şekil 3.5. Atık cam tozu.....	36
Şekil 3.6. Atık seramiklerin çeneli kırıcıda öğütülmesi ve elenerek gradasyonlara ayrılması	37
Şekil 3.7. Atık seramik agregası	38
Şekil 3.8. Kuvars agregası.....	39
Şekil 3.9. Ferrookrom cürufu.....	40
Şekil 3.10. Çelik cürufu	41
Şekil 3.11. Malzeme içerisinde bulunan bant yapısı.....	43
Şekil 3.12. Agregaların 24 saat suda bekletilmesi ve etüvde kurutulması.....	48
Şekil 3.13. Agregaların Arşimet terazisinde ölçümü ve özgül ağırlık ve su emme deneyleri için ölçümlerin alınması	48
Şekil 3.14. Los Angeles (Aşınma) deney aşamaları	50
Şekil 3.15. Marshall numune kalıbı ve otomatik tokmak	52

Şekil 3.16. Marshall numunelerinin suda ve havada tartımları.....	52
Şekil 3.17. Marshall numunelerinin kür havuzunda şartlandırılması	53
Şekil 3.18. Numunelerin stabilite ve akma dayanımının ölçülmesi.....	54
Şekil 3.19. Vektör Network Analizör cihazı çalışma prensibi.....	60
Şekil 3.20. Vektör Network Analizör cihazı.....	60
Şekil 3.21. Elektromanyetik iletim analizi için hazırlanan kare prizma numuneler	61
Şekil 3.22. Asfalt betonu numunesinin Vektör Network Analizör ile elektromanyetik iletimin ölçülmesi	61
Şekil 4.1. Agrega gradasyon grafiği.....	63
Şekil 4.2. Asfalt karışımların optimum bitüm içeriği tayininin belirlenmesi amacıyla farklı bitüm içerikleri ile hazırlanan asfalt numunelerinin mekanik ve hacimsel analiz sonuçları ...	66
Şekil 4.3. Grafit tozu içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel analiz sonuçları	68
Şekil 4.4. %0 grafit tozu (sol) ve %100 grafit tozu (sağ) içeren asfalt numuneler	70
Şekil 4.5. Atık cam tozu içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel analiz sonuçları	71
Şekil 4.6. Atık seramik içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel analiz sonuçları	74
Şekil 4.7. Kuvars içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel analiz sonuçları	77
Şekil 4.8. Ferrokrom içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel analiz sonuçları.....	79
Şekil 4.9. Çelik cürufu içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel analiz sonuçları.....	82
Şekil 4.10. Grafit tozu içeren asfalt karışımın tipik Mikromorfolojik görünümü.....	85
Şekil 4.11. Atık cam tozu içeren asfalt karışımın tipik Mikromorfolojik görünümü	86
Şekil 4.12. Atık seramik içeren asfalt karışımın tipik Mikromorfolojik görünümü	87
Şekil 4.13. Kuvars içeren asfalt karışımın tipik Mikromorfolojik görünümü	89
Şekil 4.14. Ferrokrom içeren asfalt karışımın tipik Mikromorfolojik görünümü;.....	90
Şekil 4.15. Çelik cürufu içeren asfalt karışımın tipik Mikromorfolojik görünümü.....	92
Şekil 4.16. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin elektromanyetik iletim büyüklüğü (S12 veya S21) sonuçları.....	94
Şekil 4.17. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin elektromanyetik iletim büyüklüğü (S12 veya S21) sonuçları.....	96
Şekil 4.18. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin elektromanyetik iletim büyüklüğü (S12 veya S21) sonuçları.....	97
Şekil 4.19. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin elektromanyetik iletim büyüklüğü (S12 veya S21) sonuçları	99

Şekil 4.20. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin elektromanyetik iletim büyüklüğü (S12 veya S21) sonuçları.....	100
Şekil 4.21. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin elektromanyetik iletim büyüklüğü (S12 veya S21) sonuçları.....	102
Şekil 4.22. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin akma ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	106
Şekil 4.23. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	107
Şekil 4.24. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları.....	109
Şekil 4.25. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	110
Şekil 4.26. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin VFA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları.....	112
Şekil 4.27. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin VMA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	113
Şekil 4.28. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin akma ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	116
Şekil 4.29. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları.....	117
Şekil 4.30. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları.....	119
Şekil 4.31. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	120
Şekil 4.32. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin VFA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	121
Şekil 4.33. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin VMA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	123
Şekil 4.34. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin akma ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	126
Şekil 4.35. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları.....	127

Şekil 4.36. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları.....	128
Şekil 4.37. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	129
Şekil 4.38. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin VFA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	131
Şekil 4.39. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin VMA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	132
Şekil 4.40. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin akma ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	135
Şekil 4.41. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	137
Şekil 4.42. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	138
Şekil 4.43. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	140
Şekil 4.44. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin VFA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	141
Şekil 4.45. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin VMA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	143
Şekil 4.46. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin akma ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	145
Şekil 4.47. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	147
Şekil 4.48. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	148
Şekil 4.49. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	149
Şekil 4.50. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin VFA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	151
Şekil 4.51. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin VMA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	152

Şekil 4.52. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin akma ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	155
Şekil 4.53. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları.....	156
Şekil 4.54. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları.....	158
Şekil 4.55. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	159
Şekil 4.56. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin VFA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	160
Şekil 4.57. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin VMA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	162

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1. Elektrikli araçların genel özellikleri	8
Tablo 3.1. Tezin deneysel çalışmasında kullanılan agregaların temin edildiği bölgeler	30
Tablo 3.2. 70/100 Penetrasyon sınıfındaki asfalt bağlayıcının fiziksel özellikleri	32
Tablo 3.3. Kırmataş kalker agregasının fiziksel ve mekanik özellikleri	33
Tablo 3.4. Asfalt betonlarını oluşturan malzemelerin dielektrik katsayıları	44
Tablo 4.1. Gradasyon ve şartname limitleri	62
Tablo 4.2. Asfalt karışımında kullanılan agregaların özgül ağırlık ve su emme değerleri	64
Tablo 4.3. Asfalt karışımında kullanılan agregaların Aşınma kaybı değerleri	64
Tablo 4.4. Asfalt karışımında kullanılan grafit tozunun deneysel test matrisi	69
Tablo 4.5. Asfalt karışımında kullanılan atık cam tozunun deneysel test matrisi.	72
Tablo 4.6. Elektromanyetik iletimin ölçülmesi amacıyla grafit tozu içeren asfalt betonlarının deneysel test matrisi	93
Tablo 4.7. Elektromanyetik iletimin ölçülmesi amacıyla atık cam tozu içeren asfalt betonlarının deneysel test matrisi	95
Tablo 4.8. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin Marshall deney sonuçları ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	104
Tablo 4.9. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin akma ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	105
Tablo 4.10. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	107
Tablo 4.11. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	108
Tablo 4.12. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	110
Tablo 4.13. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin VFA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	111
Tablo 4.14. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin VMA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	113
Tablo 4.15. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin Marshall deney sonuçları ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	115

Tablo 4.16. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin akma ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	116
Tablo 4.17. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	117
Tablo 4.18. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	118
Tablo 4.19. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	120
Tablo 4.20. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin VFA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	121
Tablo 4.21. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin VMA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	122
Tablo 4.22. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin Marshall deney sonuçları ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	124
Tablo 4.23. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin akma ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	125
Tablo 4.24. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	126
Tablo 4.25. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	128
Tablo 4.26. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	129
Tablo 4.27. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin VFA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	130
Tablo 4.28. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin VMA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	132
Tablo 4.29. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin Marshall deney sonuçları ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	134
Tablo 4.30. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin akma ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	135
Tablo 4.31. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	136

Tablo 4.32. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	138
Tablo 4.33. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	139
Tablo 4.34. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin VFA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	141
Tablo 4.35. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin VMA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	142
Tablo 4.36. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin Marshall deney sonuçları ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	144
Tablo 4.37. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin akma ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	145
Tablo 4.38. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	146
Tablo 4.39. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	148
Tablo 4.40. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	149
Tablo 4.41. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin VFA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	150
Tablo 4.42. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin VMA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	152
Tablo 4.43. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin Marshall deney sonuçları ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	154
Tablo 4.44. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin akma ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	155
Tablo 4.45. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	156
Tablo 4.46. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	157
Tablo 4.47. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları	159

Tablo 4.48. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin VFA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları 160

Tablo 4.49. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin VMA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları 161



KISALTMALAR

AB	: Avrupa Birliği
AÇA	: Avrupa Çevre Ajansı
Al	: Alüminyum
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BEV	: Battery Electric Vehicles
Ca	: Kalsiyum
CaO	: Kalsiyum Oksit
CO ₂	: Karbondioksit
cP	: Centipoise
Cr	: Krom
EA	: Elektrikli Araçlar
ETS	: Emisyon Ticaret Sistemi
FCEV	: Fuel Cell Electric Vehicle
Fe	: Demir
Fe ₂ O ₃	: Hematit
GPR	: Ground Penetrating Radar
HEV	: Hybrid Electric Vehicles
ITS	: Indirect Tensile Strength
KAIST	: Kore İleri Bilim ve Teknoloji Enstitüsü
KTŞ	: Karayolu Teknik Şartnamesi
Li	: Lityum
Mg	: Magnezyum
MgO	: Magnezyum Oksit
MS	: Marshall Stabilité
Na	: Sodyum
Ni	: Nikel
OLEV	: Çevrimiçi Elektrikli Araç
P ₂ O ₅	: Difosfor Pentaoksit
QTI	: Qualcomm Teknolojileri Firması
SBS	: Strien-Bütadien-Strien

SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
SHF	: Süper Yüksek Frekans
Si	: Silisyum
SiO ₂	: Silisyum Dioksit
TDG	: Zaman Alanı Geçitleme
Ti	: Titanyum
TiO ₂	: Titanyum Dioksit
TSR	: Tensile Strength Ratio
VFA	: Void Filled with Asphalt
VMA	: Voids in Mineral Aggregate
VNA	: Vektör Network Analizör
°C	: Sıcaklık birimi (Derece)

1. GİRİŞ

İnsan nüfusunun gün geçtikçe artması ve bunun sonucu olarak var olan kaynakların giderek azalması, sürdürülebilirlik ve çevre bilinci kavramlarının daha da önem kazanmasına sebep olmuştur. İhtiyaçlar doğrultusunda kullanılan kaynakların günümüzde daha bilinçli bir şekilde tüketilmesi amacıyla farklı kaynakları alternatif olarak değerlendirme çalışmaları teknolojinin gelişmesiyle birlikte araştırmacıların daha da ilgisini çekmiştir. En temel rezervlerden biri olan petrolden elde edilen plastik ürünler, deterjanlar, çeşitli ilaçlar ve yalıtım malzemeleri gibi ürünlerin kullanımında artış olması ve özellikle ulaşım ve taşımacılık amacıyla yakıt kullanımının artması ekolojik dengenin bozulmasında çok büyük etken olmuştur. Yakıtların kullanımından ortaya çıkan zehirli gazlar hava kirliliğine sebep olmakta ve insan sağlığını oldukça etkilemektedir. Bu sebepten dolayı daha temiz ve doğayı kirletmeyen alternatif enerji kaynaklarına yönelim artmıştır. Özellikle otomobil sektöründe yakıt tüketiminin azaltılmasına yönelik araştırmalar ve çalışmalar yapılmaktadır. Yapılan araştırmalar ve çalışmalar ışığında ortaya çıkan elektrikli araçlar sektörde büyük bir devrim yaratmıştır.

Avrupa Birliği (AB) ülkelerinin sera gazı emisyonu verileri 1990 yılından bu yana takip edilmekte ve Avrupa Çevre Ajansı (AÇA) tarafından analiz edilerek düşürülmesi için çeşitli stratejiler geliştirilmektedir. AB Emisyon Ticaret Sistemi (ETS) kapsamında ısı ve enerji sektöründe 2019 yılında emisyonlarda %80 azalma meydana gelmiştir. Ancak ulaşım ve taşımacılık sektöründe özellikle binek araçların fazlalığı ve yüksek yakıt kullanımından dolayı aynı yılda CO₂ emisyonları artışa devam etmiştir (European Environment Agency, 2023). Dünyada kara taşımacılığının toplam petrol tüketimi içindeki payı yaklaşık %40, gelişmiş ülkelerde %50, Türkiye’de ise %80’in üzerindedir. Türkiye’de karayolu taşımacılığının %90’ını yolcu taşımacılığı ve %89’unu da yük taşımacılığı oluşturmaktadır (Ulaşan ve Erişen Türkiye, 2021).

Ülkemizde de CO₂ emisyonlarının en büyük kaynağı ulaştırma sektöründen oluşmaktadır. Dünya üzerinde emisyonların azaltılması için çalışmalar yapılırsa da özellikle ulaştırma sektöründe büyük atılımlar yapılmadığı sürece bu durumun düzeltilmesi zorlaşacaktır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte ulaşım sektöründen kaynaklanan emisyon artışlarını engellemede katkıda bulunacak olan elektrikli araçların ekolojik dengenin düzenlenmesinde önemli bir payı olacaktır.

Elektrikli araçlar (EA), içten yanmalı motorlu araçlarda olduğu gibi egzoz gazları ortaya çıkarmamakta, benzinli ve dizel araçların meydana getirdiği nitrojen oksit gibi zararlı partiküllerin oluşumunu engelleyerek sıfır emisyon üretmekte ve hava kirliliği sorunlarını azaltmaktadır. Ayrıca sürdürülebilirlik adına en önemli faydası kullandığı elektriği güneş, rüzgar ve hidroelektrik gibi yenilebilir enerjiyle birleştirerek bu araçların şarj edilmesine imkan sağlamasıdır.

Elektrikli otomobillerin çalışmasını sağlayan tahrik elektrikten elde edildiğinden dolayı şarj edilme imkanının kolay ve ulaşılabilir olması gerekmektedir. Ancak elektrikli araç teknolojisinin piyasası yeni yeni gelişmekte olduğu için şarj istasyonlarının da haliyle sayısı yetersiz kalmakta ve şarj sorunu ortaya çıkmaktadır. Gelişmiş ülkelerde deneme çalışmaları yapılan ve olumlu sonuçlar alınan elektrikli yol teknolojisi, aracın hareket halindeyken de şarj edilebilmesini hedeflemektedir. Bu teknoloji sayesinde araçlar büyük pillere ihtiyaç duymadan uzun mesafe gidebilecek ve yakıta bağımlılık azaltılarak içten yanmalı motorların neden olduğu sera gazı emisyonu, hava kirliliği ve gürültü gibi çevreyi olumsuz etkileyen etmenler ortadan kaldırılarak enerji verimliliğinin artması sağlanacaktır.

Elektrikli yol sistemlerinden biri olan endüktif (kablosuz) elektrikli yollar, dinamik kablosuz güç aktarımı olarak da adlandırılmaktadır. Bu tür elektrikli yolların çalışma prensibi; enerjinin yol yüzeyinin altında bulunan bir bobinden (verici) hareket eden bir araca monte edilmiş başka bir bobine (alıcı) iletildiği endüktif teknolojiyi kullanmasından oluşmaktadır. Bu teknolojinin diğer elektrikli yol teknolojilerine kıyasla birçok avantajı bulunmaktadır. Bu avantajlar arasında; araç ile yol yüzeyinin altındaki bobin arasında fiziksel bir temas olmadığı için uygun olması, fazla bakım gerektirmemesi, çevre dostu olması, kamyon, otobüs, otomobil ve otonom araçlar dahil her türlü aracın kullanabileceği bir platform oluşturması sayılabilir. Ayrıca diğer iletken teknolojilere göre daha düşük güç değerlerine sahiptir.

Kablosuz şarj teknolojisine örnek verilecek olursa İsveç'in Gotland adasında kamyonlar ve otobüsler için dünyanın ilk kablosuz elektrikli yolu olarak pazarlanan "Smartroad Gotland" adlı bir tanıtım projesi, özel bir şirket olan ElectReon liderliğindeki bir konsorsiyum tarafından 2019-2020 yılları arasında uygulanmıştır (Sundelin ve Tongur, 2020). 1,6 km uzunluğunda inşa edilen deneme kesiminde şirket, gönderici yüzeyi ince bir asfalt tabakasının altına (8 cm kalınlığında) yerleştirmiş ve sırasıyla bir otobüs ve 40 tonluk bir kamyonun altına üç ve beş

alıcı monte etmiştir (Sundelin ve Tongur, 2020). Proje başarılı sonuçlar vermiş ve Fransa, İtalya, Almanya, Amerika Birleşik Devletleri, İsrail ve Norveç'te de aynı tasarımda elektrikli yollar inşa edilmiştir (Electreon, 2023).

Kore İleri Bilim ve Teknoloji Enstitüsü (KAIST) 2010 yılında Çevrimiçi Elektrikli Araç (OLEV) geliştirmiş ve kablosuz şarjlı yol teknolojisini kullanan ilk toplu taşıma sistemi olarak sunulmuştur (Lee ve diğ., 2010).

Qualcomm Teknolojileri Firması (QTI), Qualcomm Halo projesiyle elektrikli araçların dinamik şarj yöntemiyle şarj edilmesini sağlayan bir sistem geliştirmiştir. Fransa'da test alanı oluşturan şirket, 100 metrelik bir şeritte asfalt kaplamanın 20 cm altına şarj iletimini sağlayacak plakalar yerleştirmiştir. Elektrikli araçların çalışabilmesi için gereken gücün 10-13 kW arasında olmasından dolayı şirket 20 kW'lık şarj plakaları kullanmıştır (Davison, 2017).

Hazırlanan bu Doktora Tez çalışmanın amacı, diğer elektrikli yollara göre daha fazla avantajlara sahip olan kablosuz elektrikli yolların inşa edilmesi sırasında yol tabakasının katmanlarından biri olan binder tabakasını oluşturan bileşenlere ek olarak şartnamelere uygun bir şekilde, elektromanyetik iletimi yüksek bir malzeme kullanması ve enerji geçişinin daha fazla olmasının sağlamasıdır. Bu sayede kablosuz araçların çalışma prensibine göre kaplama altında bulunan bobinden araca daha fazla enerji geçişi sağlanmış ve verimliliği artırılmış olacaktır.

2. KURAMSAL TEMELLER VE KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1. Elektrikli Araçların Gelişim Süreci

Elektrikli araçlar (EA), 18. yüzyılın sonlarında yeni buluşların endüstriye kazandırıldığı sanayi devrimi zamanına kadar dayanmaktadır. Profesör Stratingh tarafından 1835 yılında Hollanda'da ilk elektrikli araç modeli geliştirilmiş ve 18. yüzyılın sonlarına doğru İngiltere'de "Londra Elektrikli Taksi Şirketi" tarafından 15 adet elektrikli taksi kullanılmıştır (Ünlü ve diğ., 2003; Sayın ve Yüksel, 2011). 1901'de "New York Taxi" firması da elektrikli araçları taksi olarak kullanmaya başlamıştır (Larminie ve Lowry, 2003) (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. “New York Taxi” firmasının kullandığı elektrikli taksi (Larminie ve Lowry, 2003; Chan, 2013)

İlk elektrikli-benzinli araçlar olan French Electroautomobile ve Krieger ise 1900’lü yıllarda üretilmiş ve hibrit konfigürasyon modeli olarak denenmiştir (Ünlü ve diğ., 2003). Ancak o yıllarda petrol fiyatlarının azalması ve inşa edilen yolların fiziki şartlarının iyileştirilmesi ve en önemli etken olan uzun menzilli araçlara olan ihtiyacın artmasından dolayı elektrikli araçlara ilgi azalmıştır. EA’lar yerini içten yanmalı motorlu araçlara bırakmış ve 1900’lü yılların sonlarına doğru elektrikli araçları geliştirmeye yönelik bir çalışma yapılmamıştır. İlerleyen zamanda içten yanmalı motorların sebep olduğu insan ve çevre sağlığına olan olumsuz etkileri, petrol kaynakların azalması ve sürdürülebilirlik kavramının önem kazanmasından dolayı elektrikli araçların değeri artışa geçmiştir.

Amerika Birleşik Devletleri tarafından 1990’lı yıllarda ilk elektrikli otomobil EV-1 General Motor tarafından üretilmiştir. Ancak sonrasında petrol fiyatlarının düşmesi ve başka faktörlerin etkisinden dolayı bu aracın üretimi durdurulmuştur.

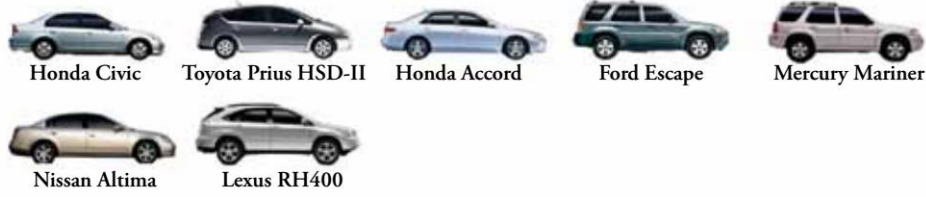
1997 yılında ise Toyota markası hibrit araçların ilk örneği olan Prius’ı üretmiştir. Mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirip içerisinde bulunan içten yanmalı motorun optimum düzeyde çalışmasını sağlayarak araç içi enerji tasarrufu hedeflenmiştir. Ayrıca Prius, aracın fren yapması esnasında kaybettiği enerjiyi geri dönüştürerek yeniden kullanılmasını sağlayan Regeneratif fren sistemi kullanılarak tasarlanmıştır. Daha sonraki versiyonlarında Lityum-İyon piller

kullanılarak batarya kapasitesi arttırılmış ve araç menzili yükseltilmiştir (Üstün ve Tuncay, 2012) (Şekil 2.2).

1990's



2000-2006



2007-....



Şekil 2.2. Ticari olarak satışa sunulan hibrit elektrikli araçlar (Üstün ve Tuncay, 2012).

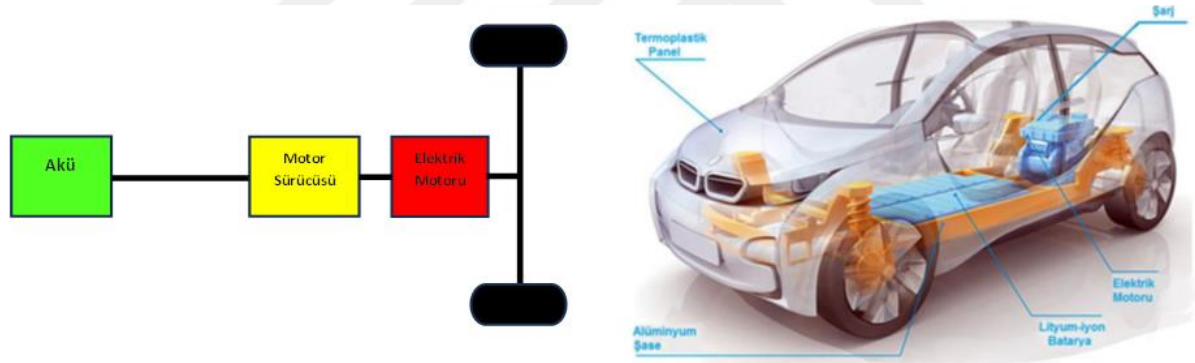
2.2. Elektrikli Araç Teknolojileri

Geçmişten günümüze kadar petrol, her alanda başlıca enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Ancak bu kaynakların gelecekte nüfus artışı ve bilinçsiz tüketimden dolayı azalacağı aşikardır. Bu durum petrolün en çok kullanıldığı ulaşım sektörünü etkilemektedir. 2040-2050'li yıllarda petrol üretiminin azalarak fiyatının yükselme beklentisi sonucunda petrol kaynaklarının daha çok stratejik alanlarda kullanılacağı tahmin edilmektedir. Bu sebepten dolayı araştırmacılar alternatif kaynak arayışına daha çok eğilmişlerdir. 1900'lü yıllarda üretilen elektrikli araçların batarya ömrünün kısa olması sebebiyle uzun menzil gidememesi ve petrolün o zamanlarda daha ucuz olması elektrikli araçlara olan ilgiyi düşürmüştür. Günümüzde ise teknolojinin gelişmesiyle elektrikli araçlar bu sorunları en aza indirecek şekilde tasarlanması amacıyla çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalara; batarya kapasitesi yüksek olan pillerin kullanılması, şarj istasyonlarının çoğaltılması, aracın park halindeyken kablolu bir şekilde şarj edilebilmesi ve yol kaplamalarının altına yerleştirilen plakalarla araçların hareket halindeyken şarj edilebildiği sistemlerin yapılması gibi örnekler verilebilir.

Elektrikli araçların çalışması, içerisinde bulunan bataryanın şarj edilmesiyle depolanan elektrik enerjisinin aracın motoruna iletilmesi ile sağlanmaktadır. Farklı konfigürasyonlarla üretilen EA'lar üç ana gruba ayrılmaktadır. Bunlar: Tümü Elektrikli Araçlar (Battery Electric Vehicles; BEV), Hibrit Elektrikli Araçlar (Hybrid Electric Vehicles; HEV) ve Yakıt Hücresi Elektrikli Araçlardır (Fuel Cell Electric Vehicle; FCEV).

2.2.1. Tümü elektrikli araçlar (Battery Electric Vehicles (BEV))

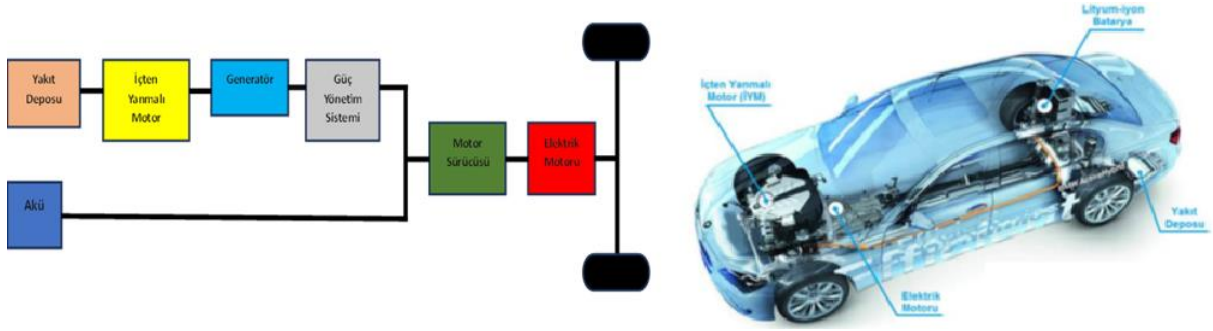
Bu tür araçlarda elektrik motoru bulunmakta ve gerekli olan enerji bataryadan sağlanmaktadır. Elektrik motoru jeneratör görevi görmekte ve ürettiği elektrik enerjisi ile bataryalar şarj edilebilmektedir (Sayın ve Yüksel, 2011) (Şekil 2.3). Bu araçlarda içten yanmalı motor bulunmadığı ve tamamen elektrikten beslendiği için ortaya zehirli gaz çıkmamaktadır. Ayrıca elektrik motoru sayesinde çok sessiz çalışmaktadır. Çevre ve insan sağlığına hiçbir şekilde zararı olmadığı için bu araçlar sıfır emisyonlu araçlar grubuna girmektedir.



Şekil 2.3. Tümü elektrikli araç (Ünlü ve diğ., 2003)

2.2.2. Hibrit elektrikli araçlar (Hybrid Electric Vehicles (HEV))

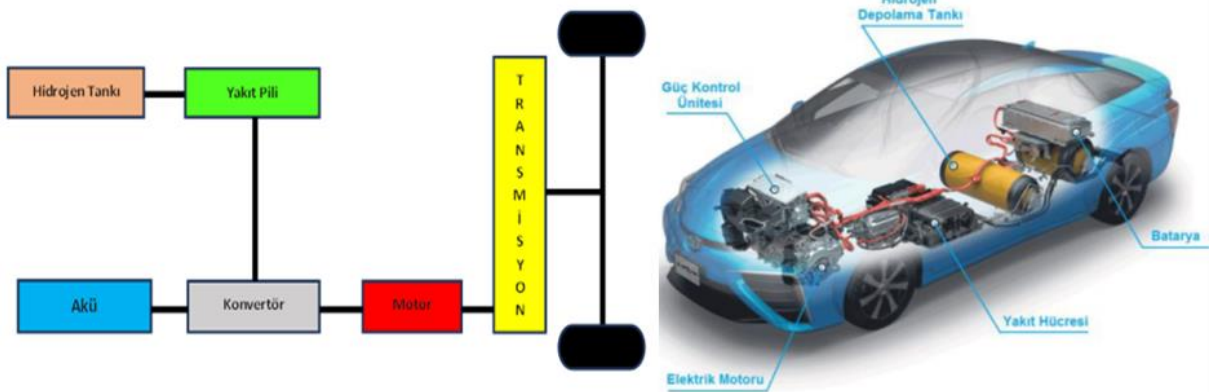
Bu tür araçların üretim amacı, tümü elektrikli araçlara içten yanmalı motor veya daha fazla güç kaynağı eklenerek daha çok güç sağlamak ve buna bağlı olarak araç menzilin arttırmaktır. Batarya-yakıt pili, batarya-kapasitör veya batarya-batarya gibi birden fazla ve farklı yapılarda güç kaynaklarının kombinasyonlarından meydana gelmektedirler (Öztürk, 2013). Hibrit elektrikli araçlar; enerji dönüşüm sistemi, enerji depolama sistemi, güç ünitesi ve taşıt itici sistemlerinden oluşmaktadır (Şekil 2.4).



Şekil 2.4. Hibrit elektrikli araçların basit gösterimi (Özbay ve diğ., 2020)

2.2.3. Yakıt hücresi elektrikli araçlar (Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV))

Tümü elektrikli araçlarda bulunan bataryalar yerine hidrojenin depolanması için tanklar bulunmaktadır. Böylece aracın tahrik gücü, hidrojenden elde edilen kimyasal enerjinin elektrik enerjisine çevrilmesiyle elde edilerek elektrikli motorun çalışması sağlanmaktadır (Şenol ve diğ., 2006) (Şekil 2.5). Bu araçlarda kullanılan yakıt pili enerjiyi dönüştüren temel parçadır. Alternatif yakıt olarak düşünülen hidrojenin, petrol yakıtı yerine gelecek vadettiği araştırmacılar tarafından öngörülmektedir. Ancak günümüzde hidrojen istasyonlarının yetersiz olması ve yakıt maliyetinin yüksek olmasından dolayı yakıt hücresi araçlar tümü elektrikli araçlardan talep açısından daha geride kalmaktadır (Larminie ve Dicks, 2000).



Şekil 2.5. Yakıt hücresi elektrikli araçların basit gösterimi (Özbay ve diğ., 2020)

Tablo 2.1. Elektrikli araçların genel özellikleri (Ünlü ve diğ., 2003)

Elektrikli Araç Çeşitleri	Tümü Elektrikli Araçlar	Hibrit Elektrikli Araçlar	Yakıt Hücreli Elektrikli Araçlar
Tahrik	Elektrik motorlu tahrik	Elektrik motorlu tahrik İçten yanmalı motorlu tahrik	Elektrik motorlu tahrik
Enerji Sistemi	Batarya Süperkapasitör	Batarya Süperkapasitör İçten yanmalı motor üretim birimi	Yakıt pilleri
Enerji Kaynağı	Elektrik şarjı	Elektrik şarjı Benzin	Elektrik şarjı Benzin Alternatif yakıtlar (Hidrojen)
Emisyon	Sıfır emisyon	Çok düşük emisyon	Çok düşük emisyon
Menzil	100-200 km kısa menzil	Normal menzil	Yüksek menzil

2.3. Elektrikli Araçların Şarj Yöntemleri

Batarya bulunan bütün elektrikli araçlarda şarj yöntemi iki şekilde gerçekleşmektedir. Bunlar: iletken bağlantı ve endüktif (kablosuz) bağlantıdır (Hayes, 1998).

2.3.1. İletken bağlantı

Elektrik araçlarda bulunan bataryalar iletken aracılığıyla araca bağlanmakta ve aracın enerji kaynağından direkt şarj olması sağlanmaktadır. Bu şarj yönteminde araç ile enerji kaynağı teması olduğu için iletken olarak kullanılan malzeme ve bağlantı noktalarının güvenli olması önemlidir. Bu sebepten dolayı elektrik aktarım sistemlerinin tasarımında bağlantı noktalarının kapalı bir şekilde olması gerekmektedir (Hayes, 1998; Dhameja, 2001).

Elektrikli araçların şarj yöntemleri; Mod 1, Mod 2 ve Mod 3 olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır (Morrow ve diğ., 2008; Cogen, 2010). Bu yöntemlere ilave olarak kablosuz şarj tekniği son zamanlarda yapılan çalışmalar arasında yer almaktadır (Satılmış, 2011).

Mod 1; şarj yönteminde yerleşim veya iş yerlerinde araçların park halindeyken uzun süre şarj edilmelerini sağlayan sistemlerden oluşmaktadır (Yağcıtekin ve diğ., 2011).

Mod 2; şarj etme süresi Mod 1'e göre daha kısa, ortalama 1-4 saat süren ve araçları orta hızda şarj eden sistemlerdir (Şen ve diğ., 2011).

Mod 3; modlar arasında en hızlı şarj etme yöntemidir ve şarj etme süresi 15-30 dk arasındadır (Morrow ve diğ., 2008; Kezunovic ve diğ., 2011).

2.3.1.1. Şarj istasyonu tipleri

Şarj istasyonları genel olarak yavaş, normal ve hızlı olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır;

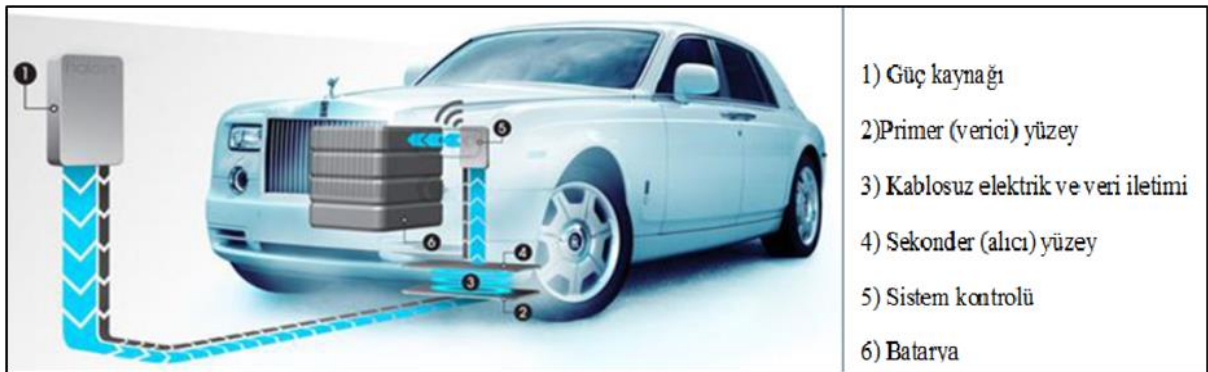
Yavaş Şarj İstasyonları: günlük yaşantıda konut ve iş yerlerinde bulunma süreleri genellikle uzun olmaktadır. Yapılan incelemeler bu sürenin 6 saatin üzerinde olduğunu göstermektedir. Doğal olarak taşıt sahipleri de bu sürelerde taşıtlarını park halinde bırakmaktadırlar. Uzun süreli park durumlarında elektrik şebekesine çok fazla yük getirmeyen yavaş şarj istasyonları kullanılmaktadır (Electric Power Research Institute [EPRI], 2002).

Normal Şarj İstasyonları: taşıt park etme sürelerinin 3 ile 6 saat arasında olduğu yerlerde normal şarj istasyonları kullanılmaktadır. Bu park yerleri için otoparklar, alışveriş merkezleri, sinemalar, piknik alanları gibi örnekler verilebilir (U.S Department of Energy [DOE], 2008).

Hızlı Şarj İstasyonları: Mod 3 olarak da adlandırılan hızlı şarj sistemleri enerji ihtiyacının acil gerektiği yerlerde, dinlenme tesislerinde ve yoğun trafiğin olduğu yerlerde kullanılmaktadır. Özel olarak koruma elemanları ile imal edilmesi gerektiğinden hızlı şarj istasyonlarının yüksek güvenliğini olmasına özen gösterilmektedir (Foley ve diğ., 2010).

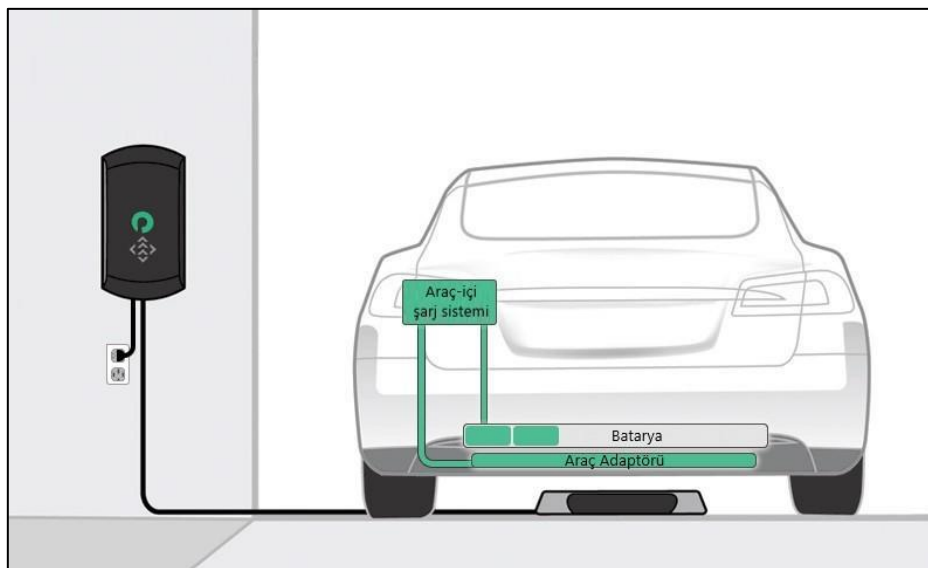
2.3.2. Endüktif (Kablosuz) bağlantı

Endüktif bağlantıda elektrikli araçların kablosuz şarj edilmesi üç farklı şekilde gerçekleşmektedir. Bunlar: statik (durağan), yarı dinamik ve dinamik (hareketli) şarj şeklindedir. Elektrikli araçların altında alıcı yani sekonder bobin bulunmaktadır. Kablosuz şarj sisteminde ise araçların şarj edilebilmesi için yol kaplamasının altında verici yani primer bobin yerleştirilmektedir (Özbey, 2020) (Şekil 2.6).



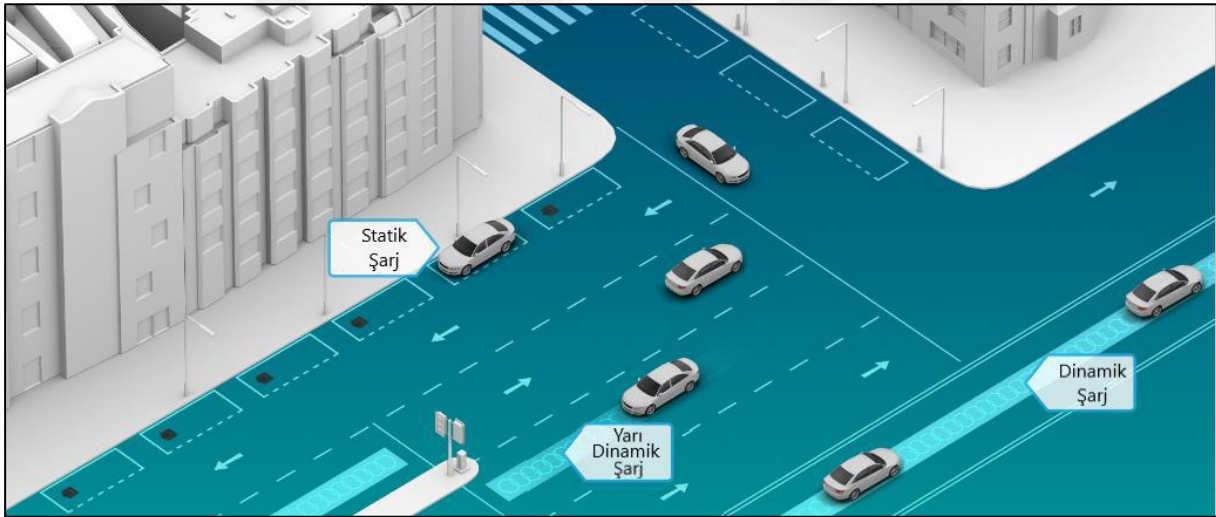
Şekil 2.6. Kablosuz şarj yöntemi (Geçyatan, 2015).

Statik şarj yönteminde aracın park halinde şarj edilmesi esas alınmaktadır. Bu sebepten dolayı genellikle statik şarj sistemleri, evlerde, otoparklarda, hastanelerde veya alışveriş merkezlerinde kurulmaktadır (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Statik şarj sistemi (Yamauchi, t.y.)

Yarı dinamik şarj yöntemi ise araç seyir halindeyken duraklama noktalarında aracın kısa bir süre dahi olsa şarj olmasını sağlayan sistemlerden oluşmaktadır (Şekil 2.8). Bu sistemler genellikle trafik ışıklarının olduğu yerlerde kurulmaktadır. Böylece kırmızı ışıkta araç kısa süreliğine şarj edilerek daha uzun mesafelerde hareket etmesi sağlanmaktadır. Dinamik şarj yönteminde ise araç hareket halindeyken şarj edilebilmektedir. Yolun belirli bir kesiminde elektrikli araçlar için özel olarak inşa edilen bu sistemde kaplama altına belirli aralıklarla yerleştirilen verici yani primer bobinler sayesinde aracın hız kaybetmeden şarj olması sağlanmaktadır. Dinamik şarj yönteminde bataryaların sürekli şarj edilmesiyle elektrikli araçların daha büyük kapasiteli bataryalara ihtiyacı %20 oranına kadar azalmaktadır (Musavi ve diğ., 2012).



Şekil 2.8. Kablosuz şarj yöntemleri (Sheng, 2020).

Kablosuz şarj teknolojisi kullanılarak bazı deneme kesimleri yapılmıştır. Örneğin, kamyonlar ve otobüsler için dinamik şarj sistemi inşa edilmiş ve dünyanın ilk kablosuz elektrikli yolu olarak pazarlanan Smartroad Gotland projesi, özel bir şirket olan ElectReon liderliğindeki bir konsorsiyum tarafından 2019-2020 yılları arasında uygulanmıştır. Proje için tasarlanan yol kesimi 1,6 km uzunluğundadır (Şekil 2.9). İsveç'in Gotland adasında bulunan deneme kesiminde şirket, gönderici yüzeyi ince bir asfalt tabakasının altına (8 cm kalınlığında) yerleştirmiş ve sırasıyla bir otobüs ve 40 tonluk bir kamyonun altına monte edilmiş üç ve beş alıcı yerleştirmiştir (Sundelin ve Tongur, 2020).



Şekil 2.9. Smartroad Gotland projesi (Smartroad Gotland, 2020)

Kore İleri Bilim ve Teknoloji Enstitüsü (KAIST) 2010 yılında Çevrimiçi Elektrikli Aracı (OLEV) geliştirmiş ve kablosuz şarjlı yol teknolojisini kullanan ilk toplu taşıma sistemi olarak piyasaya sunulmuştur (Lee ve diğ., 2010) (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Çevrimiçi Elektrikli Araç (OLEV) (Brecher ve Arthur, 2014).

Qualcomm Teknolojileri Firması (QTI), Qualcomm Halo projesiyle elektrikli araçların dinamik şarj yöntemi kullanılarak araçların şarj edilmesini sağlayan bir sistem geliştirmiştir. Fransa’da test alanı oluşturan şirket, 100 metrelik bir şeritte asfalt kaplamanın 20 cm altına iletimi sağlayacak plakalar yerleştirmiştir. Elektrikli araçların çalışabilmesi için gereken güç 10-13 kW arasında değişmekte olup, kaplama tabakası altına 20 kW’lık şarj plakaları konulmuştur (Davison, 2017) (Şekil 2.11).

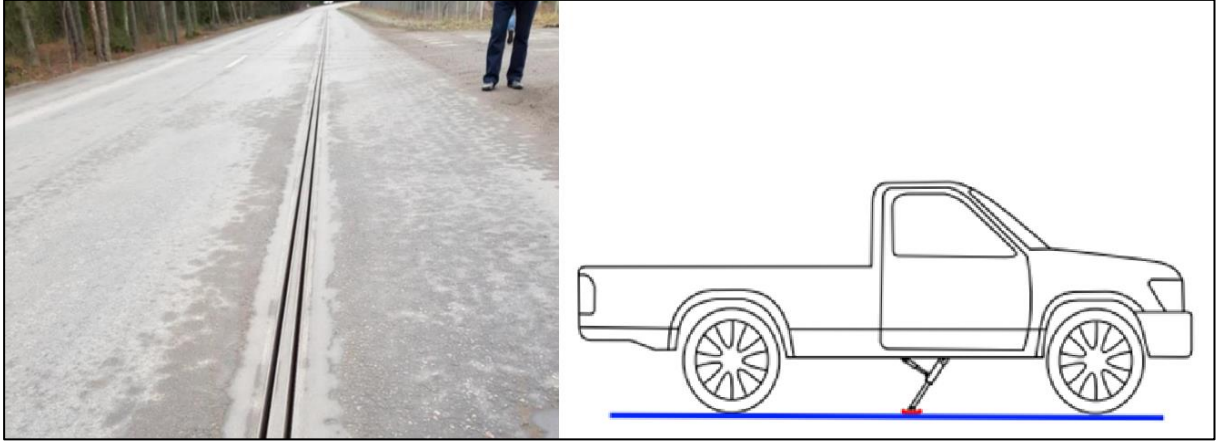


Şekil 2.11. Qualcomm Halo projesi (Davison, 2017).

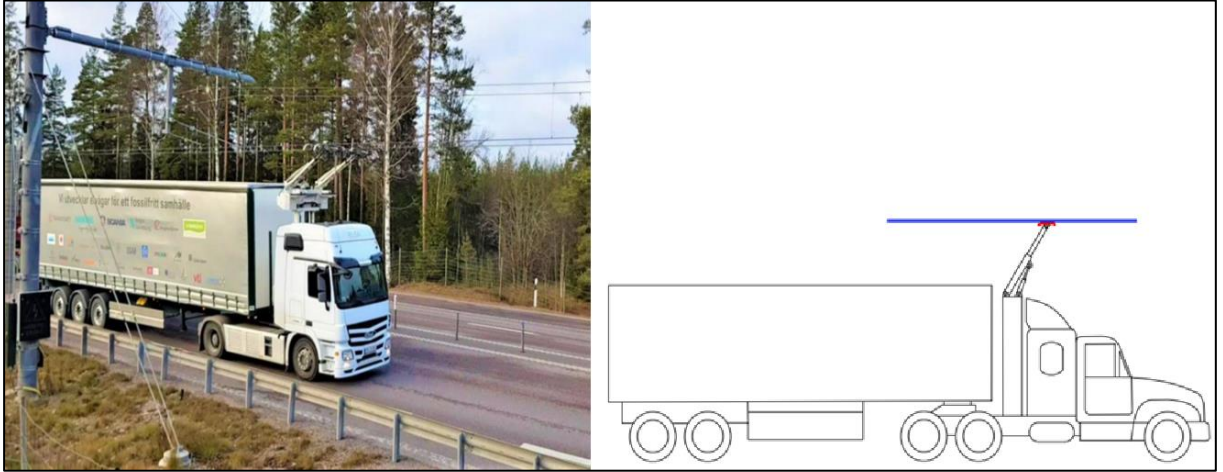
Dinamik şarj yöntemi için özel inşa edilen yollar farklı elektrikli yol teknolojilerinin gelişmesine yol açmıştır. Elektrikli yollar, elektrikli araçların şarj veya yakıt istasyonu gerektirmeden hareket etmesini ve hareket halindeyken şarj olabilmelerini sağlayan bir ulaşım teknolojisidir. Bu teknoloji sayesinde araçlar büyük pillere ihtiyaç duymadan uzun mesafe gidebilecek ve yakıta bağımlılık azaltılarak içten yanmalı motorların neden olduğu sera gazı emisyonu, hava kirliliği ve gürültü gibi çevreyi kötü yönde etkileyen etmenler ortadan kaldırılarak enerji verimliliğinin artması sağlanacaktır (Gustavsson ve diğ., 2021).

Elektrikli yol sistemleri; elektrik temini, yol, güç aktarımı, karayolu işletimi ve araç olmak üzere beş bileşenden oluşmaktadır. Elektrik arzı; elektriğin iletimi, dağıtımı ve yönetimi ile ilgilenirken, güç aktarımı; karayolu güç aktarımı, araç güç aktarımı ve kontrolü ile ilgilenmektedir. İnşa edilecek elektrikli yolların yapısı, bariyerleri ve yardımcı bileşenleri elektrikli yol sistemlerine uygun olarak tasarlanmalıdır. Araçlar ayrıca, güç aktarım alt sisteminden gelen elektriği aracın aküsüne veya tahrikine elektrik girişi olarak dönüştürecek donanıma sahip olmalıdır.

Elektrikli yollar: iletken raylı elektrikli, iletken kablolu elektrikli ve endüktif (kablosuz) elektrikli olmak üzere üç gruba ayrılmaktadır (Kaya, 2021). Bu teknolojilerden iletken raylı elektrikli yol teknolojisinde, raylar üstyapıya monte edilir ve aracın altında bulunan bir toplayıcı vasıtasıyla araç ile ray arasına güç aktarılır (Şekil 2.12). İletken kablolu elektrikli yol teknolojisinde güç, yol kenarına kurulan havai katener sistemleri aracılığıyla dağıtılır (Şekil 2.13).



Şekil 2.12. İletken raylı elektrikli yol örneği (Research Institutes of Sweden [RISE], 2021)



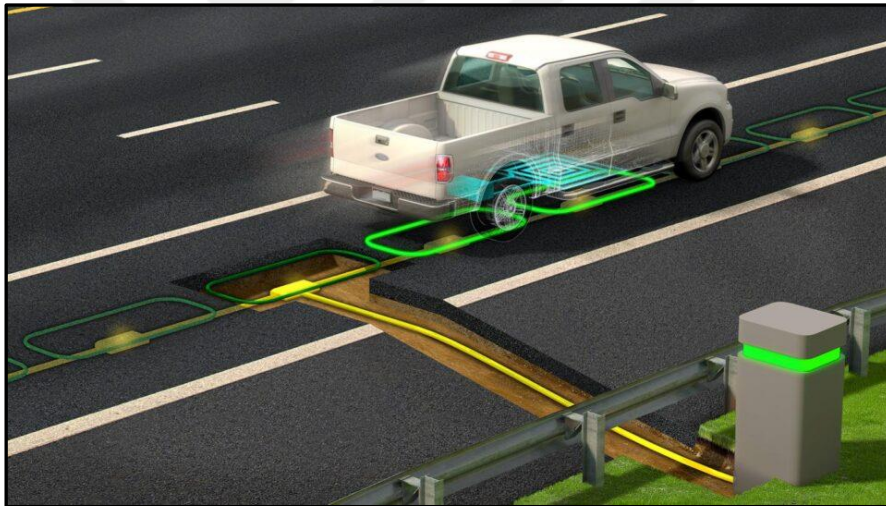
Şekil 2.13. İletken kablolu elektrikli yol örneği (Research Institutes of Sweden [RISE], 2021)

Endüktif (kablosuz) elektrikli yol ise dinamik kablosuz güç aktarımı olarak da adlandırılmaktadır (Şekil 2.14). Bu tür elektrikli yolların çalışma prensibi, enerjinin yol yüzeyinin altında bulunan bir bobinden (verici) hareket eden bir araca monte edilmiş başka bir bobine (alıcı) iletildiği endüktif teknolojiyi kullanmasına dayanmaktadır. Şarj süresi, kaynağın güç seviyesine, şarj plakasının boyutlarına ve her iki bobinin sargılarının arasındaki hava boşluğu mesafesine bağlıdır. Taşıt araçları için bobinler arasındaki ortalama mesafe yaklaşık 150-300 mm'dir (Panchal ve diğ., 2018).

Bu teknolojinin diğer iki elektrikli yol teknolojisine kıyasla birçok avantajı bulunmaktadır. Bu avantajlar arasında; araç ile yol yüzeyinin altındaki bobin arasında fiziksel bir temas

olmadığından dolayı bakım ve onarım ihtiyacının az olması, çevre dostu olması, kamyon, otobüs, otomobil ve otonom araçlar dahil her türlü aracın kullanabileceği bir platform oluşturması sayılabilir. Ayrıca, diğer iletken teknolojilere göre daha düşük güç değerlerine sahiptir (Ezer ve Tongur, 2020).

Yukarıda bahsedildiği üzere endüktif (kablosuz) elektrikli yol teknolojisi kablosuz olarak iki farklı bobin arasında güç aktarımı prensibine dayanmaktadır. Bu bobinlerden birisi yol yüzeyinin altına (verici), bir tanesi de (alıcı) aracın altına yerleştirilmektedir. Bu bobinler arası güç transferinin verimi, bobinler arasında kalan tabakaların (asfalt tabakası ve hava tabakası) elektromanyetik dalgaların iletimi ile ilişkilidir. Bobinler arasına yerleştirilecek asfalt tabakasının elektromanyetik dalgaları iletimindeki artışı sağlayacak şekilde tasarlanması, bobinler arası güç aktarım kaybını azaltacak ve enerji verimliliğini artmasını sağlayacaktır.



Şekil 2.14. Endüktif (kablosuz) elektrikli yol teknolojisi (Ezer ve Tongur, 2020).

2.4. Literatür Taraması

Literatür incelendiğinde asfalt betonunun elektromanyetik özelliklerini araştıran çalışmalar arasında; yol kaplamalarına uygulanan ve tahribatsız bir deney yöntemi olan Zemin Penetrasyon Radarı (Ground Penetrating Radar (GPR)) teknolojisiyle; üstyapı tabakalarının sıkışma miktarı ve yapısındaki kırık ve deformasyonların tespit edilmesi (Fernandes ve Pais, 2017; Lai ve diğ., 2018) ve mikrodalga teknolojisiyle asfalt betonunun ısıtılması sonucunda

yol kaplamalarında meydana gelen buzlanma ve kar birikmesinin engellenmesi gibi çalışmalar (microwave heating) (Gallego ve diğ., 2013; Norambuena-Contreras ve Garcia, 2016; Wang ve diğ., 2019; Trigos ve diğ., 2020) yer almaktadır.

Malzemelerin elektromanyetik özelliklerinin araştırıldığı çalışmalar daha çok çimento bazlı malzemelerin başka malzemelerle (metaller, polimerler veya inorganik metalik olmayan malzemeler gibi) modifiye edilerek elektromanyetik kalkanlama etkisinin artırılmasına (elektromanyetik geçirgenliğin düşürülmesi) yönelik olduğu gözlemlenmiştir (Cui ve diğ., 2017; Lv ve diğ., 2018; Öztürk ve diğ., 2020; Yeoh ve diğ., 2020; Xie ve diğ., 2020; Chen ve diğ., 2021). Yapılan bu çalışmalarda; karbon fiber (Wu ve Chung, 2002; Yang ve diğ., 2007), karbon siyahı (Geetha ve diğ., 2009; Kausar, 2016; Spahr ve diğ., 2017) gibi karbon bazlı malzemeler ve nanotüpler (Popov, 2004; Sun ve diğ., 2011), grafit ve grafenler (Geim, 2009; Das ve Prusty, 2013; Joshi ve Datar, 2015) gibi daha çok iletken malzemeler kullanılmıştır.

Ancak yapılan kapsamlı literatür araştırmasında doktora tezinin de özgünlüğünü ortaya koyan elektromanyetik dalgaların iletim özelliği artırılmış asfalt betonu üretimi ve endüktif (kablolu) elektrikli yol teknolojisinde kullanımının araştırıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

Daha önceki çalışmalar genel olarak; grafit, atık cam tozu, atık seramik agregası, kuvars, ferrokrom ve çelik cürufu agregalarının daha çok asfalt karışımların dayanım özelliklerine olan katkılarının araştırılması, asfalt kaplamalarında meydana gelebilecek deformasyonları en aza indirme veya oluşan deformasyonların kendi kendini iyileştirme özelliğinin araştırılarak geliştirilmesi ve asfalt karışımların elektriksel iletim özelliklerinin artırılarak yol kaplamalarında meydana gelen buzlanma veya kar birikmesinin engellenmesi gibi yani kısacası daha çok asfalt karışımların performanslarını iyileştirmek ve atık malzemeler için yeni bir kullanım alanı oluşturmak amacıyla yapılmıştır.

2.4.1. Grafit tozu ile ilgili yapılan çalışmalar

Wu ve diğ. (2002), iki farklı grafit türü olan kristalin grafit (doğal grafit) ve kristal grafit (başkalaşım geçirmiş grafit) malzemelerini, elektriksel direnci yüksek olan asfalt karışımların elektriksel iletkenliğini arttırmadaki etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada farklı oranlarda bu iki grafit malzemesini kullanarak asfalt numuneleri üretmişlerdir. Asfalt karışımının elektriksel

direnci $10^7 - 10^9 \Omega.m$ arasında iken grafit malzemesinin eklenmesiyle $5,1 \Omega.m$ değerine (%17 kristalin ve %5 kristalin grafit kullanıldığında) kadar düşmüştür. Yapılan analizler sonucunda her iki grafit türünün yakın oranlarda asfalt karışımın elektriksel direncini düşürerek elektriksel iletkenliği arttırdığını gözlemlemişlerdir. Grafitin elektriksel iletkenliği arttırmasını tünel etkisi ile açıklamışlardır. Tünel etkisi olayında; grafitin karışım içerisindeki miktarı arttırıldığında asfaltın doldurduğu boşluklar giderek azalmakta ve grafitin kendi aralarındaki bağ kuvvetlenerek asfaltın elektriksel direncini düşürmektedir. Ayrıca sıcaklığın elektriksel direnci etkilediğini de ortaya çıkarmışlardır. Sıcaklık arttığında karışımın elektriksel direnci yükselmiş ve karışım içerisindeki grafitin bağları zayıflamıştır. Grafit malzemesini asfalt karışımların elektriksel direncini azaltmada kullanarak elektrik iletkenliği yüksek asfalt betonlarının üretiminde kullanılabileceğini ortaya çıkarmışlardır.

Wu ve diğ. (2005), termoelektrik yöntemle kış aylarında yol yüzeylerinde biriken kar ve meydana gelen buzlanmaların ısıtılarak önlenmesi amacıyla asfalt karışımların içerisine termal ve elektriksel iletkenliği yüksek olan malzemelerden olan grafit tozu, karbon siyahı ve karbon fiberin katılmasıyla asfalt betonlarında meydana gelen mekanik değişimler ve elektriksel dirençleri incelemişlerdir. Çalışma sonucunda iletken malzemelerden oluşan bu katkıların malzeme oran limitini aştığı durumlarda asfalt betonlarında hem mekanik hem de elektriksel özellikleri olumsuz şekilde etkilediği ortaya çıkmıştır. Ayrıca asfalt betonlarının taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile görüntüleri alınarak karışım içerisinde katkı malzemelerinin oluşturduğu bağ yapısı ve asfalt betonlarının mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Sonuç olarak karışım içerisinde filler olarak kullanılan grafit tozu, karbon siyahı ve karbon fiberinin malzeme oran limitinin sırasıyla %10, %12 ve %5 olduğu ortaya çıkmıştır. Belirlenen bu oranlar aşıldığında ise bu malzemelerin asfalt betonlarının hem mekanik hem de elektriksel özelliklerini olumsuz etkilediği sonucuna varılmıştır.

Liu ve diğ. (2008), asfalt karışımında bulunan bağlayıcıyı %2, %5, %7 ve %9 oranında grafit tozu ile modifiye etmiş ve mineral tozlarla elde edilen geleneksel asfalt karışımların reolojik, mekanik ve termal iletim performanslarını karşılaştırmışlardır. Deneysel analizler sonucunda grafit malzemesi bağlayıcının yumuşama noktasını, tekerlek izi dayanımını, elektriksel ve termal iletkenliğini arttırdığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca grafit tozu ile hazırlanan asfalt karışımlarının yol kaplamalarında yüksek sıcaklıkta kendini iyileştirme özelliklerini geliştirebileceğini ve bunun sonucunda kaplama bakımının daha az olacağından dolayı

ekonomik açıdan da kazanç elde edilebileceğini öne sürmüşlerdir. Kısacası üstyapı tasarımı alanında grafit tozunun ‘akıllı malzeme’ olarak kullanılabilir olduğu savunmuşlardır.

García ve diğ. (2009), yaptıkları çalışmada grafit tozu ve çelik fiber içeren asfalt kaplamaların elektromanyetik indüksiyonla ısıtılmasını sağlayarak iletken malzemelerin, asfalt kaplamaların kendini iyileştirme özelliğine olan etkisini araştırmışlardır. Çalışmada asfalt karışıma grafit tozu ve çelik fiber katılmış ve karışım içerisindeki miktarı arttıkça elektriksel direncin azaldığı ve iletkenliğin arttığı gözlemlenmiştir. Ancak eşik seviyesi aşıldıktan sonra elektriksel direncin belirli bir seviyede kaldığı ortaya çıkmıştır. Bu durum katkı malzemelerinin miktarındaki artıştan dolayı malzeme arasındaki boşluk oranının azalması ve bunun sonucu olarak asfalt karışımında elektriksel iletkenliğin (elektron alışverişi) düşmesine neden olduğu sonucuna varmışlardır.

Xiaoming ve diğ. (2011), grafit tozu, karbon fiber ve bunların karışımını belirli oranlarda filler olarak kullanmış ve elde ettikleri karışımlardan ürettikleri asfalt betonlarının mekanik ve elektriksel özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Grafit tozu tek başına kullanıldığında (%10, %30 ve %45 oranlarında) Marshall Stabilite değerinin ve tekerlek izi dayanımının düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durumun grafitin zayıf katmanlı bir yapısı olmasından kaynaklandığı ve karışımın içerisinde grafitin kimyasal yapısını oluşturan bağların kopması sonucunda asfalt karışımın dayanımının düştüğü sonucuna varmışlardır. Ancak grafit tozunun iletken bir malzeme olmasından dolayı asfalt betonlarının elektriksel özelliklerini iyileştirdiği ortaya çıkmıştır.

Wu ve diğ. (2013), elektriksel iletkenliği olan çeşitli malzemeleri (bazalt, çelik cürufu, karbon fiber ve grafit) farklı konfigürasyonlarda kullanarak asfalt karışımlar hazırlamış ve elektriksel iletken asfalt betonu üretmişlerdir. Elde edilen asfalt betonlarının mekanik ve termoelektrik özelliklerini inceleyerek saha çalışmalarında da kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda grafitin asfalt betonlarının termal iletkenliğini artırdığı ancak tek başına kullanıldığında Marshall Stabilesini ve tekerlek izi dayanımını düşürdüğü gözlemlenmiştir. Ancak grafit diğer malzemelere göre karışım içerisinde katmanlı yapısı sayesinde en iyi dağılımı ve elektriksel iletkenliği gösterdiği ortaya çıkmıştır.

Pan ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada hidronik asfalt kaplamalarda uygulanmak üzere bitümlü bağlayıcıya %10, %20, %30 ve %40 oranlarında grafit tozu modifiye etmişlerdir. Hidronik asfalt kaplamaları aşınma tabakasının altında paralel şekilde yerleştirilen borulardan meydana gelmektedir. Bu sistem; yaz aylarında borulardan geçen yeraltı suları ile ısınan kaplamanın soğutulması ve kış mevsiminde yol yüzeylerinde oluşabilecek buzlanma ve kar birikmelerini yaz aylarında depoladığı güneş enerjisiyle eritebilmesi şeklinde çalışmaktadır. Bu çalışmada ise grafit tozunun asfalt kaplamalarının mekanik ve termal iletim performansına etkisi araştırılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, grafit içeriğinin artmasıyla termal iletkenliğin arttığı ve buna bağlı olarak daha fazla enerji depolanabildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca modifiye edilen bağlayıcının kısa ve uzun dönem yaşlanmasına karşı orijinal bağlayıcıya göre daha iyi performans gösterdiği ortaya çıkmıştır.

Wang ve diğ. (2017), yaptıkları çalışmada iki farklı boyuttaki grafit malzemesini (0,11 mm ve 15 nm) farklı oranlarda (bitümün ağırlıkça %2, %4, %5 ve %7 oranlarında) bitüm ile karıştırarak elde edilen modifiye bitümün termal, elektriksel, mekanik ve reolojik özelliklerini araştırmışlardır. Modifiye bitüm üzerinde yapılan Superpave deneyleri sonucunda, grafit malzemesi ile modifiye edilen bitümün tekerlek izi dayanımı, yorulma dayanımı, uzun ve kısa dönem yaşlanma direncinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca bitümün termal iletkenliğinde artış meydana getirerek asfalt karışımların kendi kendini iyileştirebilme özelliğine de katkı sağlayacağı ortaya çıkmıştır.

Wang ve diğ. (2018), yaptıkları çalışmada toplam agrega ağırlığının %5 ve %7 oranlarında normal agrega ile yer değiştirerek grafit malzemesini farklı boyutlarda (0,075 mm ve 0,15 mm) asfalt karışımlarda kullanmışlardır. Grafit malzemesinin asfalt betonlarının kendi kendini iyileştirmesine olan etkisinin araştırıldığı bu çalışmada mikrodalga radyasyonları gönderilerek numunelerin ısınması ve oluşan ısının etkisiyle de karışım içerisindeki bağlayıcı, asfalt betonunda oluşan mikro veya makro çatlakları doldurarak onarılmasını sağlamıştır. Grafitin iletken bir malzeme olması sebebiyle gönderilen mikrodalga radyasyonlarının asfalt betonu içerisinde oluşturduğu ısının iletimini ve absorpsiyonunu arttırdığı gözlemlenmiştir.

2.4.2. Atık cam ile ilgili yapılan çalışmalar

Su ve Chen (2002), asfalt karışımlarda atık cam kullanarak kaplama yüzeylerinin performanslarında meydana gelen etkileri incelemişlerdir. Karışımlarda atık cam agregası ince taneli agregaların (4,75 mm-0,075 mm) toplam ağırlığının %0, %5, %10 ve %15 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Atık cam ile oluşturulan karışımların stabilite, akma, permeabilite, soyulma ve yaşlanmaya karşı dayanımları incelemişlerdir. Ayrıca hazırlanan karışım ile belirli bir yol yüzeyi inşa edilerek asfalt kaplamanın; ışık yansımaları, kompaksiyon derecesi ve kaymaya karşı direncini test etmişlerdir. Yapılan analizler sonucunda atık cam malzemesinin karışım içerisindeki oranı arttıkça karışımın stabilite değerlerinde ve yaşlanma direncinde düşüş meydana gelmiş ve soyulmanın arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak cam malzemesinin düşük su emme özelliğinin olması ve bundan dolayı asfalt ile kuvvetli bir adezyon sağlayamadığı sonucuna varılmıştır. Ancak saha çalışmalarından elde edilen sonuçlarda atık camların yol kaplamalarında yansımaya neden olduğu ve bu durumun sürücülerin gece görüşlerinde fayda sağlayabileceğini savunmuşlardır.

Nicholls ve Lay (2002), asfalt karışımında agreganın ağırlıkça %30 oranında kırılmış atık cam kullanarak karışımın sıkıştırma ve işlenebilirlik performansını incelemişlerdir. Yapılan analizler sonucunda kırılmış cam içeren asfalt karışımların standart asfalt karışımlarına göre daha yüksek performans gösterdiğini ortaya çıkarmışlardır.

Jony ve diğ. (2011), sıcak karışım asfalt içerisine atık cam tozunu filler olarak eklemiş ve karışımın mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Toplam agreganın ağırlığının %4, %7 ve %10 oranında olacak şekilde atık cam tozu, Portland çimentosu ve kireç taşı tozunu filler olarak asfalt karışıma eklemiş ve elde edilen numuneler üzerinde Marshall Stabilite deneyi yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre %7 oranında atık cam tozu içeren numunelerin stabilite ve akma dayanımı diğer malzemelere göre yüksek çıkmıştır. Atık cam tozu kullanımının kaplama dayanımını artırmasının yanı sıra hem çevre sağlığına olan etkisi hem de ekonomik açıdan asfalt kaplamalarda katkı malzemesi olarak kullanılabileceğini vurgulamışlardır.

Bilondi ve diğ. (2016), geri dönüştürülmüş cam tozunun asfalt karışımlar üzerindeki etkisini araştırmıştır. Modifikasyonda cam tozunun yanı sıra kırıntı kauçuk (Crumb Rubber), Stiren

Bütadien Kauçuk (Stiren Butadien Rubber) ve Stiren Bütadien Stiren (Stiren Butadien Stiren) polimer malzemelerini kullanmışlardır. Marshall Stabilite deneyi sonucunda geri dönüştürülmüş cam ve diğer polimerlerle oluşturulan numunelerin mukavemetinin kontrol numunelerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Dolaylı çekme mukavemetinde ise polimer malzemeler ve geri dönüştürülmüş camlar kullanılarak oluşturulan numunelerde daha yüksek İndirekt Çekme Dayanımı (Indirect Tensile Strength (ITS)) değeri elde edilmiştir. En yüksek ITS değeri %5 geri dönüştürülmüş cam tozu ve %5 kırıntı kauçuğunun birlikte kullanılmasıyla elde edilen karışımda ortaya çıkmıştır.

Issa (2016), asfalt karışımlarına kullanılan agreganın ağırlıkça %5, %10 ve %15 oranlarında öğütülmüş cam ilave ederek test numuneleri hazırlamıştır. Testler sonucunda öğütülmüş cam içeren asfalt karışımlarının performansının normal asfalt karışımlarına göre arttığını gözlemlemiştir. Sonuç olarak atık camların asfalt kaplamalarda kullanımının düşük maliyetle yüksek performans sağlayabileceği ortaya çıkmıştır.

Lachance-Tremblay ve diğ. (2016), asfalt karışımlarda farklı oranda geri dönüştürülmüş atık cam agregası kullanarak karışımın mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Analiz sonucunda karışımda geri dönüştürülmüş cam kullanımının bağlayıcı içeriğini azalttığı, karışımın işlenebilirliğini artırdığı ve tekerlek izi direncini azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca asfalt karışımda %10 oranında geri dönüştürülmüş cam kullanılması, karışımın termal çatlamaya karşı direncini veya sertliğini etkilemediği ortaya çıkmıştır.

Arabani ve diğ. (2017), sıcak karışım asfaltlarda dolgu maddesi olarak atık cam tozu, atık tuğla tozu ve pirinç kabuğu külü kullanmış ve karışımın performans özelliklerini Marshall Stabilite deneyi ile test etmişlerdir. Cam atıklarının analiz edilen diğer atıklara göre karışımın mukavemetini artırdığı ve diğer performans özelliklerini iyileştirdiğini ortaya koymuşlardır.

Salem ve diğ. (2017) yaptıkları çalışmada günümüzde giderek yaygınlaşan cam malzemesinin kullanımı ve bunun sonucunda oluşan cam atıklarının yol tabakalarının inşasında kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Atık cam katılarak oluşturulan asfalt kaplama çalışmaları ‘Glassphalt Projects’ olarak adlandırılmış ve süregelen zaman boyunca kaplama performanslarının iyileştirilmesi amacıyla atık cam malzemesinin kullanılması gereken optimum miktar belirlenmeye çalışılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda atık cam malzemesinin

karışım içerisinde en fazla %25 oranında, ince taneli veya filler olarak kullanılması gerektiği savunulmuştur. Salem ve arkadaşlarının çalışmasında ise %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında, ince taneli boyutta (2,36 mm) atık cam kullanarak farklı optimum bitüm içeriklerinde sahip (%5,75; %5,615; %5,35; %5,65 ve %5,68) asfalt betonları üretmişlerdir. Analizler sonucunda asfalt karışımlarda atık camların optimum %10 oranında ve maksimum 2,36 mm boyutlarında kullanılması gerektiğini belirlemişlerdir. Atık camlar bu değerlerde kullanıldığında asfalt karışımların performanslarını olumlu yönde etkilediği ortaya çıkmıştır. Böylece atık camların asfalt kaplamalarda kullanılması ile çevre kirliliğinin de azaltılabileceği sonucuna varmışlardır.

Androjić ve Marović (2019) yaptıkları çalışmada farklı boyutlarda atık cam agregası içeren ve içermeyen asfalt karışımlarda (0-0,063 mm; 0,063-0,25 mm; 0,25-1 mm; 1-2 mm; 2-4 mm; 4-8 mm ve 8-11,2 mm) sıkıştırma enerjisinin ve optimum bitüm içeriğinin değişiminin asfalt numunelerinin yoğunluğu üzerindeki etkileri araştırmışlardır. Sıkıştırma işlemi Marshall tokmağı ile yapılmış ve numunenin her iki tarafına 35, 50 ve 75 defa olacak şekilde tokmakla vurularak yapılmıştır. Yapılan sıkıştırma işlemi sonucunda sıkışma enerjisi arttıkça her iki grup için hava içeriği azalmış ve numune yoğunlukları artmıştır. Ancak kontrol numunesinin yoğunluğu atık cam içeren numuneye göre daha yüksek çıkmıştır. Bu durumu kullanılan atık camın iri taneli parçalarının yassı bir şekilde olmasından dolayı sıkışmanın sağlıklı yapılamaması ve bunun sonucu olarak bitümle dolu boşlukların daha düşük çıkması olarak açıklamışlardır.

Du ve diğ. (2020), asfalt karışımının ısıl direncini artırmak amacıyla dolgu maddesi olarak kalker mineral filleri yerine cam mikroküre malzemesini kullanmışlardır. Cam mikroküre asfalt karışımının ısıl iletkenliğini %23,4 oranında azalttığı ortaya çıkmış ve bu durumun asfalt kaplamanın soğutma etkisinin iyileştirilmesinde faydalı olabileceğini savunmuşlardır. Ancak karışımın düşük sıcaklıkta çatlama direnci, deformasyona karşı direnç ve yorulma performansı üzerinde olumsuz etkisi olduğu ortaya çıkmıştır.

2.4.3. Atık seramik ile ilgili yapılan çalışmalar

Van de Ven ve diğ. (2011), asfalt karışımında kullanılan iri agregaları ağırlıkça %15'i oranında atık seramik agregası ile yer değiştirerek kullanmış ve karışımın mekanik özelliklerinde

meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Marshall Stabilite testi sonucunda asfalt betonu dayanımında %13 oranında azalma meydana gelirken agrega ile bağlayıcı arasındaki adezyonun da azaldığını gözlemlemişlerdir. Bu durumun atık seramik agregasının boşluklu yapısından dolayı su emme oranının yüksek olması sonucunda oluşabileceğini savunmuşlardır.

Muniandy ve diğ. (2012), taş mastik asfalt karışımlarında ağırlıkça %10 geleneksel kireç taşı dolgusunu atık seramik dolgularla değiştirerek taş mastik asfalt karışımının mühendislik ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yapılan testler sonucunda atık seramik dolgu maddesinin ilavesiyle yumuşama noktası, viskozite, stabilite ve elastisite modülünde artma, penetrasyonda ise azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca karışımın tekerlek izine karşı dayanım performansını iyileştirdiği ortaya çıkmıştır.

Feng ve diğ. (2013), sıcak karışım asfalta geleneksel agrega yerine seramik atıklarının karışımında eklemiş ve elde edilen karışımı yolun kaplama tabakasında kullanmışlardır. Çalışmada atık seramik karışımının performansında ve ısı iletkenliğinde meydana gelen değişimler araştırılmıştır. Yapılan testler sonucunda asfalt karışımlarda seramik atıklarının en fazla %40 oranında kullanılması gerektiği, bu oranın aşılması durumunda kaplamanın stabilite ve tekerlek izi direnci performansını düşürdüğü ve ısı iletkenliğini de azalttığı ortaya çıkmıştır.

Silvestre ve diğ. (2013), toplam agreganın ağırlıkça %5 oranında atık seramik kumu (0-4 mm) ve %25 oranında atık seramik agregası (4-11 mm) olmak üzere toplamda %30 oranında atık seramik malzemesi kullanarak asfalt karışımı hazırlamışlardır. Hazırlanan karışımlarla asfalt beton numuneleri üreterek stabilite, suya karşı dayanım ve kalıcı deformasyona (tekerlek izi dayanımı) karşı dayanımını ölçmüşlerdir. Yapılan analizler sonucunda atık seramik malzemesinin, gözenekli yapısından dolayı kireç taşı agregasına göre karışımında kullanılan bağlayıcı miktarının ve hava içeriğinin artmasına ayrıca suya karşı hassasiyeti yüksek bir malzeme olmasından dolayı da asfalt betonlarının dayanımının düşmesine sebep olduğu ortaya çıkmıştır. Ancak karışımın indirekt çekme ve plastik deformasyona karşı dayanımını artırdığı gözlemlenmiştir. Atık seramik malzemesinin karışımında en fazla %30 oranında, orta-düşük hacimli yollarda alternatif agrega olarak kullanılabilir olduğu sonucuna varılmıştır.

Kara ve Karacasu (2017) yaptıkları çalışmada atık seramik malzemesini sıcak karışım asfalta geleneksel agrega ile ağırlıkça farklı oranlarda (%0, %10, %20, %30 ve %40) yer değiştirerek

kullanmış ve asfalt betonunda meydana gelen mekanik değişimleri incelemişlerdir. Numuneler üzerinde Marshall Stabilite, dinamik ve statik sünme sertliği deneyleri yaparak atık seramik malzemesinin tekrarlı ve sabit yük altındaki davranışını incelemişlerdir. Atık seramik malzemesinin karışımdaki oranı arttıkça statik yük altında daha düşük performans göstermiştir. Ancak dinamik yükleme sonucunda ise %20 ve %30 oranında atık seramik içeren asfalt betonlarının dayanımının yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. Geri dönüşümü güç olan atık seramik malzemelerinin yol üstyapısında kullanılarak (karışım içerisinde %30 oranını geçmeyecek şekilde) bertaraf edilebileceğini savunmuşlardır.

2.4.4. Kuvars ile ilgili yapılan çalışmalar

Anderson ve diğ. (1992), kuvars ve kalsit mineralleri (filler formda) kullanılarak oluşturulan asfalt-filler mastiklerinin kaplama performansına etkilerini araştırmışlardır. Asfalt-filler mastik karışımlarının reolojik özelliklerinin belirlenmesinde Dinamik Kesme Reometresi ve Kiriş Bükme Reometresi deneyleri uygulanmıştır. Ayrıca karışımların kırılma ve kopma dayanımlarının geleneksel asfalt bağlayıcı ile kıyaslama yapılabilmesi için çekme dayanımlarını (Tensile Strength Ratio (TSR)) karşılaştırmışlardır. Yapılan analizler sonucunda karışımda kullanılan filler malzemesinin tekerlek izi ve yorulma dayanımını artırdığı ancak düşük sıcaklıklarda meydana gelen kırılma ve kopmaların karışımdaki asfalt bağlayıcının türüne bağlı olduğunu savunmuşlardır.

Mendonça ve diğ. (2024), yaptıkları çalışmada atık olarak ortaya çıkan izotropik ve yapraklı kuvarsit agregalarını asfalt karışımlarda kullanarak kaplama performansında meydana gelen değişiklikleri incelemişlerdir. Kuvarsit agregaları kullanılarak oluşturulan sıcak karışım asfaltların Brezilya çekme mukavemeti, neme karşı duyarlılık, esneklik modülü, yorulma dayanımı ve tekrarlı yük indirekt çekme testleri yapılmıştır. Ayrıca bu malzemelerin yol üstyapı katmanlarında göstereceği performansı bir yazılım programıyla (MeDiNa) sayısal deneyleri analiz ederek tahmin etmeye çalışmışlardır. Yapılan analizler sonucunda hem izotropik hem de yapraklı kuvarsit agregaları asfalt karışımların çekme dayanımı standart limiti aşmadan karşılamıştır. Ancak izotropik kuvarsit agregası içeren asfalt karışımının dayanımı yapraklı kuvarsite göre daha yüksek çıkmıştır. Her iki kuvarsit türü asfalt karışımların tekerlek izi ve yorulma dayanımında da gereken standartları karşılamıştır. Sonuç olarak kuvarsit agrega

atıklarının orta hacimli yolların yapımında üstyapı malzemesi olarak kullanılabileceğini ortaya koymuşlardır.

2.4.5. Ferrokrom ile ilgili yapılan çalışmalar

Lind ve diğ. (2001) yaptıkları çalışmada İsviçre’de 1994 yılında yeniden inşa edilen ve inşası sırasında asfalt kaplamasında 20.000 ton ferrokrom cürufu kullanılan yolun ve çevresindeki toprak zeminin yapısında meydana gelen değişimleri incelemişlerdir. Yolun kullanıma açılmasından bu yana kaplamada kullanılan ferrokrom cürufu ve diğer çevresel etmenlerle (asit yağmurları gibi) birlikte zeminde meydana gelen toksik etkiler araştırılmıştır. Ferrokrom cürufunu oluşturan krom, nikel, potasyum, çinko, magnezyum, silisyum ve alüminyum elementleri içerisinde liç kapasitesi en yüksek olan element potasyum (%16) olduğu ortaya çıkmıştır. Yolun alt tabakaları ve çevre zeminlerinden alınan numuneler üzerinde yapılan analizlere göre ferrokrom cürufu içerisinde bulunan krom elementinin bitkilerin kökleri tarafından absorbe edildiği ve cürufu oluşturan elementlerin çevreye yayılmasında bitkilerin tozlaşmasının etkili olabileceği savunulmuştur. Çalışma sonucunda ferrokrom cürufunun potasyum elementinin liç oranının yüksek olmasına rağmen standartları aşmadığı ortaya çıkmış ve yol tabakalarında geleneksel agregaya alternatif olarak kullanılabileceği ortaya çıkmıştır.

Zelic (2005), ferrokrom cürufu kullanılarak üretilen beton yolların kireç taşı agregasına göre basınç dayanımlarını karşılaştırmış ve cürufun aşınma, su emme ve donma-çözünme gibi mekanik özelliklerini araştırmıştır. Cüruf ve geleneksel agrega içeren beton numuneleri 350 dozlu olarak hazırlanmış, 7. ve 28. günler sonucundaki basınç dayanımları ölçülmüştür. Ferrokrom cürufu ile hazırlanan numunenin 28 gün sonundaki basınç dayanımı 57 MPa çıkarken kireç taşı agregası içeren numunenin basınç dayanımı 36,7 MPa çıkmıştır. Ayrıca agregaların belirlenen mekaniksel özelliklerini de göz önüne alarak çalışma sonucunda ferrokrom cürufunun kireç taşına göre üstünlüklerinin fazla olduğu ve beton yol kaplamalarında da kullanılabilir olduğu ortaya çıkmıştır.

Yılmaz (2008) yapmış olduğu doktora tezi çalışmasında Antalya Ferrokrom fabrikası atıklarından olan ferrokrom cürufu, silis cürufu ve silis dumanı malzemelerinin yol üstyapısında kullanılabilirliğini araştırmıştır. Malzemelerin öncelikle fiziksel, kimyasal, mekanik ve liç özelliklerini belirlemiştir. Sonrasında kendisinin geliştirdiği ve tezin özgünlüğünü ortaya koyan

dinamik üç eksenli deney cihazını geliştirmiştir. Bu deney aletiyle malzemelerin esneklik modülü, Poisson oranı ve tekrarlı yükler altındaki plastik deformasyonu belirlenmiştir. Ayrıca deney sonucunda elde edilen verilerle malzemelerin esneklik modülünü tahmin eden yapay sinir ağı modeli de geliştirmiştir. Ayrıca kullanılan atık malzemelerin asfalt karışımlarda kullanılan doğal agregaya göre sağladığı ekonomik maliyet kazancını karşılaştırmıştır. Çalışma sonucunda ferrokrom ve diğer atık malzemelerinin doğal agregaya göre hem dayanım açısından hem de maliyet açısından daha üstün olduğu ve sanayi atıklarının değerlendirilmesi açısından uygun bir yol olabileceği ortaya çıkmıştır.

Yılmaz ve Kök (2008), sıcak asfalt karışımlarda kullanılan agreganın tamamını ferrokrom cürufu ile hazırlamış ve performansını analiz etmişlerdir. Ayrıca asfalt karışımlarda bağlayıcının özelliklerini iyileştirmede kullanılan polimer çeşidi olan Strien-Bütadien-Strien (SBS) modifiyeli bitüm ile ferrokrom cürufu agregasından oluşan asfalt betonları üzerinde dayanım deneyleri yapmışlardır. Yapılan Marshall Stabilité ve İndirekt Çekme Mukavemeti deneylerinde yüksek değer %100 ferrokrom cürufu içeren asfalt betonlarında çıkmıştır. Ancak karışımın esnekliğinin korunabilmesi ayrıca ferrokromun özgül ağırlığının da yüksek olması sebebiyle karışımın özgül ağırlığını artırdığından dolayı asfalt betonlarında daha çok kaba agrega yerine kullanılması gerektiğini vurgulamışlardır.

Yılmaz ve Kardeş (2010) yaptıkları çalışmada çelik sanayisinin yan ürünü olarak ortaya çıkan atık ferrokrom cürufunun yol üstü yapı tabakalarında kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Öncelikle ferrokrom cürufunun fiziksel ve mekanik özelliklerini analiz ederek asfalt karışımlarda kullanılan geleneksel agrega (kireç taşı vb.) ile kıyaslaması yapılmıştır. Los Angeles, donma-çözünme ve su emme deneylerinden elde edilen sonuçlara göre ferrokrom cürufunun kireç taşına göre dayanımı yüksek bir malzeme olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca ferrokrom malzemesinin metal elementler içermesinden dolayı liç testi yapılmıştır. Böylece cürufun zehirli malzeme içerip içermediği tespit edilip zemin kirliliğine etkisi araştırılmıştır. En son olarak da asfalt karışım içerisinde geleneksel agrega ile belirli oranlarda yer değiştirerek elde edilen asfalt karışımlar üzerinde tekrarlı üç eksenli yükleme testi yaparak dayanımını araştırmışlardır. Ferrokrom cürufunun dayanımı yüksek zemini kirliletmeyen yol yapımında geleneksel agregaya göre tercih edilebilir bir malzeme olduğu ortaya çıkmıştır. Çelik endüstrisinde atık olarak ortaya çıkan bu malzemenin inşaat sektöründe kullanılabilmesi, çevre

kirliliğinin azaltılmasına ve doğal taş ocaklarının korunmasına da katkıda bulunabileceğini ifade etmişlerdir.

2.4.6. Çelik cürufu ile ilgili yapılan çalışmalar

Asi ve diğ. (2007), çelik cürufunun asfalt karışım performansına olan etkisini araştırmak amacıyla sıcak asfalt karışımında %0, %25, %50, %75 ve %100 oranında çelik cürufu agregasını geleneksel agregası (kireç taşı) ile yer değiştirerek kullanmışlardır. Superpave tasarımına göre elde edilen numunelerin dolaylı çekme mukavemeti, esneklik modülü, tekerlek izi direnci, yorulma dayanımı, sürünme modülü ve soyulma direnci performansları analiz edilmiştir. Ayrıca çelik cürufunun metalik bir malzeme olmasından dolayı toksik özellikleri incelenerek zemine verebilecek zararlar da incelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda çelik cürufunun karışım içerisinde %75 oranına kadar normal agregası yerine kullanıldığında asfalt karışımların performans özelliklerinde iyileşme meydana geldiği ortaya çıkmıştır. Ayrıca kimyasal yapısının zemine zarar vermeyecek derecede olduğu ve asfalt karışımlarda kullanılmasında bir sakınca olmadığını savunmuşlardır. Ancak her ne kadar çelik cürufunun yüksek oranlarda kullanılması karışımın performans özelliklerini iyileştirse de gözenekli yapıda oluşu daha fazla bağlayıcı ihtiyacına sebep olacağından dolayı karışımında en fazla %25 oranında kullanılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Ahmedzade ve Şengöz (2009), yaptıkları çalışmada çelik cürufu ve kireç taşı agregasını iri, ince ve filler formlarda viskozite sınıflandırmasına göre iki farklı bağlayıcı (AC-5 ve AC-10) ile karıştırarak asfalt betonu üretmiş ve deformasyonlara karşı dirençlerini karşılaştırmışlardır. Ayrıca Marshall tasarımına göre hazırlanan numunelerin elektriksel iletkenlik performanslarını incelemişlerdir. Yapılan analizler sonucunda çelik cürufu kullanılan karışımların dolaylı çekme sertlik modülü, stabilite ve akma dayanımı değerleri kireç taşına göre yüksek çıkmıştır. Dolaylı çekme sertlik modülünün yüksek olması karışım içerisinde bağlayıcı ile agreganın daha iyi yapıştığını göstermiştir. Ayrıca yapışmanın yüksek olması kaplamada nemden kaynaklı tekerlek izine karşı direncin yüksek olmasını sağlamıştır. Çelik cürufunun metal bileşenlerden oluşması sebebiyle karışımın elektriksel iletkenliğini artırdığı ortaya çıkmış ve buzlanmanın yüksek olduğu yerlerde yapılan termo-elektriksel yol kaplamalarında çelik cürufunun kullanılması gerektiğini ifade etmişlerdir.

Kehagia (2009), yaptığı çalışmada farklı oranlarda çelik cürufu agregası içeren kaplamaların kayma direncine karşı dayanımı test etmiştir. Yüksek trafik hacmine sahip olan yol üzerine inşa edilen ve çelik cürufu içeren karışımdan olan kaplama tabakasının on altı ay sonraki kayma direncini ölçmüştür. Elde edilen verilere göre %100 çelik cürufu agregası içeren kaplamanın en iyi kayma direncini gösterdiği ortaya çıkmıştır. Bunun sebebinin çelik cürufu agregasının Los Angeles aşınma değerinin geleneksel agregaya göre daha düşük olması ve bundan dolayı dayanımının yüksek olması olarak açıklanmıştır.

Behnood ve diğ. (2012), taş mastik asfalt karışımlarda çelik cürufunun kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Ek olarak karışımda kullanılan bitümü Stiren-Bütadien-Stiren (SBS) polimeri ile modifiye ederek karışımlarda kullanmışlardır. Çelik cürufu içeren ve Marshall tasarımına göre hazırlanan karışımlar üzerinde dolaylı çekme dayanımı, Marshall Stabilite analizi ve dinamik sünme testi yapmışlardır. Elde edilen sonuçlarda taş mastik asfalt karışımlarında çelik cürufunun kullanılması karışımın stabilite, esneklik modülü, çekme mukavemeti, nem hasarı ve kalıcı deformasyona karşı dayanımda yüksek performans göstermesini sağladığı ortaya çıkmıştır.

Hainin ve diğ. (2012), yaptıkları çalışmada farklı gradasyonlara sahip çelik cürufu içeren asfalt karışımların kalıcı deformasyona karşı dayanım performanslarını incelemişlerdir. Öncelikle Marshall tasarımına göre hazırlanan numunelerin stabilite, akma ve hava içeriğini incelemişlerdir. Çelik cürufu içeren asfalt betonlarının normal agregaya içeren numunelere göre stabilite ve akmaya karşı dayanım değerleri yüksek çıkmıştır. Ancak cürufun porozlu yapısında dolayı karışım içerisinde daha fazla bağlayıcıya ihtiyaç duyulmuştur. Daha sonra kalıcı deformasyona karşı performansı incelemek amacıyla esneklik modülü, tekerlek izi dayanımı ve sünme deneyleri uygulanmıştır. Deney sonuçlarına göre çelik cürufunun karışımlarda kullanılan geleneksel agregaya göre kalıcı deformasyona karşı daha yüksek dayanım göstermiştir. Ayrıca çelik cürufun yüksek ısı tutma kapasitesinden dolayı yol kaplamalarının yapımında kullanılması durumunda daha fazla enerji tasarrufu sağlayabileceğini belirtmişlerdir.

Maharaj ve diğ. (2017), çelik cürufunu sıcak asfalt karışım içerisinde geleneksel agregaya ile belirli oranlarda yer değiştirerek kullanmışlardır. Ancak karışım içerisinde cüruf iri taneli olarak kullanılmış ve toplam agreganın ağırlıkça en fazla %20 oranında olacak şekilde

eklenmiştir. Asfalt karışımlardan elde edilen numuneler üzerinde Marshall deneyi yapılmış, karışımın stabilite, hava içeriği, akma değeri ve özgül ağırlık değerlerini incelemişlerdir. Analizler sonucunda sıcak karışımlarda kullanılması gereken çelik cürufu agregası oranının en fazla %15 olması gerektiğini ortaya koymuşlardır. Çelik cürufunun boşluklu yapısı ve özgül ağırlığı yüksek bir malzeme olmasından dolayı karışım içerisindeki oranı arttıkça, karışımın hava içeriğinin şartnamede bulunan değeri aştığı ve stabilite değerlerinde azalma meydana geldiği gözlemlenmiştir. Çelik cürufunun esnek üstyapılarda belirli miktara kadar kullanılabilmesi sanayi atıklarının bertarafı ve yeniden kullanımı için iyi bir seçenek olabileceğini ifade etmişlerdir.

Zumrawi ve Khalil (2017), çelik cürufunu asfalt karışımlarında toplam agreganın ağırlıkça %50, %75 ve %100 oranlarında kireç taşı ile yer değiştirerek kullanmış ve Marshall tasarımına göre asfalt karışımları hazırlamışlardır. Ayrıca çelik cüruf ve kireç taşı agregaları üzerinde Los Angeles aşınma deneyi, su emme, özgül ağırlık ve soyulma deneyleri de yapmışlardır. Çelik cürufunun kireç taşına göre aşınma direnci daha düşük çıkarken özgül ağırlık değeri daha yüksek çıkmıştır. Bunun sebebi olarak çelik cürufunun ağır ve sert metallerden oluşan kimyasal bileşimini göstermişlerdir. Ancak çelik cürufunun su emme değerinin yüksek olmasını da porozlu yapısından kaynaklanabileceğini açıklamışlardır. Marshall Stabilite analizi sonucunda ise çelik cürufunun sert ve aşınma direnci daha düşük olan bir malzeme olmasından dolayı karışımın stabilitesini ve akma dayanımını artırdığını ifade etmişlerdir. Ayrıca bitüm ile dolu boşluk oranı yüksek ancak karışımdaki hava miktarı düşük çıkmıştır. Bu durumun sebebi olarak çelik cürufunun porozlu yapısı ve su emme değerinin yüksek olmasından kaynaklandığını belirtmişlerdir.

3. MATERYAL VE METOT

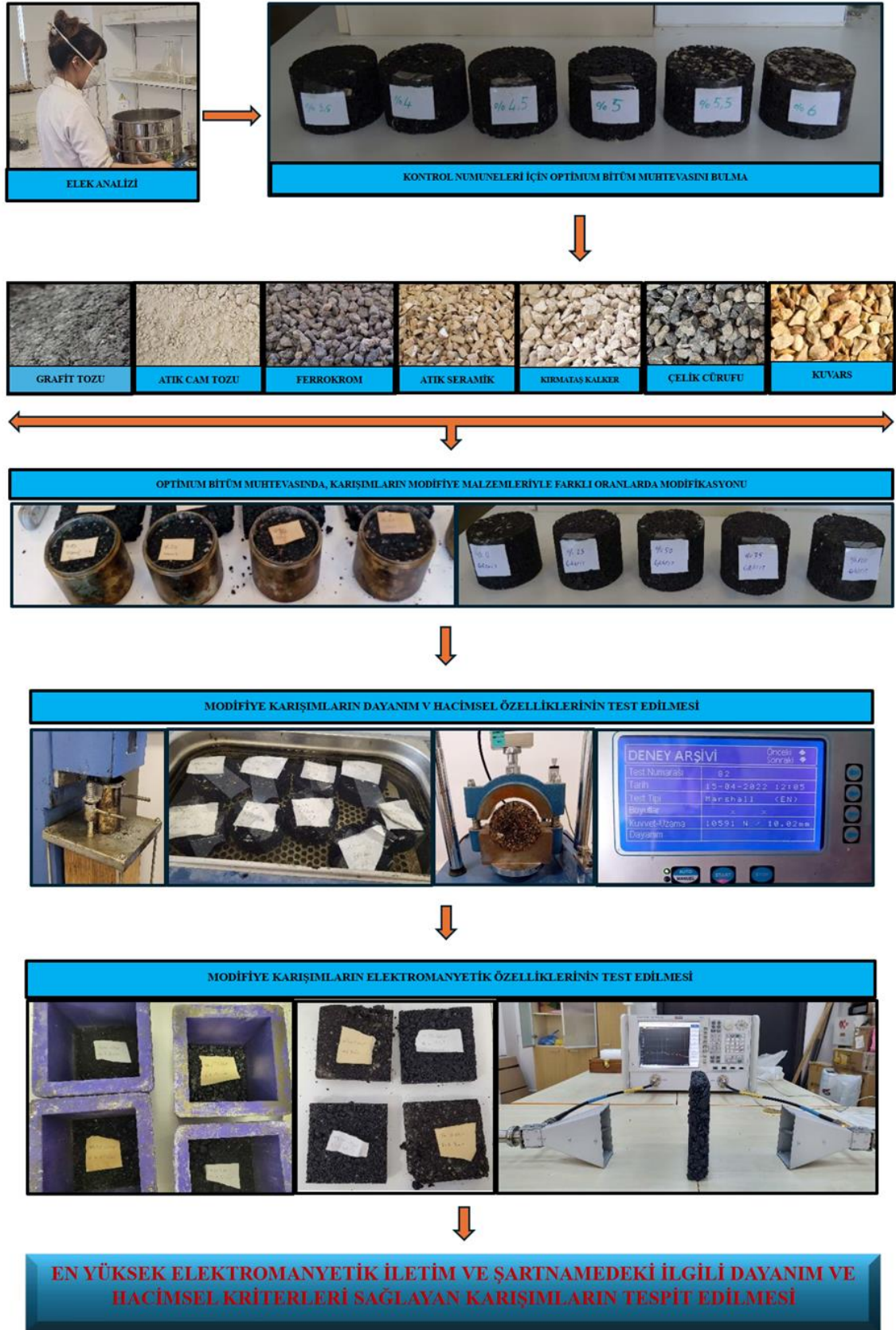
Tez çalışmasında malzeme olarak farklı kaynaklardan temin edilen atık seramik, kuvars, atık cam tozu, grafit tozu, çelik cürufu, ferrokrom ve kırmataş kalker agregası kullanılmıştır. Metot olarak agregaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi için, ilgili American Society for Testing and Materials (ASTM) standartları kullanılarak birim hacim ağırlık, su emme, elek analizi ve Los Angeles (aşınma) deneyleri yapılmıştır. Uygun gradasyonla elde edilen agrega ile ilk önce asfalt karışımının Marshall karışım tasarımı ile optimum bitüm içeriği belirlenmiştir. Optimum bitüm muhtevasıyla elde edilen ve çeşitli katkı malzemeleri içeren

numuneler üzerinde Marshall Stabilité deneyi yapılarak asfalt karışımların dayanımları tespit edilmiştir. Ek olarak asfalt karışımların ince ve parlak kesit analizleri ile ise Mikromorfolojik (doku/fabric) özellikleri incelenmiştir. Son olarak tezin özgünlüğünü ortaya koyan; asfalt kaplamaların elektromanyetik iletimini artırmaya yönelik malzeme araştırmasının son aşamasında yukarıda belirtilen katkılarla özel boyutlarda hazırlanan asfalt betonlarının Vektör Network Analizör cihazı ile elektromanyetik iletimi ölçülmüştür. Asfalt karışımında kullanılan agrega numunelerin gizlilik politikası uyarınca numune ve malzeme tedarikçilerinin tam isimleri ve yerleri burada sunulmamıştır. Tez çalışması kapsamında temin edilen agregaların listesi Tablo 3.1’de verilmiştir.

Tablo 3.1. Tezin deneysel çalışmasında kullanılan agregaların temin edildiği bölgeler

Agrega Çeşidi	Temin Edilen Bölge
Grafit Tozu	İstanbul
Atık Cam Tozu	Adana
Atık Seramik	Adana
Kuvars	İskenderun
Ferrokrom Cürufu	Elazığ
Çelik Cürufu	İskenderun

Doktora tezinin deneysel çalışma akış diyagramı Şekil 3.1’de verilmiş olup kullanılan malzemeler ve uygulanan yöntemler ise alt başlıklar halinde detaylı olarak bu bölümde sunulmuştur.



Şekil 3.1. Doktora tez çalışması akış diyagramı

3.1. Materyal

3.1.1. Bitüm

Tez çalışması kapsamında asfalt betonları üretiminde, Karayolu Teknik Şartnamesinde (2013) yer alan ve bitümlü bağlayıcı sınıfları içerisinde olan 70/100 penetrasyon sınıflı bitüm kullanılmıştır. Karayolları 5. Bölge Müdürlüğünden temin edilen 70/100 penetrasyon sınıfında olan bitümlü bağlayıcının fiziksel özellikleri Tablo 3.2’de verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda bitümün, ASTM standart limit değerlere uygun olduğu ortaya çıkmış ve karışım tasarımı kullanılmıştır.

Tablo 3.2. 70/100 Penetrasyon sınıfındaki asfalt bağlayıcının fiziksel özellikleri

Özellikler	Sonuçlar	Test Standardı
Penetrasyon Sınıfı (25°C)	77 (70/100)	ASTM D5
Yumuşama Noktası (°C)	48	ASTM D36/D36M
Özgül Ağırlık (g/cm ³)	1,040	ASTM D70-09e1
Düktilite (25°C)	>100 cm	ASTM D113-07
Parlama Noktası (°C)	280	ASTM D92-05a
Viskozite (135°C, cP)	312,5	ASTM D4402-06
Viskozite (165 °C, cP)	100,0	ASTM D4402-06

3.1.2. Agrega

Tez çalışmasında Seyhan/Adana bölgesinden temin edilen; 0-4,75 mm boyutunda ince agreg, 4,75-12,5 mm boyutunda iri agreg ve filler (<0,075 mm) boyutlu agregalar karışım içerisinde kullanılmıştır. Kullanılan agreg kırmataş kalker agregası olup agregaların fiziksel özellikleri Tablo 3.3.’de ve görselleri ise Şekil 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.3. Kırmataş kalker agregasının fiziksel ve mekanik özellikleri

Kırmataş Kalker Agregası	Özellikler	Sonuçlar	Test Standardı
Kaba Agregası	Görünen Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,727	ASTM C127
	Kütle Özgül Ağırlık(g/cm ³)	2,692	
İnce Agregası	Görünen Özgül Ağırlık(g/cm ³)	2,708	ASTM C128
	Kütle Özgül Ağırlık(g/cm ³)	2,654	
Filler	Kütle Özgül Ağırlık(g/cm ³)	2,732	ASTM C128
Kaba Agregası	Su Emme (%)	0,37	ASTM C128
Kaba Agregası	Aşınma Kaybı (%) (Los Angeles)	29,7	ASTM C131
Agrega Karışımının Birleşik Kütle Özgül Ağırlığı (Gsb) (g/cm ³)		2,678	ASTM C127
Aşınma Kaybı (%) (Los Angeles)		21,5	ASTM C131
Yassılık İndeksi (%)		17,0	ASTM D4791



(a)

(b)

(c)

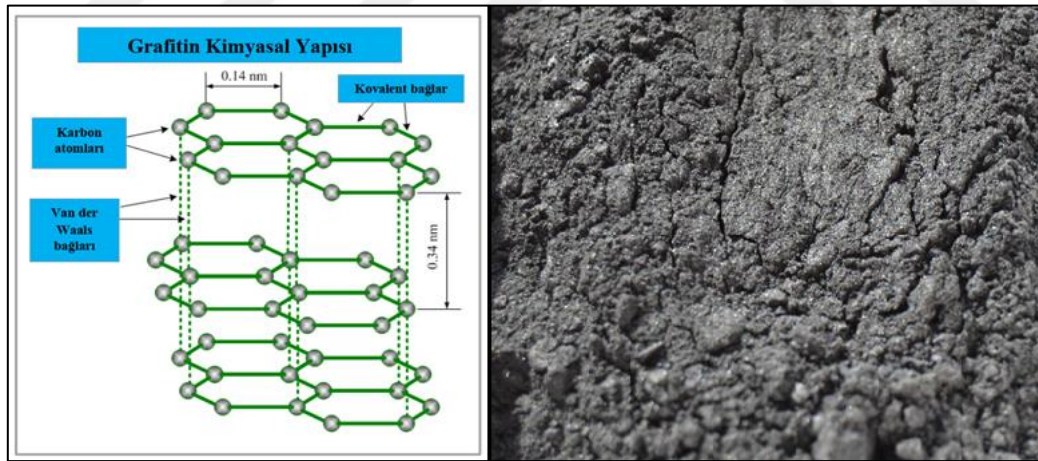
Şekil 3.2. Çalışmada kullanılan kırmataş kalker agregası (a: İri agregası, b: İnce agregası, c: Filler boyutlu agregası)

3.1.3. Grafit tozu

Grafit tozu yumuşak ve yağsı bir yapıda olan, siyah-gri renkte ve ince levha katmanlarından oluşan bir karbon mineralidir. Bir karbon atomunun en dıştaki elektron kabuğu, üçü kovalent bağlar tarafından kullanılan dört valans (değerlik) elektronuna sahiptir. İleri değerlik elektron kovalent bağlara katılmamakta ve elektron kabuğundan bir elektrik alanı ile serbestçe hareketi edebilmektedir. Bu elektronlar grafitin elektriksel iletkenlik özelliğini sağlamaktadırlar. Karbon atomlarının kovalent bağ ile kuvvetli bir şekilde bağlanarak hekzagonal şekilde birleşmesinden meydana gelen düzlemsel yapılar; Van der Waals bağları ile birbirine bağlanarak katmanlı yapıya sahip grafiti meydana getirmektedirler. Van der Waals bağlarının

zayıf bir bağ türü olmasından dolayı grafiti oluşturan levhalar birbiri üzerinde kolayca kaymakta ve grafitin yağlayıcı olma özelliğini kazandırmaktadır. Grafit tozuna verilecek en iyi örnek kurşun kalemlerin uç kısımlarıdır. Kurşun kalemlerin kağıt üzerinde bıraktığı iz grafit tozundan meydana gelmekte ve basıncın etkisiyle grafit levhaları arasındaki zayıf bağlar koparak kaygan bir şekilde hareket etmesini sağlamaktadır.

Grafit; asit, baz ve tuzlara karşı dayanıklı olup kimyasal reaksiyonlara karşı tepkisiz davranmaktadır. Elektriksel iletkenliği ve ısıya karşı dayanıklılığı yüksek olan bir malzemedir (Uysal, 2012a; Uysal, 2012b; Uysal, 2012c; EU Report, 2014). Özgül ağırlığı yaklaşık 2,15 g/cm³ olan grafitler geniş bir özgül yüzeye sahiptir (2630 m²g⁻¹) (Kök ve diğ., 2017). Çalışmada hazırlanan tüm asfalt karışımlarda, Karayolları Teknik Şartnamesinin (2013) filler için belirlediği sınırlar dahilinde (agrega karışımının %3-8'i) %5 oranında filler kullanılmıştır. %5 olarak belirlenen filler içeriğinden, toplam agrega karışımının %0; %1,25; %2,5; %3,75 ve %5 oranında kırmataş filler yerine grafit tozu kullanılmıştır (filler karışımı içerisindeki grafit tozu oranı %0, %25, %50, %75 ve %100 oranındadır). Şekil 3.3'te grafit tozunun kimyasal yapısı ve görseli verilmiştir.



Şekil 3.3. Grafit tozunun kimyasal yapısı ve görseli (“Karakteristikler ve Özellikleri,” t.y.)

3.1.4. Atık cam tozu

Cam; silikat ve oksitlerden oluşan inorganik yalıtkan bir malzemedir. Özgül ağırlığı 2,5 g/cm³ ve su emmesi %0,3-0,4 oranında olan camın 800 dereceye kadar olan sıcaklıklarda hacimsel stabilitesi yüksektir. Camın ısıya karşı duyarlılığının ve su emmesinin düşük olması sıcak asfalt

karışımlarda agrega olarak kullanılmasında olumlu bir etkiye sahiptir. Yol tabakalarının inşasında cam atıklarının kullanımı bilim insanları tarafından araştırılmış ve uygulanmıştır. Yapılan çalışmalarda farklı formlarda (kırılmış iri taneli, mineral veya toz) ve oranlarda kullanılan atık camların asfalt karışımlarda stabilitenin artmasını sağladığı ortaya çıkmıştır (Flynn, 1993; Jony ve diğ., 2011). Ancak araştırmalar sonucunda cam malzemesinin agrega karışımının ağırlıkça %30'dan fazla katılmasının asfalt karışımının stabilitesini düşürdüğü ortaya çıkmıştır (Jony ve diğ., 2011; Issa, 2016; Tahmoorian ve diğ., 2018; Du ve diğ., 2020). Bu sebepten dolayı tez çalışmasında atık camın toz halinde filler olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Cam tozu, atık cam şişelerinden çeneli kırıcıda parçalanarak elde edilmiştir (Şekil 3.4). Çalışmada hazırlanan tüm asfalt karışımlarda, Türk Karayolları Teknik Şartnamesinin filler için belirlediği sınırlar dahilinde (agrega karışımının %3-8'i) %5 oranında filler kullanılmıştır. %5 olarak belirlenen filler içeriğinden, toplam agrega karışımın %0; %1,25; %2,5; %3,75 ve %5 oranında kırmataş filler yerine atık cam tozu kullanılmıştır (filler karışımı içerisindeki atık cam tozu oranı %0, %25, %50, %75 ve %100 oranındadır). Şekil 3.5'te atık cam tozunun görseli verilmiştir.



Şekil 3.4. Çalışmada kullanılan atık camların öğütülmesinde kullanılan çeneli kırıcı aleti



Şekil 3.5. Atık cam tozu

3.1.5. Atık seramik agregası

Seramikler; metal veya yarı metalin ametal elementlerle birleşmesi sonucunda ortaya çıkan inorganik bileşiklerdir. Seramik malzemeleri oluşturan elementler; iyonik veya kovalent bağ ile birbirine bağlanarak karmaşık bir yapıya sahip olmaktadır. İçerisindeki bileşen miktarı, çeşidi ve bileşenlerin bağlanma düzeninin değiştirilmesiyle yalıtkan olan bir seramik malzemeye iletken özellik kazandırılabilir. Seramik malzemeler; geleneksel seramik malzemeler ve ileri teknoloji seramik malzemeler olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Tez çalışması kapsamında kullanılan atık seramik (fayans) genel seramik malzeme sınıfına girmektedir. Karışımda kullanılan atık seramik agregaları atık fayansların çeneli kırıcıda öğütülerek farklı boyutlara getirilmesi sağlanmıştır (Şekil 3.6).

Geleneksel seramikler doğada bulunan hammaddelerden olan kil, silika ve feldispat bileşiminden oluşmaktadır. Seramiklerin oldukça dayanıklı bir malzeme olması, biyolojik, kimyasal ve fiziksel bozunmaya karşı oldukça dirençli olmasından dolayı geri dönüşümü zor bir malzemedir (Senthamarai ve diğ., 2005). Geri dönüştürülemeyen inorganik endüstriyel atık seramiklerin, sürdürülebilirliğe ve çevrenin korunmasına katkıda bulunmasına yardımcı olmak amacıyla araştırmacılar yol yapımında kaba ve ince agrega veya dolgu maddesi olarak eklenmesi gibi çalışmalar yapmışlardır (Huang ve diğ., 2009; Chen ve diğ., 2011; Feng ve diğ., 2013). Yapılan çalışmalarda karışımda kullanılan atık seramiklerin oranının geleneksel agrega

oranından düşük tutulması gerektiği ortaya çıkmıştır (toplam agreganın ağırlıkça en fazla %40 oranında) (Van de Ven ve diğ., 2011; Muniandy ve diğ., 2012; Silvestre ve diğ., 2013). Bunun sebebini boşluklu yapısından kaynaklı olarak su emmesinin (yaklaşık olarak %14) ve aşınma kaybının (yaklaşık %29) yüksek olması ayrıca karışımdaki seramik malzeme oranı arttıkça stabilite ve tekerlek izi direnci performansında azalmaya neden olması olarak gösterilmiştir (Huang ve diğ., 2009; Silvestre ve diğ., 2013; Kara ve Karacasu, 2015). Kaplamalarda bu tür dayanım performanslarının şartnamelerin altına düşmemesi istenir. Bu sebepten dolayı tez çalışmasında asfalt karışımında atık seramik, asfalt karışımlarda kırmataş agregasıyla ile ağırlıkça %5, %15 ve %25 oranlarında yer değiştirilerek katılmıştır. Şekil 3.7’de atık seramik agregasının görseli verilmiştir.



Şekil 3.6. Atık seramiklerin çeneli kırıcıda öğütülmesi ve elenerek gradasyonlara ayrılması



Şekil 3.7. Atık seramik agregası

3.1.6. Kuvars agregası

Kuvars, yeryüzünde en fazla ve yaygın olarak bulunan metamorfik ve tortul kayaç minerallerinden biridir. Silisyum dioksitten (SiO_2) oluşan kuvars minerali sıcaklık ve basınca dayanıklı metamorfik ve tortul kayaç grupları bileşenlerinden biridir (Kurşun ve diğ., 1995; Boran ve diğ., 2021). Katı haldeki saf kuvarslarda temel olarak alüminyum (Al), titanyum (Ti), magnezyum (Mg), sodyum (Na) ve lityum (Li) elementleri bulunmaktadır. Genel olarak renksizdir ancak içerisinde bulunan bileşenlere göre renkleri farklılaşabilmektedir (örneğin içerisinde demir oksit bulunuyorsa rengi kahverengi ve tonlarında olmaktadır). Ergime sıcaklığı (1785°C) çok yüksek olan kuvars minerali yalnızca hidroflorik asit ile tepkimeye girerek çözünmektedir (Yüçetürk, 2010). Mohs sertlik cetvelinde sertlikleri 7, özgül ağırlığı $2,65 \text{ gr/cm}^3$ 'tür. Su emme oranı %0,5 ve Los Angeles aşınma kaybı %16,2'dir. Ayrıca kuvars minerali piezoelektrik özellik gösteren bir malzemedir (Kantarçeken ve diğ., 2021). Piezoelektrik malzemeler yüksek basınç ve sıcaklık altında elektrik enerjisi üretebilen malzemelerdir (Smith ve Rhodes, 1994). Kuvars mineralinin Piezoelektrik malzeme oluşu ve dayanımın yüksek olmasından dolayı tez çalışmasında agrega olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Tez çalışması kapsamında kuvars minerali asfalt karışımlarda kırmataş agregasıyla ile ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında yer değiştirilerek katılmıştır. Şekil 3.8'de kuvars agregasının görseli verilmiştir.



Şekil 3.8. Kuvars agregası

3.1.7. Ferrokrom cürufu

Krom cevherinin ark fırınlarında fiziko-kimyasal işlemlere tabi tutulması sonucunda yan ürün olarak ferrokrom açığa çıkmaktadır. Türkiye’de ferrokrom sadece Antalya ve Elazığ’da üretilmektedir (Yılmaz ve Yıldız, 2015). Ferrokrom cürufu; silisyum (Si), alüminyum (Al), magnezyum (Mg), krom (Cr), nikel (Ni), demir (Fe), kalsiyum (Ca) elementlerinin oksitlerini içermektedir (Barišić ve diğ., 2010; Zhang ve diğ., 2015). Bu cüruf türünün havada yavaş soğumaya bırakılmasıyla kristal bir form kazanmaktadır. Kristal formunu almasıyla birlikte ferrokrom cürufu yüksek mekanik özellikler göstermektedir (Yılmaz, 2002; Kalyoncu, 2003).

Özgül ağırlığı $2,93 \text{ g/cm}^3$ olup aşınma kaybı %16,4’ tür. Karayolu teknik şartnamesine göre aşınma değerinin, asfalt tabakalarında kullanılan agregalar için %45 ten az olması gerekmektedir (KTS, 2013). Ferrokromun dayanımı yüksek bir malzeme olmasından dolayı yol inşaatlarında kırmataş agregası ile birlikte kullanımı artmaktadır. Böylece hem sanayiden çıkan ve atık yan ürün olan ferrokromun bertarafı sağlanmış olmakta hem de dayanımı yüksek yol tabakaları inşa edilmektedir. Elazığ Ferrokrom İşletmesinden elde edilen ferrokrom cürufu, asfalt karışımlarda kırmataş agregasıyla ile ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında yer değiştirilerek katılmıştır. Şekil 3.9’da ferrokrom cürufunun görseli verilmiştir.



Şekil 3.9. Ferrokrom cürufu

3.1.8. Çelik cürufu

Sanayileşmenin artmasıyla birlikte ortaya çıkan atıkların bertaraf edilmesi giderek büyük bir problem haline gelmektedir. Metal üretim endüstrisi bu sorunu en fazla yaşayan sektörler arasındadır. Bu durumun sonucu olarak üretim sırasında ortaya çıkan atıkların başka alanlarda da kullanma araştırmaları hız kazanmıştır. Çevrenin korunması ve sürdürülebilirlik adına sanayilerden çıkan atık ürünlerin inşaat malzemesi olarak değerlendirilmesi hem sağlık hem de ekonomik açıdan çok büyük fayda sağlamaktadır. Metal üretim tesislerinde yan ürün olarak ortaya çıkan çelik cürufunun inşaat malzemesi olarak birçok alanda kullanımı araştırılmakta ve uygulanmaktadır. Malzeme dayanımının yüksek olması beklenen alanlarda çelik cürufu; asfalt agregası, beton agregası, çimento katkı malzemesi ve klinker malzemesi olarak çalışmalarda kullanılmıştır (Conjeaud ve diğ., 1981; Montgomery ve diğ., 1991; Tüfekçi ve diğ., 1997; Tsakiridis ve diğ., 2008; Iacobescu ve diğ., 2011; Serjun ve diğ., 2015; Guinoa ve diğ., 2015; Rondi ve diğ., 2016).

Çelik cürufunun Mohs sertlik derecesi 5-7 arasında olup asfalt ve beton karışımlarda kullanılan geleneksel agregaya göre daha yüksek sertlik özelliğine sahiptir (Wen ve diğ., 2016). Yüksek miktarda metal elementleri içeren çelik cürufunun içerisinde kalsiyum oksit (CaO), hematit (Fe_2O_3), magnezyum oksit (MgO), titanyum dioksit (TiO_2), difosfor pentaoksit (P_2O_5)

bileşikleri bulunmaktadır (Yıldırım, 2011). Metal elementlerin yoğun olması (demir elementi gibi) cürufun ağır olmasına neden olmaktadır. Bu durumda özgül ağırlığı da yüksek bir değerdedir (3,43 g/cm³). Aşınma değerinin ise %22,2 olması şartnameye uygun olup asfalt karışımlarında kullanılmasına olanak sağlamaktadır (Shen ve diğ., 2009; Yıldırım, 2022). Ancak su emme oranının yüksek olması (%2,28) ve bundan dolayı oluşabilecek hacimsel genleşmelerden sakınmak amacıyla araştırmacılar tarafından karışımlarda filler malzeme olarak kullanılmaması gerektiği vurgulanmıştır (Noureldin, 1990; Maslehuddin ve diğ., 2003; Ahmedzade ve diğ., 2009; Wu ve diğ., 2009; Ameri ve diğ., 2013). Tez çalışmasında asfalt karışımlarında hem içeriğinde metal elementlerin olması hem de dayanımı yüksek bir malzeme olmasından dolayı çelik cürufu agregası kullanılmıştır. Çelik cürufu, asfalt karışımlarında kırmataş agregasıyla ile ağırlıkça %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında yer değiştirilerek katılmıştır. Şekil 3.10'da çelik cürufunun görseli verilmiştir.



Şekil 3.10. Çelik cürufu

3.1.9. Asfalt betonunda kullanılan katkı malzemelerinin elektriksel özellikleri

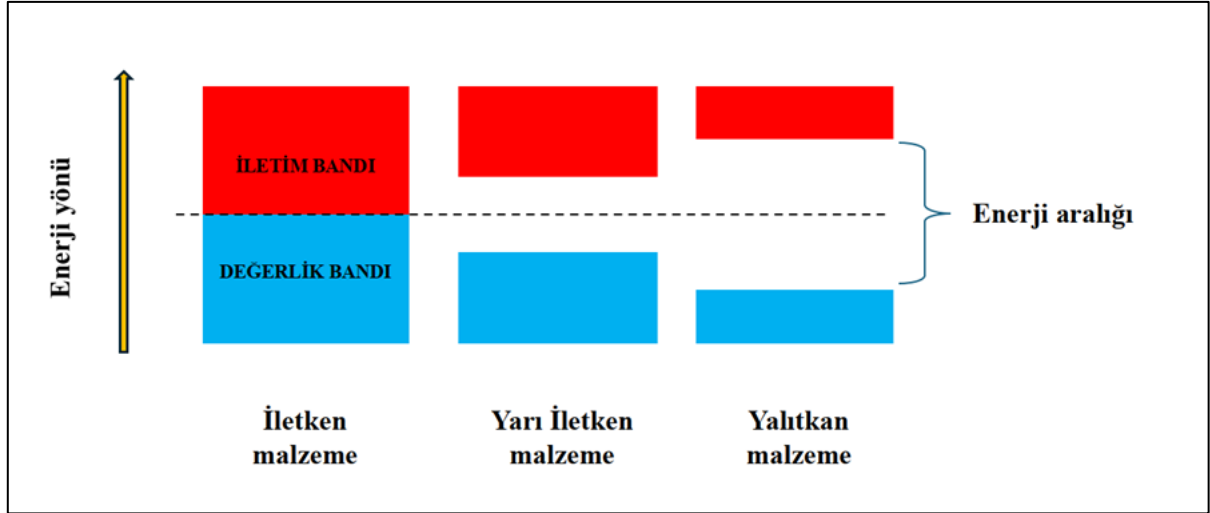
Endüktif (kablosuz) elektrikli yol teknolojisi, aracın (alıcı) ve yol yüzeyinin (verici) altına yerleştirilen bobinler arasındaki elektromanyetik dalgalar ile iletilen güç transferinden oluşmaktadır. Aktarılan bu gücün verimliliği bobinler arasındaki asfalt ve hava tabakasının elektromanyetik iletimine bağlı olmaktadır. Bobinler arasına yerleştirilecek asfalt tabakasının

elektromanyetik dalga iletiminin (elektromanyetik geçirgenlik) artması, bobinler arasındaki güç aktarımındaki kaybı azaltacak ve enerji verimliliğini artıracaktır. Tez kapsamında asfalt betonu içerisinde kullanılan katkı malzemelerinin elektriksel özelliklerinin araştırılması asfalt betonunun elektromanyetik iletimin artırılması açısından önemlidir.

3.1.9.1. *Malzemelerin dielektrik özellikleri ve dielektrik geçirgenlik*

Malzemelerin dielektrik özellikleri dielektrik katsayısı ile tanımlanmaktadır. Dielektrik sabiti; bir malzemenin üzerinde yük depolayabilme kapasitesini tanımlamak amacıyla kullanılan bir terimdir. Literatürde bu terim ayrıca ‘yalıtkanlık sabiti’ olarak da geçmektedir (Harrop, 1972; Düşmez, 2015; Gürer ve diğ., 2017). Özetle dielektrik malzemeler, herhangi yüklü bir parçacığın serbestçe hareketine izin vermediğinden dolayı genel olarak yalıtkan malzemelerdir denilmektedir. Dielektrik malzemelerin daha iyi anlaşılması için yalıtkan, iletken ve yarı iletken malzemelerin iletim şekilleri ‘Bant teorisi’ ile açıklanmaktadır (Şekil 3.11).

Bant teorisi; malzeme içerisindeki elektronların hareketlerini tanımlamaktadır. Malzemenin iletim özelliğinin sağlanabilmesi için serbest hareket eden elektronların ve elektron boşluğunun olması gerekmektedir. Ayrıca özdirencinin de düşük olması gerekmektedir. Bant teorisine göre tüm malzemelerde elektronlar tarafından doldurulan değerlik (valans) bandı ve iletim bandı bulunmaktadır. Elektronların iletim için bu iki bant arasında bulunan enerji aralığını yenerek iletim bandına geçmeleri gerekmektedir. Metallerde bu bantlar bitişik ve iç içe geçmiş durumdadır; dolayısıyla elektronlar boş olan iletim bandına daha rahat geçiş yaparak iletimi sağlayabilmektedir. Ancak yalıtkan malzemelerde bu enerji aralığının çok geniş olması sebebiyle iletim bandına geçiş sağlanamamakta ve bunun sonucunda elektrik akımı iletilememektedir (Gurov, 2008; Lökçü, 2013).



Şekil 3.11. Malzeme içerisinde bulunan bant yapısı

Yalıtkan ortamlar, elektromanyetik enerjinin büyük bir kısmının saçılmadan geçişine izin vermektedirler. Yalıtkan bir ortamda bir elektromanyetik alan meydana geldiğinde, alan tarafından yer değiştirmeye zorlanan yüklerin hareket miktarının ölçüsü dielektrik geçirgenlik olarak tanımlanır. Yalıtkan bir ortamda elektrik alan şiddeti arttığında, elektriksel yer değiştirme hareketi ile enerji bu ortamda depolanmaktadır. Elektrik alan azaldığı zamanda ise ortam depoladığı enerjiyi serbest bırakmakta ve yer değiştirme akımlarını oluşturmaktadır. Bir maddenin bağıl dielektrik geçirgenliği; o madde elektromanyetik enerjiyle yüklendiğinde, enerjiyi depolama ve daha sonra elektromanyetik enerjinin geçişine izin verme kapasitesi olarak tanımlanmaktadır (Von Hippel, 1954). Bağıl geçirgenlik katsayısı, bir maddenin elektrik geçirgenliğinin, boşluğun elektrik geçirgenliğine oranı ile hesaplanmaktadır. Ortamların elektriksel geçirgenlikleri; onların bileşimleri, nem içeriği, hacim yoğunluğu, gözeneklilik, sıcaklık ve fiziksel yapılarına bağlıdır (Olhoeft, 1981).

Elektromanyetik dalgaların iletiminde ve hızında malzemenin bağıl dielektrik sabiti etkili olmakta ve meydana gelen değişimlerde (malzeme ya da ortamın) elektromanyetik dalgaların yansıması veya iletilmesi değişebilmektedir. (Weeds, 1994). Bağıl dielektrik geçirgenlik katsayısı; dielektrik katsayısı (ortamda depolanabilen enerji, imajiner kısım) ve kayıp faktörü (kaybolan enerji, sanal kısım) değerlerinden oluşmaktadır. Elektromanyetik geçirgenliğin sanal kısmı, dalgaların emilimi nedeniyle oluşan kaybı niceliksel olarak belirtmektedir. EM dalga iletiminin daha verimli olabilmesi açısından kayıp faktörünün daha düşük olması gerekmektedir.

Dış etkenlerden dolayı malzemenin dielektrik özelliği değişim gösterebilmektedir. Dielektrik malzemenin oluştuğu atomların dış yörüngelerinde bulunan elektronların ayrılması sonucu madde iletken özellik kazanmaktadır. Alternatif bir gerilim uygulandığında ise ısınma meydana gelmekte ve açığa çıkan ısı bu gerilimin frekansı ile artış göstermektedir. Ortaya çıkan ısının nedeni dış alanda meydana gelen gerilimden kaynaklı olarak moleküllerin birbiriyle sürtünme hareketidir. Diğer moleküllerle olan sürtünmelerden dolayı molekülün değişen alanı takip etmesinde gecikmeler yaşanmaktadır. Meydana gelen bu olaylar; dielektrikte ısıya dönüşen enerji yani “dielektrik kayıp” olarak adlandırılmaktadır. Sıcaklık artıkça dielektrik maddenin termal enerjisinde artış meydana gelmekte ve dielektrik kayıplara sebep olmaktadır (Neamen, 1997).

Kaba agrega, ince agrega, asfalt bağlayıcı ve mineral dolgudan oluşan asfalt karışımlarda elektromanyetik dalgaların iletiminin artırılmasında kullanılan malzemelerin dielektrik özellikleri etkili olmaktadır. Asfalt karışımlarının dielektrik sabitleri genel olarak 4 ile 10 arasında olup, elektromanyetik geçirgenliği düşük bir malzeme olduğu gözlemlenmiştir (Porubiaková ve Komačka, 2015). Asfalt betonlarını oluşturan malzemelerin dielektrik katsayıları Tablo 3.4’te verilmiştir.

Tablo 3.4. Asfalt betonlarını oluşturan malzemelerin dielektrik katsayıları (Porubiaková ve Komačka, 2015).

Malzeme	Dielektrik Katsayısı
Hava	1
Asfalt karışımı	4-10
Beton	5-9
Agrega	6-18
Su	81

Tez çalışması kapsamında asfalt karışımlarda hem yalıtkan hem de iletken malzeme kullanılmıştır. İletken olarak kullanılan malzemelerin geniş elektromanyetik dalga frekanslarında ve farklı malzemelerin eklenmesiyle yapılan farklı alanlardaki çalışmalarda karmaşık dielektrik özelliği kazanmasına sebep olduğu ortaya çıkmış; bu durumdan dolayı sonsuz ve değişken değerlerde dielektrik katsayıları olduğu tespit edilmiştir (Kakimoto ve diğ., 1987; Kumar ve diğ., 2009; SandhyaRani ve diğ., 2013; Azadmanjiri ve diğ., 2014). Yalıtkan malzeme olarak kullanılan cam ve seramik malzemelerinin dielektrik katsayıları ise genel

olarak 3,7 ile 8,8 arasında değişmektedir. Bu malzemelerde de içerisindeki bileşenlerin çeşitliliği ve değişkenliği sebebiyle dielektrik katsayı değeri farklılıklar göstermektedir (Cohen, 1968; Kocabağ, 2002; Kremer ve diğ., 2003; Kumar ve diğ., 2009; Wang ve diğ., 2019; Trigos ve diğ., 2020).

Literatürde asfalt betonlarının elektromanyetik özelliklerinin araştırılması; asfalt betonların mikrodalga teknolojisi ile ısıtılması ve yol tabakalarında meydana gelen deformasyonların tespit edilmesi için yapılan ve tahribatsız bir test yöntemi olan Yer Radarı Yöntemi (GPR) ile ilgili çalışmalarda görülmektedir (Gallego ve diğ., 2013; Norambuena-Contreras ve Garcia, 2016; Fernandes ve Pais, 2017; Lai ve diğ., 2018; Wang ve diğ., 2019; Trigos ve diğ., 2020). Çoğunlukla çimento esaslı malzemelerin başka malzemelerle (metaller, polimerler veya inorganik metalik olmayan malzemeler gibi) modifiye edilerek elektromanyetik kalkanlama etkinliklerinin (elektromanyetik geçirgenliğin düşürülmesi) arttırıldığı çalışmalar da bulunmaktadır (Cui ve diğ., 2017; Lv ve diğ., 2018; Öztürk ve diğ., 2020; Xie ve diğ., 2020; Yeoh ve diğ., 2020; Chen ve diğ., 2021). Ayrıca literatürde özellikle çevrenin korunması ve sürdürülebilirlik amacıyla asfalt betonlarında atık malzemelerin kullanıldığı çalışmaların çoğu karışımların elektriksel iletkenliğini araştırma odaklı olduğu görülmüştür (Wu ve diğ., 2005; Liu ve diğ., 2008; Stempihar ve diğ., 2012; Zheng ve diğ., 2015; Hassn ve diğ., 2016; Wang ve diğ., 2018; Dan ve diğ., 2019; Zhang ve diğ., 2019; Chen ve Balieu, 2020; Du ve diğ., 2020).

Tez çalışmasının konusu olan ve özgünlüğünü ortaya koyan; kablosuz elektrikli araç teknolojileri kapsamında farklı yüzdelerde; grafit tozu, atık cam tozu, kuvars, atık seramik, ferrokrom ve çelik cürufu içeren asfalt betonunun elektromanyetik geçirgenliğini ve bileşenlerin Mikromorfolojik (doku/fabric) özelliklerini araştıran bir çalışmaya rastlanmamıştır.

3.2. Metot

3.2.1. Elek analizi

Elek analizi deneyi agregaların tane büyüklüğü dağılımını belirlemek amacıyla yapılan bir deneydir. Karışım içerisine konulacak agregaların boşlukları dolduracak şekilde şartnamede belirlenmiş miktarlarda her türlü tane sınıfından olması önemlidir. Agreganın numunesi

içerisindeki tanelerin büyüklüklerine göre dağılımına gradasyon, agregada tanelerin dağılımını gösteren eğriye de gradasyon eğrisi denir (ASTM C136). Tez çalışması kapsamında yapılan elek analizi deneyinde asfalt karışımı içerisinde kullanılacak olan agregalar 24 saat etüvde bekletilmiştir. Agregaların havada kurutulmasından sonra 4,75 mm’lik elekten (4 nolu elek) elenerek iri ve ince agrega olarak ikiye ayrılmıştır. 4,75 mm’lik elek üzerinde kalan iri taneli agregalar; 12,5 mm ve 9,5 mm’lik eleklerden, 4,75 mm’ lik elek altında kalan ince taneli agregalar ise 2,00 mm, 0,425 mm, 0,180 mm, 0,075 mm eleklerden elenerek gradasyonlarına ayrılmıştır. Tavada kalan agrega ise filler (<0,075 mm), olarak alınmıştır. Eleme işlemi sırasında elek üzerinde kalan agrega alınarak tartılmış ve % kalan miktarları Denklem 3.1’ den hesaplanmıştır.

$$\text{Kalan(\%)} = \frac{\text{Elekte Kalan}}{\text{Toplam Numune Miktarı}} \times 100 \quad (3.1)$$

Elek üzerinde kalan numuneler belirlendikten sonra her elekten geçen numunelerin yığışımli ağırlık yüzdeleri hesaplanmış ve toplam ağırlığın yüzdesi haline getirilerek elekten geçen yığışımli ağırlık yüzdesi bulunmuştur. Elek üzerinde kalan yığışımli toplam ağırlığın yüzdesi hesaplanarak karışımdaki agrega gradasyonunun uygunluğunun belirlenmesi amacıyla İncelik modülü Denklem 3.2’den hesaplanmıştır.

$$\text{İncelik Modülü} = \frac{\sum \text{Elek Üzerinde Kalan Agregaların Yığışımli Yüzdesi}}{100} \quad (3.2)$$

3.2.2. Özgül ağırlık deneyi ve su emme tayini

Özgül Ağırlık, belirli hacim ve sıcaklıktaki bir malzemenin havadaki ağırlığının aynı hacim ve sıcaklıktaki suyun havadaki ağırlığına oranı olarak tanımlanmaktadır. Su emme deneyi ise suya doymuş yüzeyi kuru olan agreganın, kuru agregaya göre içerdiği su oranını belirlemek için yapılmaktadır. Her iki deney şekli agreganın tane boyutlarına göre farklı şekillerde uygulanmaktadır. Bu deneyler ASTM C127 ve ASTM C128 standartlarına göre yapılmaktadır. Deneylerin yapılma amacı karışımda kullanılacak agregaların su emme davranışına göre dayanımlarının belirlenebilir olmasıdır. Su emme oranı yüksek olan agregalar boşluklu yapıya sahip olmaktadır. Bu durum agreganın dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir. İnşaat

yapılarında yüksek dayanımın sağlanması için karışımın iskeletini oluşturan agregaların su emme oranının düşük olması istenmektedir.

Asfalt karışımında kullanılan agregaların özgül ağırlık ve su emme tayini aşağıdaki şekilde yapılmıştır (Şekil 3.12, Şekil 3.13);

1. Hazırlanan numune yıkanarak su içinde 24 saat bekletilmiştir.
2. Su içerisinde çıkarılan numune yüzeyi kurularak suya doymun kuru yüzey haline getirilmiş ve tartılmıştır.
3. Arşimet terazisi ile sudaki ağırlıkları tartılmıştır.
4. Suda tartımı yapılan agregalar bir tepsiye boşaltılarak etüve konulmuş ve sonrasında tartılarak etüv kuru ağırlığı bulunmuştur.
5. Aşağıdaki Denklem 3.3, 3.4 ve 3.5 ile özgül ağırlığı ve su emme oranı hesaplanmıştır.

$$\text{Birim Hacim Ağırlık(kg/m}^3\text{)} = \frac{m_1}{m_1 - m_2} \quad (3.3)$$

$$\text{Su Emme (\%)} = \frac{m_1 - m_3}{m_3} \times 100 \quad (3.4)$$

$$\text{Görünen Özgül Ağırlık (\%)} = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (3.5)$$

Formülde;

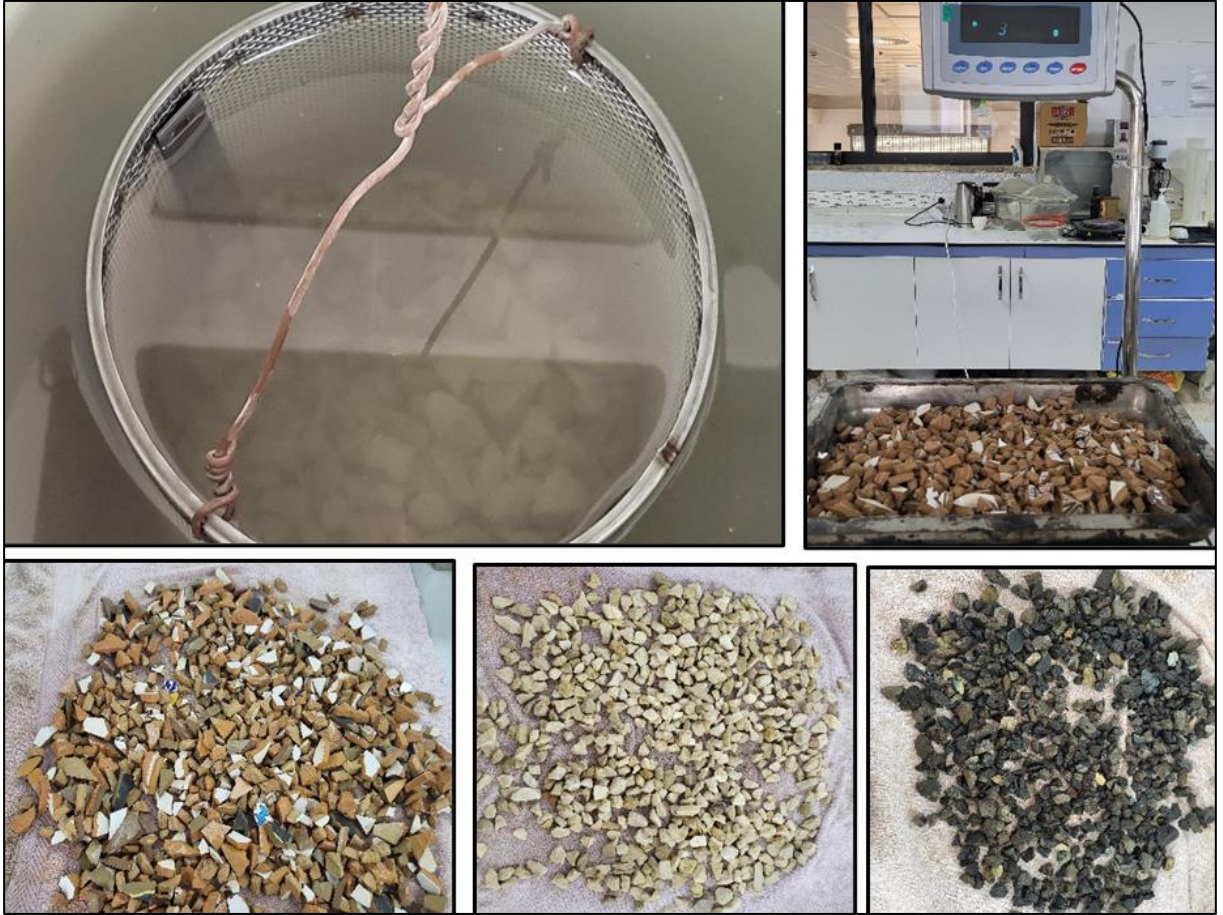
m1: Suyu doymun havada ağırlık (kg),

m2: Su içerisinde asılı ağırlık (kg),

m3: Etüv kurusu ağırlık (kg), değerlerini ifade etmektedir.



Şekil 3.12. Agregaların 24 saat suda bekletilmesi ve etüvde kurutulması



Şekil 3.13. Agregaların Arşimet terazisinde ölçümü ve özgül ağırlık ve su emme deneyleri için ölçümlerin alınması

3.2.3. Los Angeles (Aşınma) deneyi

Los Angeles deneyi iri agregaların dış etken ve darbelere karşı direncini belirlemek amacıyla uygulanan deney yöntemidir. Deneyde kullanılan cihaz kendi eksenini etrafında dönebilen tambur ve agreganın aşınmasını sağlayan çelik bilyelerden oluşmaktadır. Tez kapsamında çalışılan elek aralığı için ASTM C131 standardına göre 12,5 mm-10 mm ve 8 mm-5 mm arasında kalan agregalardan eşit oranda olacak şekilde toplamda 5000 g agrega elenerek alınmış ve yıkanarak etüvde kurutulmuştur. Kurutulan agregalar tartılmıştır. Standartta göre sayısı belirlenen bilyeler (10 adet) ve agrega numuneleri tamburun içerisine yerleştirilmiştir. Kapağı sıkıca kapatılan tambur 31 devir/dakika ile 33 devir/dakika arasında sabit hızda 500 devir döndürülmüştür. İşlem sona erdiğinde tambur içerisindeki agrega malzeme kaybı oluşmamasına dikkat edilerek tepsiye dökülmüştür. Aşınmaya uğrayan numuneler 1,6 mm'lik elekten elenerek üzerinde kalan numune tartılmıştır (Şekil 3.14). Los Angeles Aşınma deneyi için Karayolu teknik şartnamesinde (KTŞ, 2013) karışımda kullanılacak agregaların aşınma kaybının %45'ten az olması gerektiği belirtilmiştir. Los Angeles aşınma oranı Denklem 3.6'dan hesaplanmıştır.

$$LA (\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (3.6)$$

Formülde;

M1: Etüv kurusu ağırlık (g),

M2: Aşınmadan sonra 1,6 mm elek üzerinde kalan ağırlık (g), değerlerini ifade etmektedir.



Şekil 3.14. Los Angeles (Aşınma) deney aşamaları

3.2.4. Marshall Metodu ile karışım tasarımı ve Marshall Stabilite deneyi

Tez çalışması kapsamında ASTM D 6927-22 standardına göre yapılan Marshall tasarım deneyi, bitümlü sıcak karışımların optimum bitüm içeriğini tayin etmek amacıyla yapılmaktadır. Ayrıca bu karışım tasarımında yapılan Marshall Stabilite analizinde bitümlü karışımlara ait özgül ağırlık, stabilite, akma, boşluk, bitüm ile dolu boşluk (VFA) ve mineral agregalar arası boşluk (VMA) gibi değerlerin ölçülmesiyle; trafik yükleri altında yol tabakalarında meydana gelebilecek sıkışmanın, akma ve stabilite düşüklüğü olmadan, tabakalar içerisinde sıkışmaya izin verecek düzeyde hava içerecek ölçüde boşluk olması sağlanmaktadır. Ayrıca stabilitesi yüksek bir üstyapı için gerekli bitüm miktarı belirlenmesi ve ayrışma meydana gelmeyecek şekilde işlenebilir asfalt karışımların oluşturulmasında Marshall tasarımı büyük önem arz etmektedir.

Marshall deneyine başlanmadan önce elek analizinde gradasyonlarına ayrılan agregalar içerisinde ayrışmaya sebep olabilecek olası nemin giderilmesi amacıyla 24 saat etüvde kurutulmuştur. Karışımın kolay işlenebilir ve karıştırılabilir olması amacıyla bitüm ise 160-170 °C’de 2-3 saat bekletilmiştir. 12,5 mm; 9,5 mm; 4,75 mm; 2,00 mm; 0,425 mm; 0,180 mm; 0,075 mm elekler üzerinde kalan ve fillerden oluşan agregaların yüzdelерinin, şartname değeri olan 1150 gramın yüzdesi ile çarpılması sonucunda agrega dağılımı elde edilmiştir. Karışımın optimum bitüm içeriğini tayin etmek amacıyla şartname değelerine göre artış gösteren 6 farklı bitüm yüzdesi kullanılmaktadır. Farklı oranlarda belirlenen bitüm içeriği için en az 3 adet numune hazırlanmaktadır. Sıkıştırma işleminden önce kullanılan numune kalıpları, mikser karıştırma aletleri ve spatula gibi metal aparatlar da etüv içerisine yerleştirilerek ısıtılmıştır. Isıtma işleminden sonra agrega ve asfalt çimentosu mekanik karıştırıcı ile homojen bir dağılım elde edilene kadar 2-3 dakika karıştırılmıştır.

Elde edilen sıcak asfalt karışımı 101,6 mm çapında ve 76,2 mm yüksekliğindeki kolay çıkarılabilmesi amacıyla iç yüzeyi yağlanmış ve tabanına numune kalıbının çapı ölçüsünde kesilen filtre kağıdı konulan kalıp yerleştirilmiştir. Hazırlanan numune 4536 g ağırlığındaki otomatik tokmak kullanılarak şartnamede ağır trafik şartlarına göre belirtilen tasarımda her iki tarafı 75 darbe vuruşu yapılarak sıkıştırılmıştır (Şekil 3.15).



Şekil 3.15. Marshall numune kalıbı ve otomatik tokmak

Hazırlanan numuneler oda sıcaklığına kadar bekletildikten sonra kriko yardımıyla kalıplardan çıkarılmıştır. Elde edilen numuneler 24 saat oda sıcaklığında bekletilmiş ve sıkışma yükseklikleri 3 farklı yerden ölçülmüştür. Sonrasında numunelerin havada, oda sıcaklığında bulunan suda ve suya doymun yüzey kuru durumundaki tartımları yapılmıştır (Şekil 3.16).



Şekil 3.16. Marshall numunelerinin suda ve havada tartımları

Numunelerin akma ve stabilite değerlerini ölçmeden önce numuneler 60 derecelik suda 30-40 dakika kadar şartlandırılmaya bırakılmıştır (Şekil 3.17). Bu işlem tamamlandıktan sonra numune çelikten oluşan bir halkanın iki kesiti arasına yerleştirilmiştir. Üst kesiti sabit olan halkanın alt kesiti dakikada 50,9 mm’lik bir hızla numunenin kırılma anına kadar yükleme yapmaktadır. Numunenin kırılma anındaki uygulanan kg cinsinden olan toplam yük “Marshall Stabilitesi” olarak adlandırılmaktadır. Kırılma esnasında meydana gelen hareket miktarı ise numunenin akma değerini vermektedir. Akma değerinin birimi ise mm’dir (Şekil 3.18).



Şekil 3.17. Marshall numunelerinin kür havuzunda şartlandırılması



Şekil 3.18. Numunelerin stabilite ve akma dayanımının ölçülmesi

3.2.4.1. Asfalt karışımın optimum bitüm içeriği tayini

Asfalt karışımların optimum bitüm içeriği tayinini hesaplamak için farklı bitüm yüzdelerinde (%3,5; %4; %4,5; %5; %5,5 ve %6) numuneler hazırlanmıştır. Numunelerin özgül ağırlık, stabilite, akma, boşluk, bitüm ile dolu boşluk, agregalar arasındaki boşluk grafikleri çizilerek optimum bitüm içeriği, Asfalt Enstitüsü (1997) prosedürüne göre grafiklerden;

1. Maksimum stabilite için bağlayıcı içeriği (**A**);
2. Maksimum özgül ağırlık için bağlayıcı içeriği (**B**);
3. %4 hava içeriği için bağlayıcı içeriğine (**C**) karşılık gelen bağlayıcı içeriklerinin ortalaması alınarak asfalt karışımın optimum bitüm içeriği aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır (Denklem 3.7).

$$\% \text{ Optimum Bitüm İçeriği} = \frac{A+B+C}{3} \quad (3.7)$$

3.2.4.2. Marshall karışım tasarımında kullanılan hesaplamalar için gerekli kavramlar ve bağıntılar

Marshall karışım tasarımında; özgül ağırlık, boşluk, bitüm ile dolu boşluk (VFA) ve mineral agregalar arası boşluk (VMA) değerleri birbirine bağıntılı olan; agrega efektif özgül ağırlığı,

kaplama karışımının efektif bitüm yüzdesi, bitüm absorpsiyon yüzdesi, kaplama karışımının efektif bitüm yüzdesi, karışımın maksimum özgül ağırlığı hesaplamaları yapılmıştır.

Agreganın efektif özgül ağırlığının hesaplanması

Belirli bir sıcaklıkta agreganın (asfaltın absorbe edildiği boşlukları hariç) geçirimli ve geçirimsiz boşluklarının içeren birim hacminin havadaki ağırlığının, birim hacimdeki suyun ağırlığına oranına Efektif Özgül Ağırlık denir. Agreganın efektif özgül ağırlık değeri, hacim ve zahiri özgül ağırlık değerleri arasında olmalıdır. Agreganın efektif özgül ağırlığı Denklem 3.8’de verildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\text{Agreganın Efektif Özgül Ağırlığı } (Gef) = \frac{100}{\left(\frac{100+Wa}{Dt}\right) - \left(\frac{Wa}{Gb}\right)} \quad (3.8)$$

Formülde;

Gef: Agreganın efektif özgül ağırlığı (g/cm³),

Wa: Bitüm içerik yüzdesi (%),

Dt: Karışımın boşluksuz maksimum özgül ağırlığı (g/cm³),

Gb: Bitümün özgül ağırlığı (g/cm³), değerlerini ifade etmektedir.

Agrega bitüm emilim oranının hesaplanması

Formül içerisinde geçen agreganın hacim özgül ağırlığı (Gsb) Denklem 3.9’da verilen bağıntı ile elde edildikten sonra bitümün emilim oranı (Pba) Denklem 3.10’daki bağıntı ile hesaplanmaktadır.

$$\text{Agreganın Hacim Özgül Ağırlığı } (Gsb) = \frac{100}{\left(\frac{K}{Gkh}\right) + \left(\frac{I}{Gih}\right) + \left(\frac{F}{Gf}\right)} \quad (3.9)$$

Formülde;

K: Karışımındaki kaba agreganın yüzdesi (%),

I: Karışımındaki ince agreganın yüzdesi (%),

F: Karışımındaki filler yüzdesi (%),

Gkh: Kaba agreganın hacim özgül ağırlığı (g/cm³),

Gih: İnce agreganın hacim özgül ağırlığı (g/cm³),

Gf: Fillerin özgül ağırlığı (g/cm³), değerlerini ifade etmektedir.

$$\text{Agreganın Bitüm Emilim Oranı (Pba)} = 100 \times \left(\frac{G_{ef} - G_{sb}}{G_{sb} \times G_{ef}} \right) \times G_b \quad (3.10)$$

Formülde;

Pba: Agreganın ağırlıkça bitüm emilim oranı (%),

Gef: Agreganın efektif özgül ağırlığı (g/cm³),

Gsb: Agreganın hacim özgül ağırlığı (g/cm³),

Gb: Bitüm özgül ağırlığı (g/cm³), değerlerini ifade etmektedir.

Efektif bitüm yüzdesinin hesaplanması

Karışım içerisine konulan toplam bitüm miktarından, agregata tarafından emilen bitüm miktarının çıkarılmasıyla elde edilir ve agreganın toplam ağırlıkça yüzdesi olarak ifade edilir. Karışımında agregaların bitüm emilimi sonrasında geriye kalan efektif bitüm oranı karışımın performansına etki eden bitüm miktarıdır. Bu değer, aşağıda Denklem 3.11’de verilen bağıntı kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$P_{bc} = W_a - P_{ba} \quad (3.11)$$

Formülde;

Pbc: Efektif bitüm miktarı (%),

Wa: Karışımındaki bitüm miktarı (%),

Pba: Agreganın bitüm emilim oranı (%), değerlerini ifade etmektedir.

Karışımın maksimum özgül ağırlığının hesaplanması

Asfalt karışımlarında izin verilebilir miktarda sıkışma meydana gelmesi için yeterli miktarda hava içermesi gerekmektedir. ASTM D 6927-22’e göre karışım içerisindeki boşluk oranı %4-7 arasında olması istenmektedir. Karışım içerisindeki hava boşluğu belirlenirken karışım için belirlenen optimum bitüm içeriğinin maksimum teorik özgül ağırlığının hesaplanması gerekmektedir. Maksimum teorik özgül ağırlık aşağıda verilen formül ile hesaplanmaktadır (Denklem 3.12).

$$\text{Maksimum Teorik Özgül Ağırlık (Dt)} = \left(\frac{100 + W_a}{\left(\frac{100}{G_{ef}} \right) + \left(\frac{W_a}{G_b} \right)} \right) \quad (3.12)$$

Formülde;

- Dt:** Maksimum teorik özgül ağırlık (g/cm³),
Wa: Karışımdaki bitüm miktarı (%),
Gef: Agreganın efektif özgül ağırlığı (g/cm³),
Gb: Bitüm özgül ağırlığı (g/cm³), değerlerini ifade etmektedir.

Agregalar arası boşluk yüzdesi hesabı

Agregalar arası boşluk (VMA); asfalt kaplama karışımlarının sıkıştırılması sonucunda içerisindeki agregaların birbiri arasında kalan boşluklardır. Sıkıştırılmış kaplama karışım hacminin yüzdesi olarak ifade edilmektedir. Kısaca agregalar arası boşluk, sıkıştırılmış kaplama karışımın hacminden agreganın hacim özgül ağırlığı ile hesaplanan hacmin çıkarılmasıyla hesaplanmaktadır. Karışımın agregalar arası boşluk değeri, Denklem 3.13'te verilen formül kullanılarak hesaplanmaktadır;

$$\text{Agregalar Arası Boşluk Yüzdesi (VMA)} = 100 - \frac{Dp \times \left(100 - \frac{Wa \times 100}{100 + Wa}\right)}{Gsb} \quad (3.13)$$

Formülde;

- VMA:** Agregalar arası boşluk yüzdesi (%),
Dp: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı (g/cm³),
Gsb: Agreganın hacim özgül ağırlığı (g/cm³),
Wa: Karışımdaki bitüm miktarı (%), değerlerini ifade etmektedir.

Sıkıştırılmış kaplama karışımındaki hava boşluğu ve asfalt dolu boşluk oranı yüzdesinin hesaplanması

Sıkıştırılmış kaplama karışımı içerisindeki hava boşluğu (Vh), bitümle kaplanmış agregataneleri arasındaki hava boşluklarından oluşmaktadır ve Denklem 3.14'te verilen formül kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$Vh = \left(\frac{Dt - Dp}{Dt} \right) \times 100 \quad (3.14)$$

Formülde;

- Vh:** Toplam hacmin yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımdaki hava boşluğu (%),

Dt: Karışımın maksimum teorik özgül ağırlık (g/cm³),

Dp: Sıkıştırılmış karışımın hacim özgül ağırlığı (g/cm³), değerlerini ifade etmektedir.

Asfaltla dolu boşluk (VFA) ise sıkıştırılmış kaplama karışımın bitümle dolan boşluklarından oluşmaktadır ve Denklem 3.15'te verilen formül kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$VFA = \left(\frac{VMA - Vh}{VMA} \right) \times 100 \quad (3.15)$$

Formülde;

VFA: Asfaltla dolu boşluk (%),

VMA: Agregalar arası boşluk (%),

Vh: Toplam hacmin yüzdesi olarak sıkıştırılmış karışımındaki hava boşluğu (%), değerlerini ifade etmektedir.

3.2.5. Mikromorfolojik analiz

Toprak, kaya, ince ve iri taneli malzemeleri oluşturan parçacıklar ve bu malzemelerin katkı olarak yer aldığı karışımlarda (beton, harç ve asfalt kaplamalar vb.) diğer bileşenlerle arasındaki ilişkiler; ince kesit ve cilalı bloklar gibi çeşitli Mikromorfolojik yöntemler ve çeşitli görüntü analiz yazılımları ve bilgisayarlı tomografi sistemleri kullanılarak optik, binoküler ve taramalı elektron mikroskopları (SEM) altında incelenebilmektedir (Brewer, 1976; FitzPatrick, 1993; Mitchell, 1993; Drees, 1994; Çetin ve diğ., 2004; Senthamarai ve diğ., 2005; Çetin ve diğ., 2013; Dan ve diğ., 2019; Li ve diğ., 2020; Karim ve diğ., 2021; Sukkari ve diğ., 2022b Al-Khateeb ve diğ., 2023). Ancak Sukkari ve diğerleri (2022b), asfalt karışımlarda agregaların bağlayıcı film kalınlığını ölçmek için taramalı elektron mikroskop (SEM) yönteminin uygun olmadığını belirtmiş ve bunu nedeni olarak analiz esnasında gönderilen elektronların karışım içerisinde bulunan filler malzemesinin asfalt bağlayıcı ile ayırt edilemediği ve sağlıklı görüntü elde edilemediğini ifade etmişlerdir. Bu nedenle doktora tez çalışmasında kullanılan agregaların asfalt karışım içerisindeki davranışları ve asfalt ile bağlanma durumları ince ve parlak kesit görüntüleri alınarak incelenmiştir.

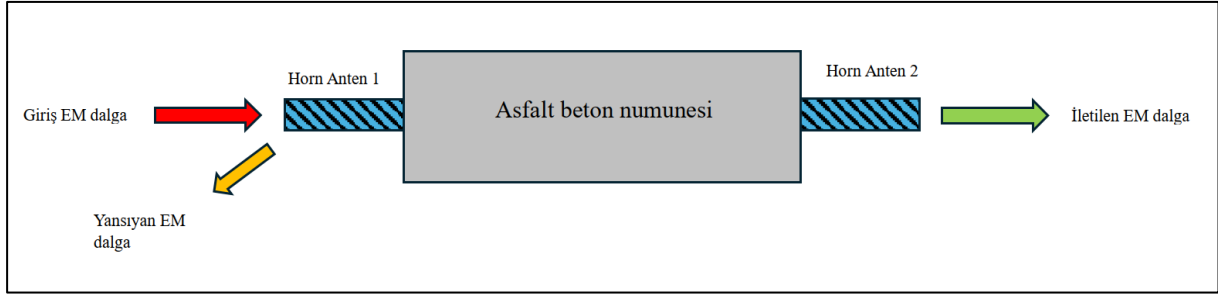
Mikromorfolojik analizi yapılacak olan numuneler önce havada kurutulmaya bırakılmış ve vakumlu desikatör içerisinde kurutulmuştur. Daha sonra numuneler ek sertleştirme amacıyla

epoksi reçinesinin numuneler tarafından vakumla emdirilmesi sağlanmıştır. Elde edilen sertleştirilmiş numuneler, Dress'e (1994) göre 2,5 cm × 4,5 cm × 2,5 cm boyutlarında kesilerek alt numunelere parçalarına ayrılmış ve makroskobik özelliklerinin incelenmesi amacıyla yüzeyleri cilalanmıştır. Son olarak elde edilen parlak kesit (cilalı blok) numuneler elmas testere ile çip şeklinde daha küçük ve ince parçalar halinde kesilmiş, yüzeyleri zımparalanarak cilalanmış ve ince tabaka epoksi uygulanarak cam plakalara entegre edilmiştir. Çukurova Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'nde Drees'in (1994) prosedürleri izlenerek toplam 16 ince kesit ve 7 parlak kesit hazırlanmıştır. Asfalt karışımları oluşturan bileşenler arasındaki etkileşimler, asfalt ile kullanılan katkı malzemeleri arasındaki birleşme ve adezyon ilişkilerini incelemek amacıyla ince kesitler, yansıtıcı bir stereo mikroskop ve dijital kamera altında hem çapraz polarize hem de düzlem polarize ışık altında incelenmiştir.

3.2.6. Vektör Network Analizör

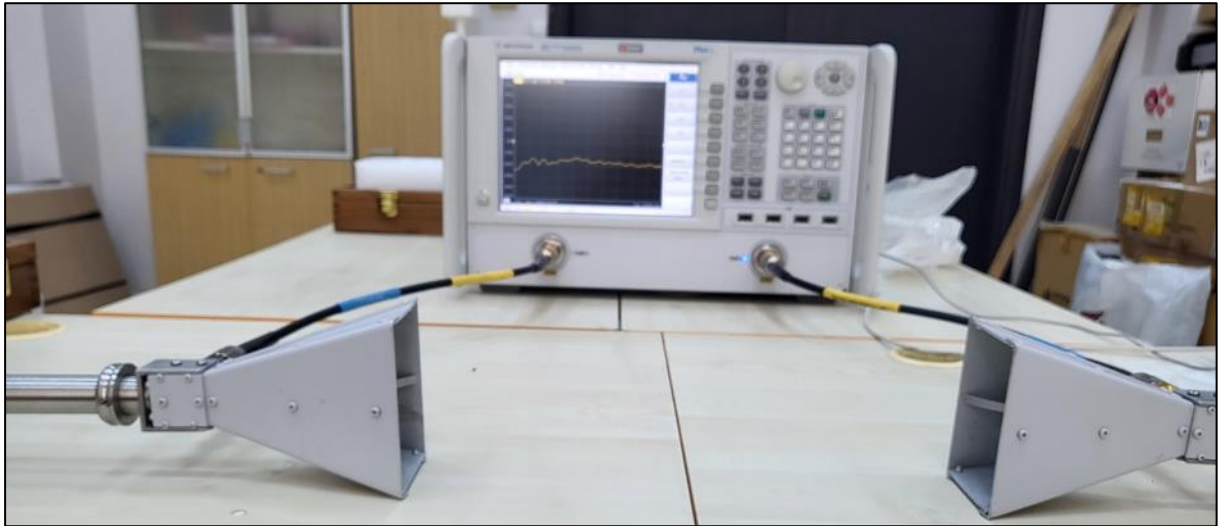
Karışımlara çeşitli katkılar farklı oranlarda eklenerek elde edilen asfalt betonlarının elektromanyetik dalga iletiminin ölçülmesi İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölüm Laboratuvarında bulunan Vektör Network Analizör (VNA) aleti ile yapılmıştır. Vektör Network Analizör empedans ölçmek için kullanılmaktadır. Empedans kavramı kısaca akıma karşı gösterilen dirençtir ve AC (alternatif akım) devrelerinde daha etkilidir. Empedans, direnç kavramı ile benzerdir ancak etki alanları farklılık göstermektedir. Direnç, DC (direkt akım) devrelerinde etkili olan, gerilim ve akımın iletilmesini sağlayan elektronların geçişini engelleyen veya geciktiren kuvvetlerdir ve sadece enerji kaybını temsil etmektedir. Empedans ise hem enerji kaybını hem de dalgalar arasındaki faz kaymalarını dikkate almaktadır. 10 MHz-43,5 GHz frekans aralığında çalışan Agilent marka 2-Port PNA-L Vektör Network Analizör, farklı katkılarla üretilen asfalt betonlar için Süper Yüksek Frekans Bandında (SHF) 3-18 GHz aralığında ölçümler alınmıştır. Bu frekans aralığında çalışılmasının amacı yüksek frekans aralıklarının düşük dalga boylarına sahip olmasından dolayı etki odağının artması sonucunda ölçümlerin daha hassas ve doğru yapılabilmesidir.

VNA'nın çalışma prensibi Şekil 3.19'da gösterildiği gibi cihazdan iletilen ve yansıyan dalgaların ölçülmesine dayanmaktadır.



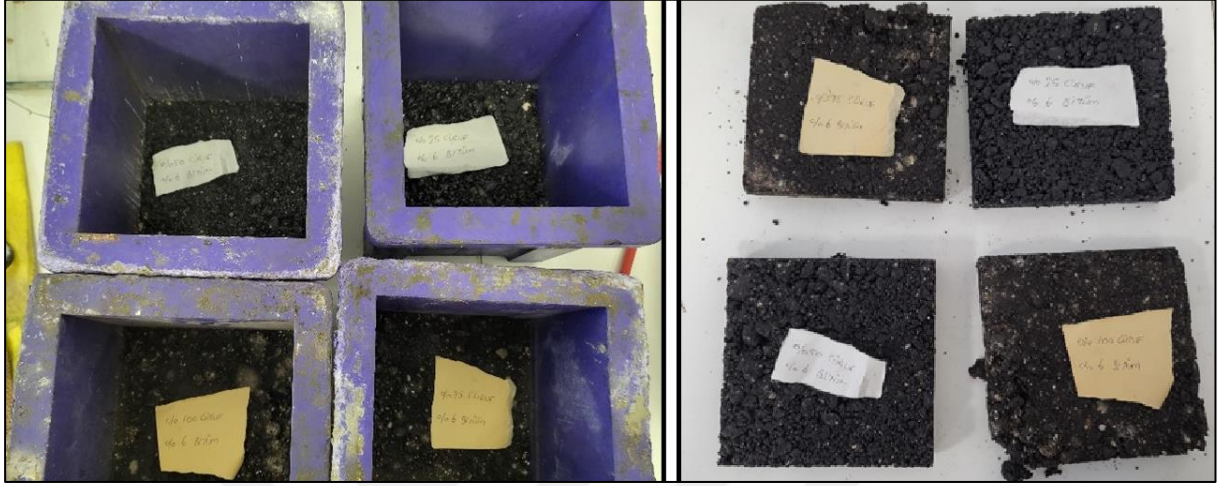
Şekil 3.19. Vektör Network Analizör cihazı çalışma prensibi

Şekil 3.20’de görüldüğü üzere VNA iki adet doğrusal polarize, yüksek kazançlı horn antenler kullanılmıştır. İletilen ve yansıyan dalgaları elde etmek için Network analizörü uygun bir kalibrasyon kiti yardımıyla kalibre edilmiştir. Network analizörü, S parametreleri olarak adlandırılan saçılma parametrelerini ölçmektedir. S11 ve S22 parametreleri bir porttan diğerine yansıyan sinyalleri ifade ederken, S12 ve S21 parametreleri bir porttan diğerine iletilen sinyalleri ifade etmektedir. Ölçüm hatalarını ve belirsizlikleri azaltmak amacıyla Zaman Alanı Geçitleme (TDG) teknikleri kullanılmıştır. Bu çalışmada TDG, boş alan ölçümlerini etkileyebilecek parazitlerin çoğunu filtrelemek amacıyla kullanılmıştır (Micheli ve diğ., 2014). Farklı katkı malzemeleri içeren asfalt beton numunelerinin elektromanyetik iletimlerini ölçülmesi için iletim katsayıları (S12 veya S21) baz alınmıştır.



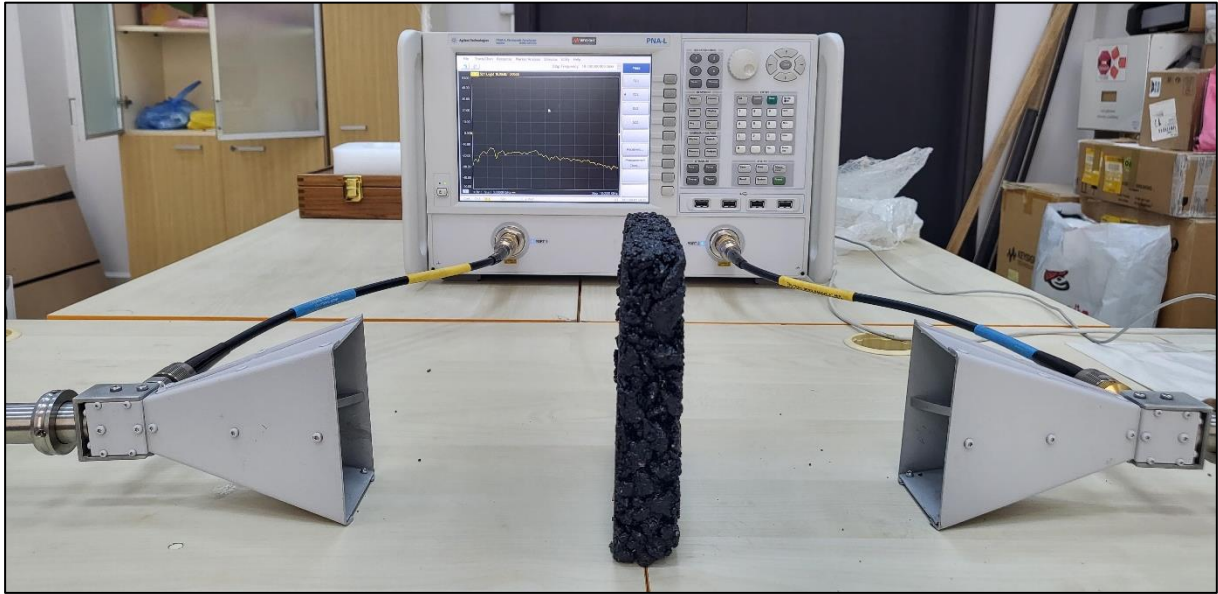
Şekil 3.20. Vektör Network Analizör cihazı

Analiz edilecek asfalt karışımların elektromanyetik iletim analizinin daha sağlıklı yapılabilmesi için yüzey alanı geniş olacak şekilde özel boyutlarda kare prizma şeklinde numuneler üretilmiştir. Numune boyutları; 150 mm×150 mm×23,25 mm şeklindedir (Şekil 3.21).



Şekil 3.21. Elektromanyetik iletim analizi için hazırlanan kare prizma numuneler

Hazırlanan kare prizma numuneler antenlerin arasına yerleştirilmiştir ve asfalt karışımların elektromanyetik iletimi ölçülmüştür (Şekil 3.22). Analizler sonucunda veriler kullanılarak Elektromanyetik İletim- Frekans grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 3.22. Asfalt betonu numunesinin Vektör Network Analizör ile elektromanyetik iletimin ölçülmesi

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

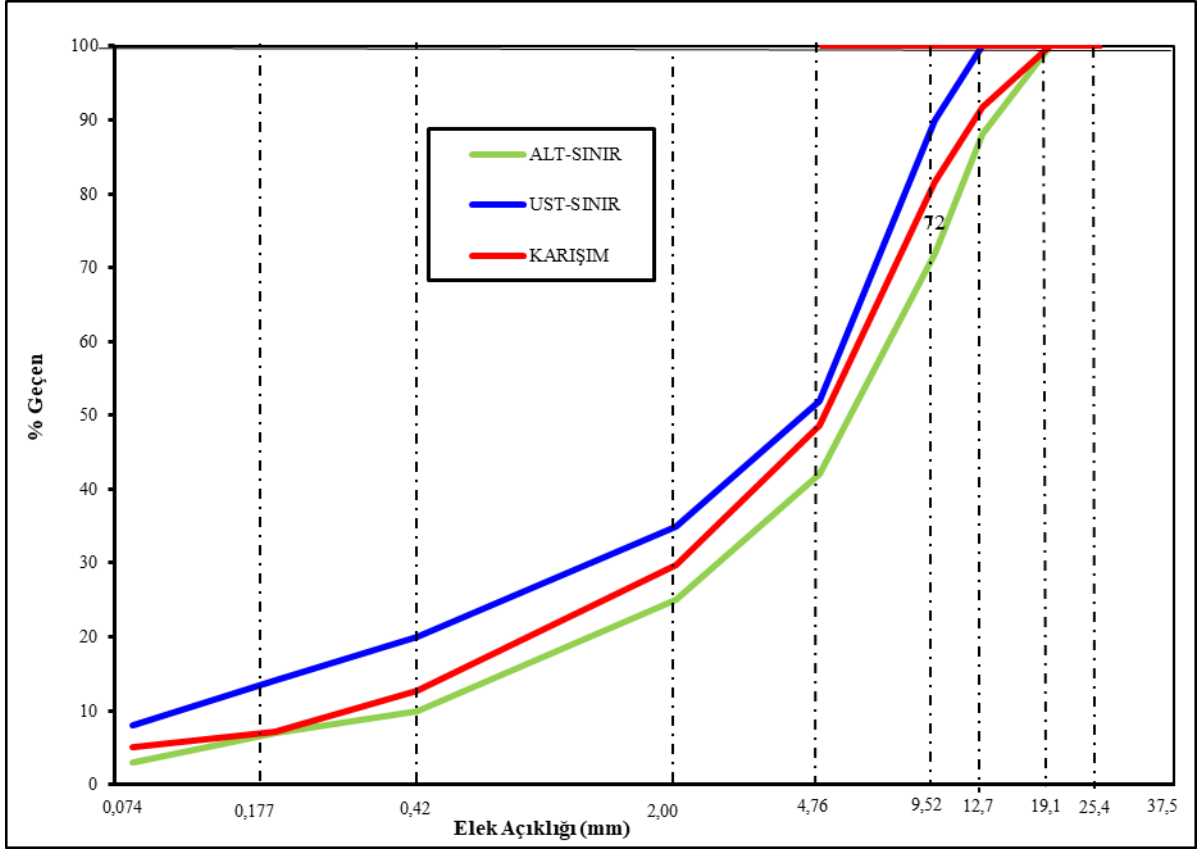
4.1. Asfalt Karışımlarda Kullanılan Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerinin Belirlenmesi

4.1.1. Elek analizi deney sonuçları

Elek analizi yapılan agregaların gradasyonu Karayolları Teknik Şartnamesi (2013), limitine göre seçilmiştir. Kullanılan gradasyon değerleri Şekil 4.1’de ve Tablo 4.1’de verilmiştir. Grafikte ve tabloda görüldüğü gibi referans karışım için kullanılan agreganın gradasyonu tüm elek setlerinde KTŞ’deki limitler arasında kalmıştır.

Tablo 4.1. Gradasyon ve şartname limitleri

Elek Çapı (mm)	Sınır Değerler (KTŞ, 2013) Elekten Geçen (%)	Karışım Gradasyonu Elekten Geçen (%)	Ağırlık (g)
25 mm	100	100,0	0,0
19 mm	100	100,0	0,0
12,5 mm	88-100	91,7	95,9
9,5mm	72-90	81,6	116,0
4,75 mm	42-52	48,6	378,9
2,00 mm	25-35	29,6	218,3
0,425 mm	10-20	12,6	195,5
0,180 mm	7-14	7,2	62,7
0,075 mm	3-8	5,0	25,2
Filler	-	-	57,5
Toplam	%100	%100	1150



Şekil 4.1. Agrega gradasyon grafiği

4.1.2. Özgül ağırlık deneyi ve su emme tayini sonuçları

Özgül Ağırlık, belirli hacim ve sıcaklıktaki bir malzemenin havadaki ağırlığının aynı hacim ve sıcaklıktaki suyun havadaki ağırlığına oranı olarak tanımlanmaktadır. Su emme deneyi ise suya doymun yüzeyi kuru olan agreganın, kuru agregaya göre içerdiği su oranını belirlemek için yapılmaktadır. Her iki deney şekli agreganın tane boyutlarına göre farklı şekillerde yapılmaktadır. Bu deneyler ASTM C127 ve ASTM C128 standartlarına göre uygulanmaktadır. Asfalt karışımında kullanılan agregaların özgül ağırlık ve su emme tayini sonuçları Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.2. Asfalt karışımında kullanılan agregaların özgül ağırlık ve su emme değerleri

Agrega	Özellikler	Sonuçlar	Test Standardı
Atık Seramik	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,35	ASTM C127
	Su Emme (%)	12	ASTM C128
Ferrokrom	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,93	ASTM C127
	Su Emme (%)	1,20	ASTM C128
Kuars	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	2,65	ASTM C127
	Su Emme (%)	0,5	ASTM C128
Çelik Cürufu	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3,43	ASTM C127
	Su Emme (%)	2,28	ASTM C128

4.1.3. Los Angeles (Aşınma) deney sonuçları

Los Angeles deneyi iri agregaların dış etken ve darbelere karşı direncini belirlemek amacıyla uygulanan deney yönteminden oluşmaktadır. Los Angeles Aşınma deneyi için Karayolu teknik şartnamesinde (KTŞ, 2013) karışımında kullanılacak agregaların aşınma kaybının %45'ten az olması gerektiği belirtilmiştir. Tablo 4.3'te seçilen agregaların aşınma kaybı sonuçları verilmiştir. Aşınma kaybı değerlerinin limit değerden az olduğu ve asfalt karışımlar için uygun olduğu ortaya çıkmıştır.

Tablo 4.3. Asfalt karışımında kullanılan agregaların Aşınma kaybı değerleri

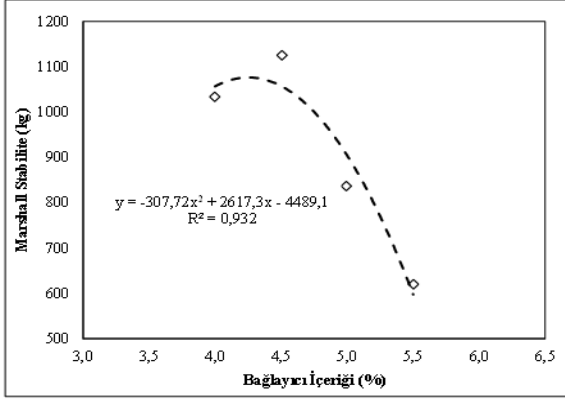
Agrega	Özellikler	Sonuçlar	Test Standardı
Ferrokrom	Aşınma Kaybı (%) (Los Angeles)	16,4	ASTM C131
Kuars	Aşınma Kaybı (%) (Los Angeles)	16,23	ASTM C131
Çelik Cürufu	Aşınma Kaybı (%) (Los Angeles)	22,2	ASTM C131
Atık Seramik	Aşınma Kaybı (%) (Los Angeles)	23,3	ASTM C131

4.2. Marshall Tasarım Deneyi ve Sonuçları

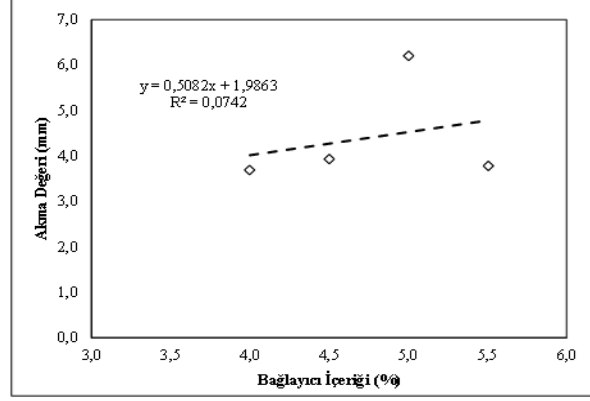
4.2.1. Optimum bitüm içeriği tayini

ASTM D 6927-22 standardına uygun yapılan karışım tasarımında karışımın optimum bitüm içeriğini tayin etmek amacıyla farklı bitüm yüzdesi (%3,5; %4; %4,5, %5; %5,5 ve %6) içeren numuneler hazırlanarak Marshall Stabilitate deneyi yapılmış ve numunelerin; özgül ağırlık, stabilite, akma, hava içeriği, bitüm ile dolu boşluk (VFA) ve mineral agregalar arası boşluk (VMA) grafikleri çizilmiştir. Elde edilen grafikler Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

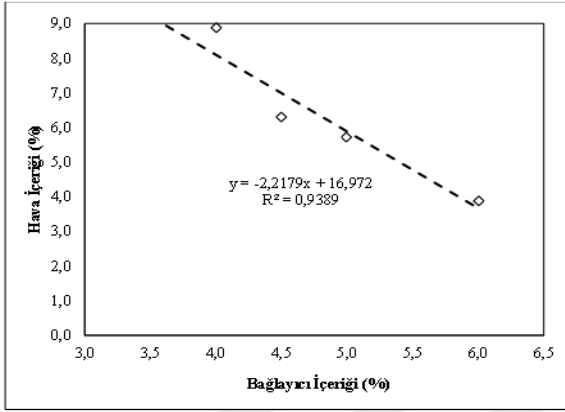




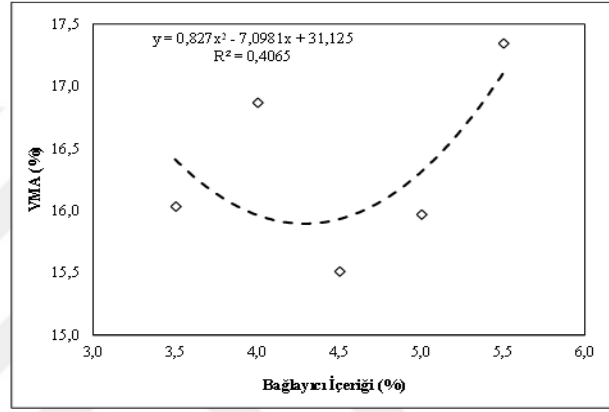
a) Marshall Stabilité



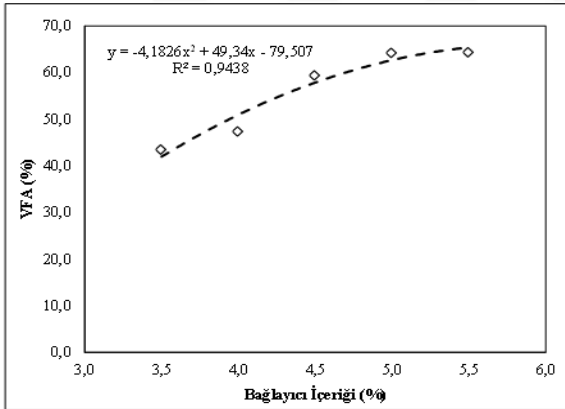
b) Akma Değeri



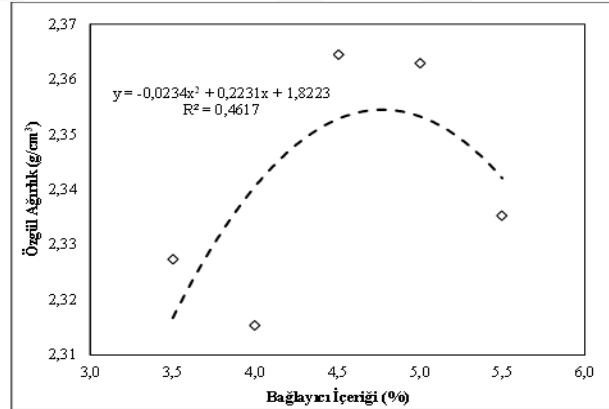
c) Hava İçeriği



d) VMA



e) VFA



d) Özgül Ağırlık

Şekil 4.2. Asfalt karışımların optimum bitüm içeriği tayininin belirlenmesi amacıyla farklı bitüm içerikleri ile hazırlanan asfalt numunelerinin mekanik ve hacimsel analiz sonuçları

Şekil 4.2'de sunulan sonuçlar dikkate alındığında asfalt karışımlarının optimum bitüm içeriği, Asfalt Enstitüsü (1997) prosedürü esas alınarak hesaplanmıştır. Elde edilen değerler aşağıda sıralanmıştır:

1. Maksimum stabilite için bağlayıcı içeriği (%4,30 olarak bulunmuştur);
2. Maksimum birim ağırlık için bağlayıcı içeriği (%4,75 olarak bulunmuştur);
3. %4 hava içeriği için bağlayıcı içeriği (%5,90 olarak bulunmuştur).

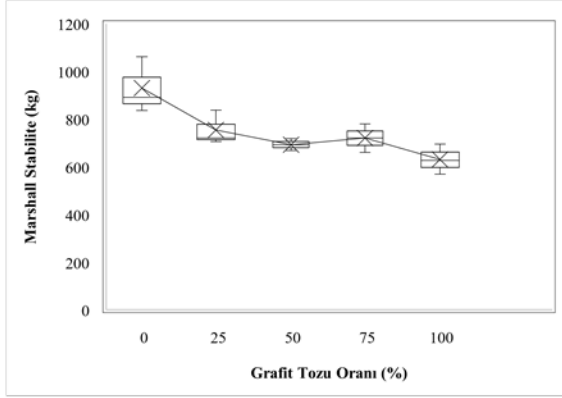
Maksimum stabiliteye, birim ağırlığa ve %4 hava içeriğine karşılık gelen bağlayıcı içeriklerinin ortalaması alınarak asfalt karışımın optimum bitüm içeriği %5 olarak bulunmuştur.

4.3. Katkı Malzemesi İçeren Asfalt Karışımların Mekanik ve Hacimsel Özellikleri

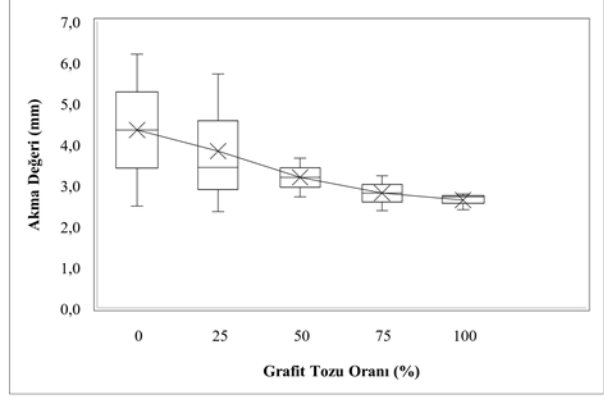
Tez çalışmasının konusu olan asfalt karışımların elektromanyetik iletiminin artırılmasına yönelik malzeme araştırılmasında belirlenen; grafit tozu, kuvars, atık cam tozu, atık seramik, ferrokrom ve çelik cürufu malzemeleri ile Marshall tasarım yöntemine göre karışımlar hazırlanmıştır. Farklı oranlarda katkı malzemeleri içeren karışımlar üzerinde öncelikle Marshall Stabilite deneyi uygulanmış ve karışımların mekanik ve hacimsel özelliklerinde meydana gelen değişimler incelenmiştir.

4.3.1. Grafit tozu içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel özellikleri

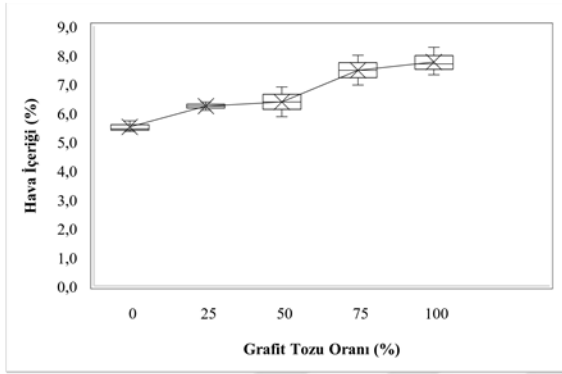
Marshall tasarımına göre hazırlanan karışımlarda, şartnameye göre belirlenen %5 filler oranı içerisinde kireç taşı ile %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarda yer değiştirilerek grafit tozu kullanılmıştır. Belirlenen bu oranların asfalt karışımında %5 filler grubu içerisinde karşılık gelen değerleri Tablo 4.4'te verilmiştir. Hazırlanan 15 adet Marshall numunesinin Marshall Stabilite (MS), akma, hava içeriği, özgül ağırlık, bitüm ile dolu boşluk (VFA) ve mineral agregalar arası boşluk (VMA) değerleri elde edilerek Kutu-Bıyık (box and whisker charts) grafikleri oluşturulmuştur. Bu grafik türü, verilerin ortalama değerleri de dahil olmak üzere çeyreklere göre dağılımını göstermekte olup verilerin daha detaylı bir şekilde analiz yapılması amacıyla seçilmiştir (Şekil 4.3). Asfalt karışımlarındaki grafit tozu oranları arttıkça MS, akma, VFA ve özgül ağırlık değerlerinde azalma, hava içeriği ve VMA değerlerinde ise artma meydana gelmiştir.



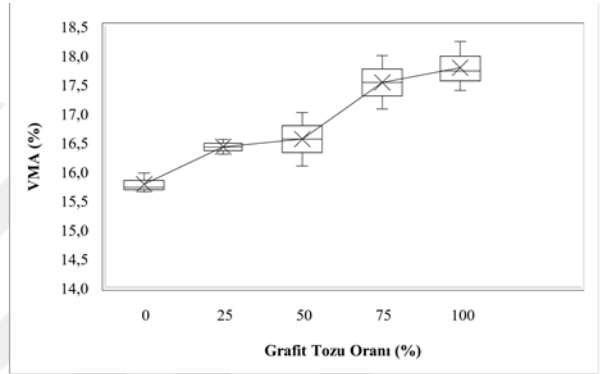
a) Marshall Stabilité



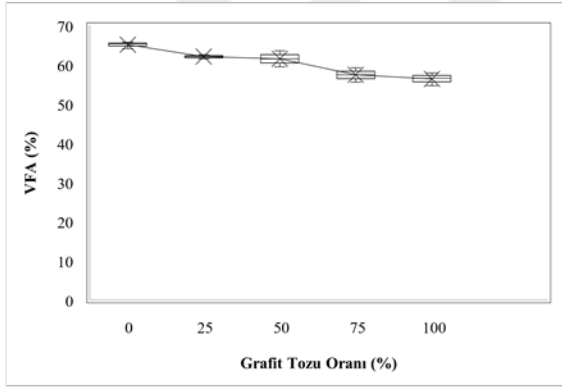
b) Akma Değeri



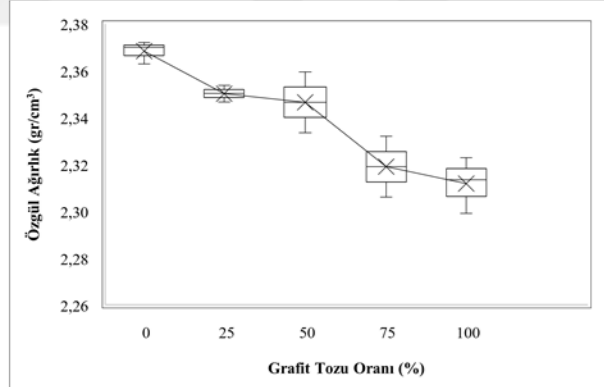
c) Hava İçeriği



d) VMA



e) VFA



f) Özgöl Ağırlık

Şekil 4.3. Grafit tozu içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel analiz sonuçları

Tablo 4.4. Asfalt karışımında kullanılan grafit tozunun deneysel test matrisi

Numune Özellikleri	Numune Sayısı	Agrega Karışımındaki Toplam Filler İçeriği (%)	Filler İçindeki Kireç Taşı Oranı (%)	Filler İçindeki Grafit Tozu Oranı (%)
	3	5	5	0
Mekanik ve	3	5	3,75	1,25
Hacimsel	3	5	2,5	2,5
Özellikler	3	5	1,25	3,75
	3	5	0	5

Şekil 4.3.a'da görüldüğü gibi karışımın dolgu malzemesi içerisindeki grafit tozu oranı arttıkça MS sonuçlarının azalma eğiliminde olduğu gözlemlenmiştir. %0 ile %100 oranında grafit tozu içeren numunelerin MS değerlerinde yaklaşık %32 oranında azalma meydana gelmiştir. Bu durum grafit tozunun kimyasal yapısı gereği kendini oluşturan zayıf Van der Waals bağlarının numune hazırlama aşamasında dış etkenlerden (sıcaklık ve basınç gibi) dolayı kolayca kopması şeklinde açıklanabilir. Grafit tozunun artmasıyla artan bu zayıf bağların, asfalt karışımının dayanımında da azalma meydana getirerek Marshall Stabilite ve akma değerlerinin düşmesine sebep olmuştur (Şekil 4.3.b). Kök ve arkadaşlarının (2017), grafit tozunun asfalt betonlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkisini araştırdığı çalışmada ve daha önce yapılan bazı çalışmalarda da benzer sonuçların çıkması elde edilen bulguyu destekler niteliktedir (Wu ve diğ., 2005; Liu ve diğ., 2008; Kök ve diğ., 2017).

Şekil 4.3.f'de görüldüğü üzere grafit tozu oranının artmasıyla karışımın özgül ağırlığında toplamda %2,4 oranında azalma meydana gelmiştir ve bu durumun nedenleri arasında grafit tozunun özgül ağırlığının kireç taşı tozunun özgül ağırlığına oranla düşük olmasıyla açıklanabilir. Tez çalışmasında kullanılan kireç taşı dolgusunun kütle özgül ağırlığı $2,732 \text{ g/cm}^3$ iken grafit tozunun kütle özgül ağırlığı ise $2,15 \text{ g/cm}^3$ olarak belirlenmiştir.

Şekil 4.3.c ve Şekil 4.3.d'de görüldüğü üzere karışım içerisindeki grafit oranı arttıkça hava içeriği (%40 oranında) ve mineral agregalar arası boşluk oranı (VMA) (%12,74 oranında) artmıştır. Bu artışın sebebi karışım içerisindeki bağlayıcının emiliminin arttığı ve grafit tozu parçacıklarını kaplamak için kullanıldığını göstermektedir (Şekil 4.4). Ayrıca grafit tozunun bağlayıcı emiliminin yüksek olması sonucunda bitüm ile dolu boşluk oranında (VFA) azalma

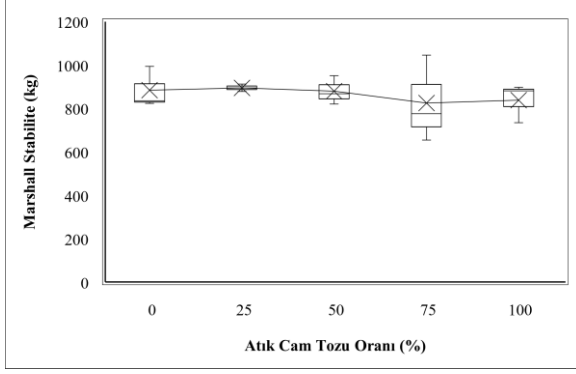
meydana gelmiştir (%13,36 oranında) (Şekil 4.3.e). VMA ve VFA değerlerindeki bu değişim karışımlardaki agregaları kaplayan bağlayıcının film kalınlığının az olduğu yani efektif asfalt bağlayıcının yetersiz olduğunu göstermektedir. Asfalt bağlayıcı film kalınlığı, asfalt karışımlarda agrega ve bağlayıcının kohezyon ve adezyonunu sağlayarak asfalt karışımlarının dayanıklılığını ve bağlanma performansını etkilemektedir (Al-Khateeb, 2018). Asfalt karışımların dayanıklılığı karışımın hacimsel özelliklerine göre şekillenmektedir (Karim ve diğ., 2021). Yüksek oranda VFA ve hava içeriği ile yetersiz oranda VMA olması asfalt karışımlarda stabilite problemleri meydana getirmekte ve dayanımın düşmesine neden olmaktadır (Hislop ve Coree, 2000).



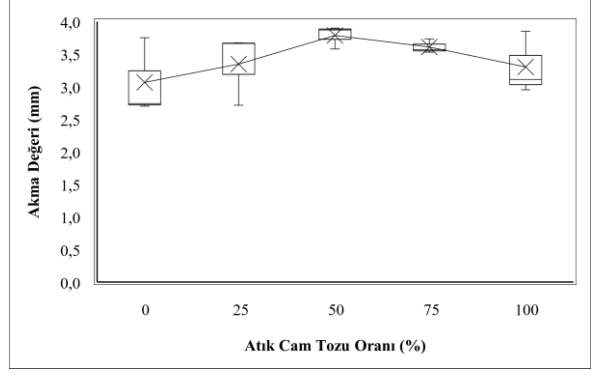
Şekil 4.4. %0 grafit tozu (sol) ve %100 grafit tozu (sağ) içeren asfalt numuneler

4.3.2. Atık cam tozu içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel özellikleri

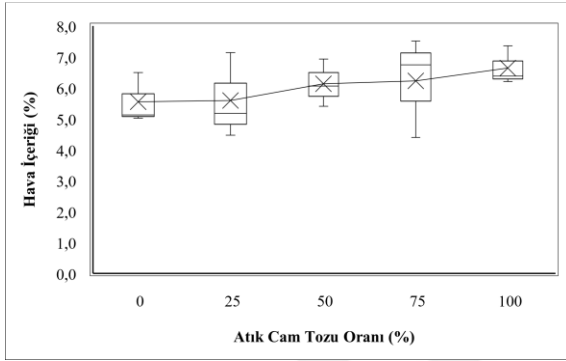
Marshall tasarımına göre hazırlanan karışımlarda, şartnameye göre belirlenen %5 filler oranı içerisinde kireç taşı ile %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarda yer değiştirilerek atık cam tozu kullanılmıştır. Belirlenen bu oranların asfalt karışımında %5 filler grubu içerisinde karşılık gelen değerleri Tablo 4.5'te verilmiştir. Hazırlanan 15 adet Marshall numunesinin Marshall Stabilite (MS), akma, hava içeriği, özgül ağırlık, bitüm ile dolu boşluk (VFA) ve mineral agregalar arası boşluk (VMA) değerleri elde edilerek grafikler oluşturulmuştur. Grafikler incelendiğinde karışımlardaki atık cam tozu oranı arttıkça, MS, VFA ve özgül ağırlık değerleri azalırken, hava içeriği, VMA ve akma değerlerinde artma meydana gelmiştir.



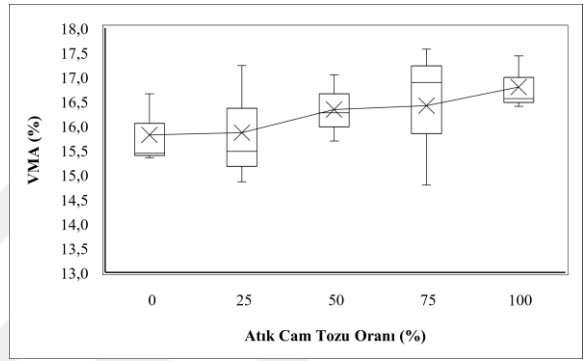
a) Marshall Stabilite



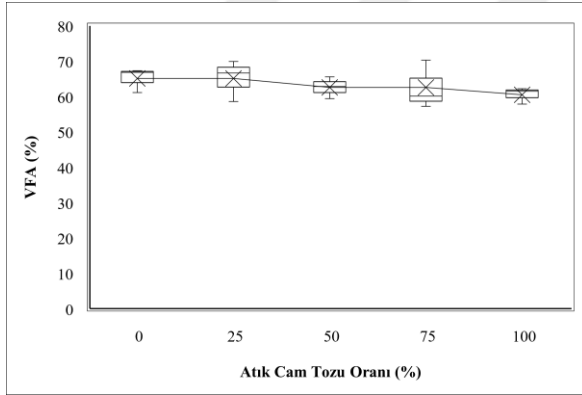
b) Akma Değeri



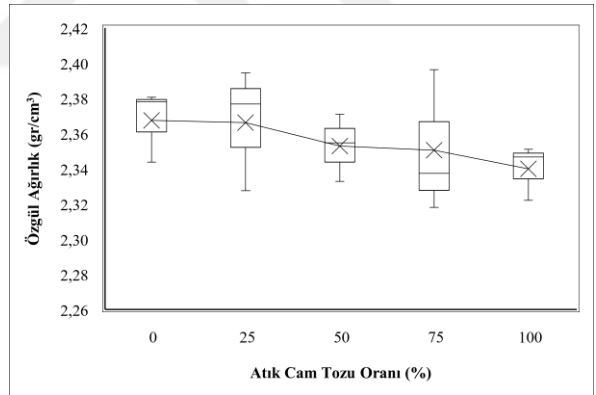
c) Hava İçeriği



d) VMA



e) VFA



f) Özgül Ağırlık

Şekil 4.5. Atık cam tozu içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel analiz sonuçları

Tablo 4.5. Asfalt karışımında kullanılan atık cam tozunun deneysel test matrisi.

Numune Özellikleri	Numune Sayısı	Agrega Karışımındaki Toplam Filler İçeriği (%)	Filler İçindeki Kireç Taşı Oranı (%)	Filler İçindeki Atık Cam Tozu Oranı (%)
	3	5	5	0
Mekanik ve	3	5	3,75	1,25
Hacimsel	3	5	2,5	2,5
Özellikler	3	5	1,25	3,75
	3	5	0	5

Marshall stabilite değeri karışım içerisindeki atık cam tozu oranı arttığında azalma eğilimi göstermiştir (Şekil 4.5.a). Analiz sonuçlarına göre atık cam tozu içermeyen karışımın değeri 883,35 kg iken %100 atık cam tozu içeren karışımın değeri 837,23 kg'a düşmüş ve numunenin dayanımı toplamda %5 oranda azalma göstermiştir. Daha önceki yapılan çalışmalarda da elde edilen verilere göre asfalt betonlarda cam malzemesinin düşük oranda (en fazla %40) ve daha çok ince taneli boyutlarda kullanılmasının karışımın dayanım değerinin şartnameyi sağlaması açısından önemli olduğu vurgulanmıştır (Su ve Chen, 2002; Jony ve diğ., 2011; Bilondi ve diğ., 2016; Al-Saeedi ve Al-Jameel, 2018).

Şekil 4.5.f’de verilen grafiğe göre atık cam tozu oranı arttıkça asfalt karışımın özgül ağırlığında çok fazla değişim meydana gelmemiştir. Atık cam tozu içermeyen karışımın özgül ağırlığı ile %100 atık cam tozu içeren karışımda özgül ağırlık değeri toplamda %1,27 oranında azalmıştır. Bu durum cam malzemesinin özgül ağırlığının karışımda kullanılan kireç taşı agregasının özgül ağırlığından daha az olması olarak açıklanabilir (kireç taşının ve cam malzemesinin özgül ağırlıkları yaklaşık olarak sırasıyla 2,73 g/cm³ ve 2,65 g/cm³ ‘tür) (Bilondi ve diğ., 2016; Udaya ve diğ., 2016; Androji’c ve Marovi’c, 2019).

Akma değeri, Marshall numunelerine uygulanan yük sonucu kırılma anında oluşan deformasyona karşılık gelen değer olarak tanımlanmaktadır. Bu değer bize asfalt karışımlarının plastisite ve esneklik özellikleri hakkında bilgi vermektedir. Asfalt karışımın Şekil 4.5.b’de görüldüğü üzere atık cam tozu oranı arttıkça akma değeri artmış ancak %50 oranına ulaştıktan sonra düşme eğilimi göstermiştir. Başlangıçta %0 atık cam tozu için akma değeri 3,06 mm iken 3,75 mm yükselerek maksimum değerine ulaşmıştır. Ancak %100 atık cam tozu oranına

gelindiğinde ise akma değeri 3,30 mm'ye düşmüştür. Akma değerinde meydana gelen bu değişim cam malzemesinin asfalt karışımların elastisitesini azalttığını göstermekte ve daha önceki yapılan çalışmalarda da vurgulandığı üzere cam malzemesinin asfalt karışımlarda belirli bir oranda kullanılması gerektiğini destekler niteliktedir (Issa, 2016; Lachance-Tremblay ve diğ., 2016; Arabani ve diğ., 2017; Salem ve diğ., 2017).

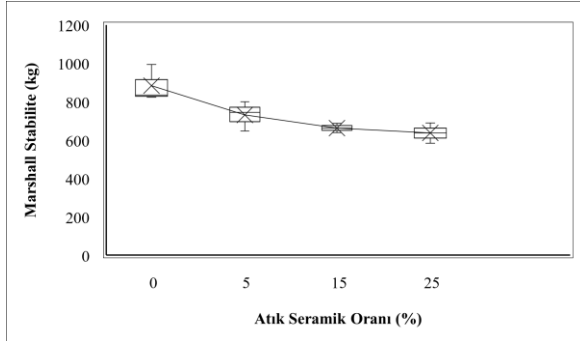
Karışım içerisindeki atık cam tozu oranı arttıkça, karışımın hava içeriği de artmıştır (Şekil 4.5.c). Örneğin, atık cam tozu içermeyen karışım için hava içeriği %5,54 iken %50 ve %100 oranlarında atık cam tozu içeren karışımlar için bu değerler sırasıyla %6,12 ve %6,64'e yükselmiştir (karışımın hava içeriğinde toplamda %19,86 oranında artış meydana gelmiştir). Meydana gelen bu yüksek artışın sebebi olarak cam tozlarının daha düşük adsorpsiyon kapasitesi ve cam tozunu kaplayan asfalt bağlayıcı ile silika arasındaki kimyasal değişim olarak gösterilebilir (O'Flaherty, 2002; Tang ve diğ., 2015).

Şekil 4.5.d ve Şekil 4.5.e, asfalt karışımlarda atık cam tozu oranı değiştikçe, asfalt karışımlarının VMA ve VFA değerlerinde meydana gelen değişiklikleri göstermektedir. Cam tozu içeriği arttıkça, VMA değerleri artarken, VFA değerleri azalmaktadır. Örneğin, VMA'nın %15,81'lik başlangıç değeri, %100 atık cam tozu oranı için %6 oranında artış göstererek %16,79 değerine ulaşmıştır. Ancak başlangıçtaki %65,06'lık VFA değeri, aynı yüzdelere için istikrarlı bir şekilde %62,59 ve %60,51'e düşmüştür (%7 azalma). Bunun nedeni, cam tozu içeriği arttıkça, karışımlardaki asfalt bağlayıcının daha büyük miktarlarının atık cam tozu parçacıklarını kaplamak için kullanılmasıdır; bu nedenle, VMA değerleri artmakta ve VFA değerleri azalmaktadır. Bu durum karışımdaki agregaların daha az film kalınlığına sahip olduğunu göstermektedir.

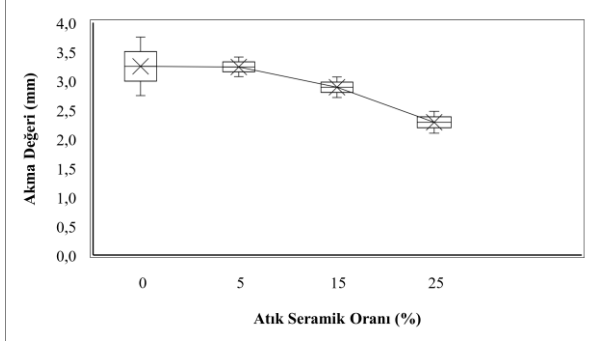
4.3.3. Atık seramik içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel özellikleri

Atık seramik agregası toplam agreganın %0, %5, %15 ve %25'i olarak belirlenmiş oranlarda Marshall karışım tasarımına göre hazırlanarak asfalt karışımlarda geleneksel agrega ile yer değiştirerek kullanılmıştır. Hazırlanan asfalt beton numuneleri üzerinde Marshall Stabilité analizleri yapılmış ve karışımın MS, akma, özgül ağırlık, VFA, VMA ve hava içeriği belirlenmiştir. Elde edilen grafikler incelendiğinde atık seramik oranı arttıkça, MS, VFA, özgül

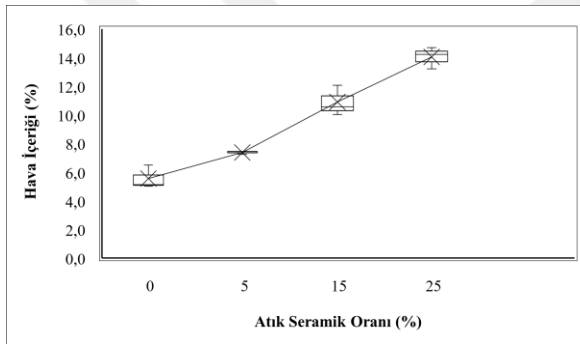
ağırlık ve akma değerleri azalırken, hava içeriği ve VMA değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.6).



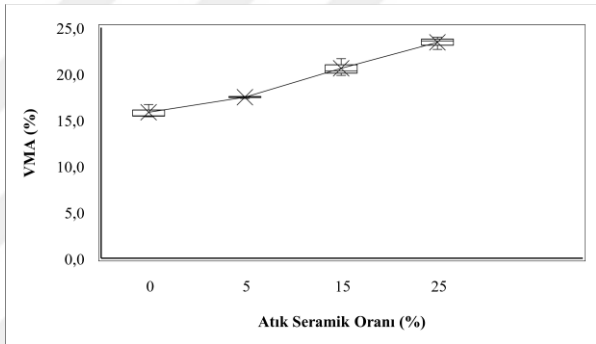
a) Marshall Stabilite



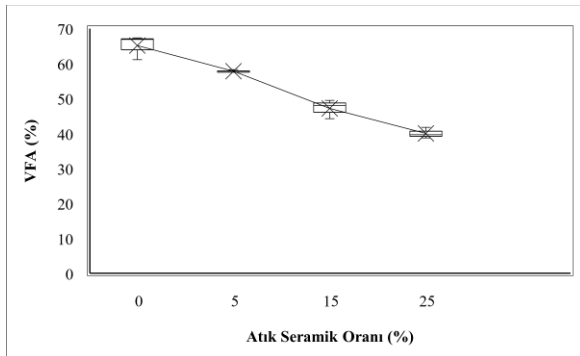
b) Akma Değeri



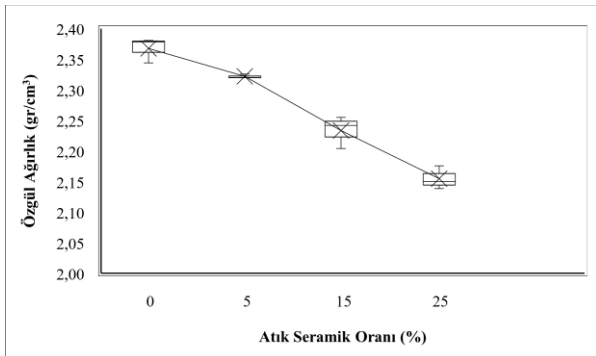
c) Hava İçeriği



d) VMA



e) VFA



f) Özgül Ağırlık

Şekil 4.6. Atık seramik içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel analiz sonuçları

Şekil 4.6.a'da verilen grafiğe göre atık seramik oranı arttıkça Marshall Stabilite değeri düşme eğilimi göstermiştir. Başlangıç değeri (%0 atık seramik) 883,35 kg olan numune, atık seramik oranı %25 olduğunda toplamda %28 azalarak 635,92 kg'a düşmüştür. Karışımın stabilite değerlerindeki azalma; atık seramik agregasının aşınma değerinin (%23,34) kireç taşı agregasına (%21,50) göre daha yüksek olması ve atık seramik oranının artmasıyla birlikte

karışımın hava içeriğinin artması şeklinde açıklanabilir. Ayrıca atık seramik agregasının iri tanelerinin parlak yüzeylerinin kaygan olmasından dolayı karışımda bağlayıcı ile tam bir adezyon sağlayamadığı ve sıyrılma meydana gelerek karışımın stabilite değerini etkilediği sonucuna varılabilir. Daha önceki yapılan çalışmalarda da elde edilen verilere göre asfalt betonlarda seramik malzemesinin en fazla %30 oranında kullanılmasının karışımın stabilite değerinin şartnameyi aşmaması açısından önemli olduğu vurgulanmıştır (Van de Ven ve diğ., 2011; Muniandy ve diğ., 2012; Feng ve diğ., 2013; Silvestre ve diğ., 2013; Kara ve Karacasu, 2017).

Karışımın özgül ağırlığı, atık seramik içeriğinin yüzdesi arttıkça yüksek oranda bir düşüş (toplamda %23 oranına azalma) göstermiştir (Şekil 4.6.f). %0 atık seramik içeren numunenin özgül ağırlığı $2,37 \text{ g/cm}^3$ iken en yüksek atık seramik oranında bu değer $2,15 \text{ g/cm}^3$ 'e düşmektedir. Bu durumun sebebi seramik malzemesinin yığın özgül ağırlığının ($2,35 \text{ g/cm}^3$) karışımda birlikte kullanılan kireç taşı malzemesinin yığın özgül ağırlığından ($2,68 \text{ g/cm}^3$) hafif olmasıdır (Tablo 4.3). Karışım içerisindeki atık seramik oranı arttıkça yığın özgül ağırlık azalmakta ve bunun sonucu olarak karışımın özgül ağırlığı da azalmaktadır.

Akma değerleri Şekil 4.6.b'de görüldüğü üzere karışımda atık seramik oranı arttıkça azalmaktadır. Karışımın akma değeri atık seramik içermeyen numune için 3,25 mm çıkmış ve seramik içeriği %5 olana kadar aynı değerde devam etmiştir. Ancak %5 oranından sonra hızlı bir düşüş meydana gelmiş ve %25 atık seramik oranında akma değeri toplamda %30 azalarak 2,28 mm değerine inmiştir. Akma değeri oldukça önemli bir parametre olup asfalt karışımların plastisite ve esnekliği hakkında bilgi vermektedir. Bu değerdeki azalma, yol üstyapısında tekerlek izi veya yorulma çatlaması gibi deformasyonların oluşmasına sebep olmaktadır.

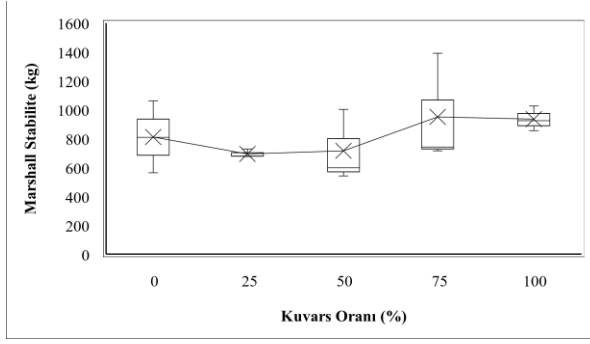
Şekil 4.6.c'de verilen grafiğe göre karışımların hava içeriği, seramik oranları arttıkça önemli ölçüde artmaktadır. Atık seramik içermeyen karışımın hava içeriği %5,54 iken seramik oranı %5, %15 ve %25 olan karışımlarda sırasıyla %7,37, %10,88 ve %14,03'e yükselmiştir. Grafikten de görüldüğü üzere karışımın hava içeriği %153 oranında keskin bir artış meydana gelmiştir. Bu artışın en büyük sebebi her ne kadar karışımda atık seramik agregası kireç taşına oranla daha az miktarda kullanılmış olsa bile seramik malzemesinin porozlu yapısından kaynaklı olarak su emme değerinin (%12) kireç taşının su emme değerine (%0,37) göre çok yüksek olmasından kaynaklanmaktadır (Tablo 4.3). Atık seramik oranı arttıkça karışımın genel

su emme kapasitesi de artmakta ve buna bağlı olarak karışımın hava içeriği de artmaktadır. Atık seramik içeriğindeki artış, karışımın mukavemet ve kohezyon gibi mekanik özelliklerini de etkilemektedir.

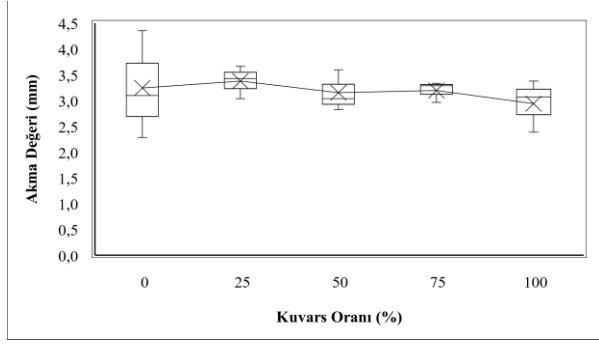
Asfalt karışımlarındaki atık seramik oranları arttıkça Şekil 4.6.d ve Şekil 4.6.e’de görüldüğü üzere, VMA değerleri artmış VFA değerleri ise azalmıştır. VMA değerleri incelendiğinde, atık seramik içermeyen karışım %15,81 iken %25 atık seramik içeren karışımın VMA değeri %23,37’ye yükselmiştir (%48 artış); başlangıçtaki VFA değeri ise %65,06 iken %38,5 azalma göstererek %40,01’e düşmüştür. Bunun nedeni, atık seramik agregasının su emme kapasitesinin kireç taşı agregasına kıyasla daha fazla olmasıdır. Karışımındaki atık seramik oranı arttıkça karışımında daha fazla bağlayıcı emilimi gerçekleşmektedir ve böylece karışımların VMA değerleri artarken VFA değerleri azalmıştır. Ayrıca, atık seramik oranının artmasından kaynaklı bağlayıcının fazlaca emilimi karışımındaki agregaların film kalınlığını da etkilemektedir. Agregaların film kalınlığının az olması karışımında agrega ile bağlayıcı arasındaki yapışmanın azalmasına dolayısıyla karışımın dayanım performansının olumsuz yönde etkilenmesine neden olmaktadır (Al-Khateeb, 2018).

4.3.4. Kuvars içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel özellikleri

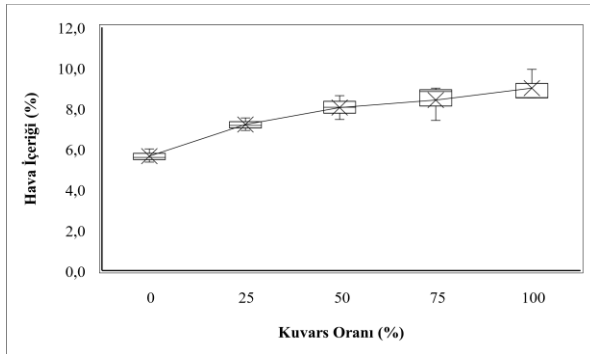
Kuvars agregası %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarda kullanılarak Marshall karışım tasarımına göre hazırlanmış ve asfalt karışımlarda geleneksel agrega ile yer değiştirerek kullanılmıştır. Hazırlanan asfalt beton numuneleri üzerinde Marshall Stabilitate analizleri yapılmış ve karışımın MS, akma, özgül ağırlık, VFA, VMA ve hava içeriği belirlenmiştir. Elde edilen grafikler incelendiğinde kuvars oranı arttıkça, VFA, özgül ağırlık ve akma değerleri azalırken, MS, hava içeriği ve VMA değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.7).



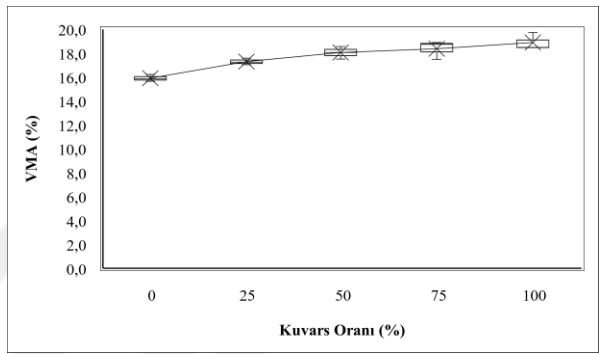
a) Marshall Stabilite



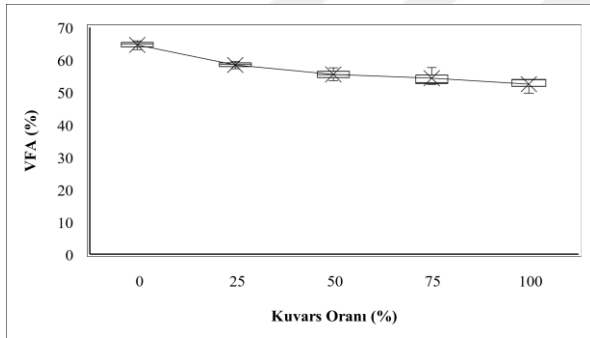
b) Akma Değeri



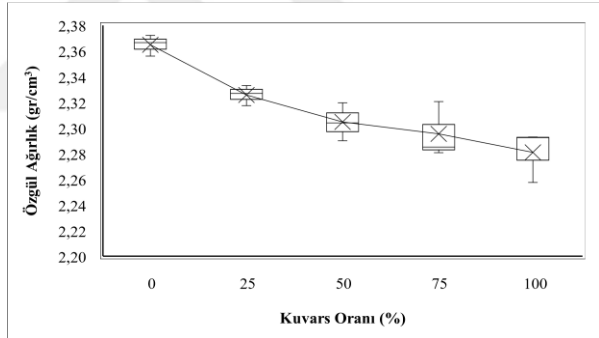
c) Hava İçeriği



d) VMA



e) VFA



f) Özgül Ağırlık

Şekil 4.7. Kuvars içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel analiz sonuçları

Şekil 4.7.a'da kuvars agregasıyla hazırlanan asfalt karışımların Marshall Stabilite sonuçları verilmiştir. Başlangıç değeri 810,58 kg olan MS değeri karışımın kuvars oranı %100 olduğunda 934 kg değerine ulaşmıştır (%15,19 artış). Bu durum, kuvars mineralinin mekanik ve fiziksel özellikleri ile açıklanabilir. Kuvars mineralinin Mohs sertlik cetvelinde sertliğinin 7 olması (Mohs sertlik cetvelinde en dayanıklı malzemenin sertliği 10'dur), dayanımının yüksek bir malzeme olduğunu göstermektedir (Kantarçeken ve diğ., 2021). Ayrıca kuvarsın aşınma direnci (%16,2) kireç taşına (%29,7) göre çok daha az olması karışımın dayanımını artıran parametreler arasında sayılabilir.

Karışımın özgül ağırlık sonuçları incelendiğinde kuvars oranı arttıkça karışımın özgül ağırlık sonuçlarında azalma meydana geldiği görülmektedir (Şekil 4.7.f). %0 ile %100 kuvars içeriğine sahip karışımların özgül ağırlığı toplamda %3,38 oranında azalmıştır. Meydana gelen bu azalma kuvarsın özgül ağırlığının ($2,65 \text{ g/cm}^3$) kireç taşının özgül ağırlığına ($2,73 \text{ g/cm}^3$) göre daha düşük olması şeklinde açıklanabilir. Ayrıca kuvars oranı arttıkça karışımın hava içeriğinde de artış meydana gelmesi karışımın özgül ağırlığının azalmasında etkili olmuştur.

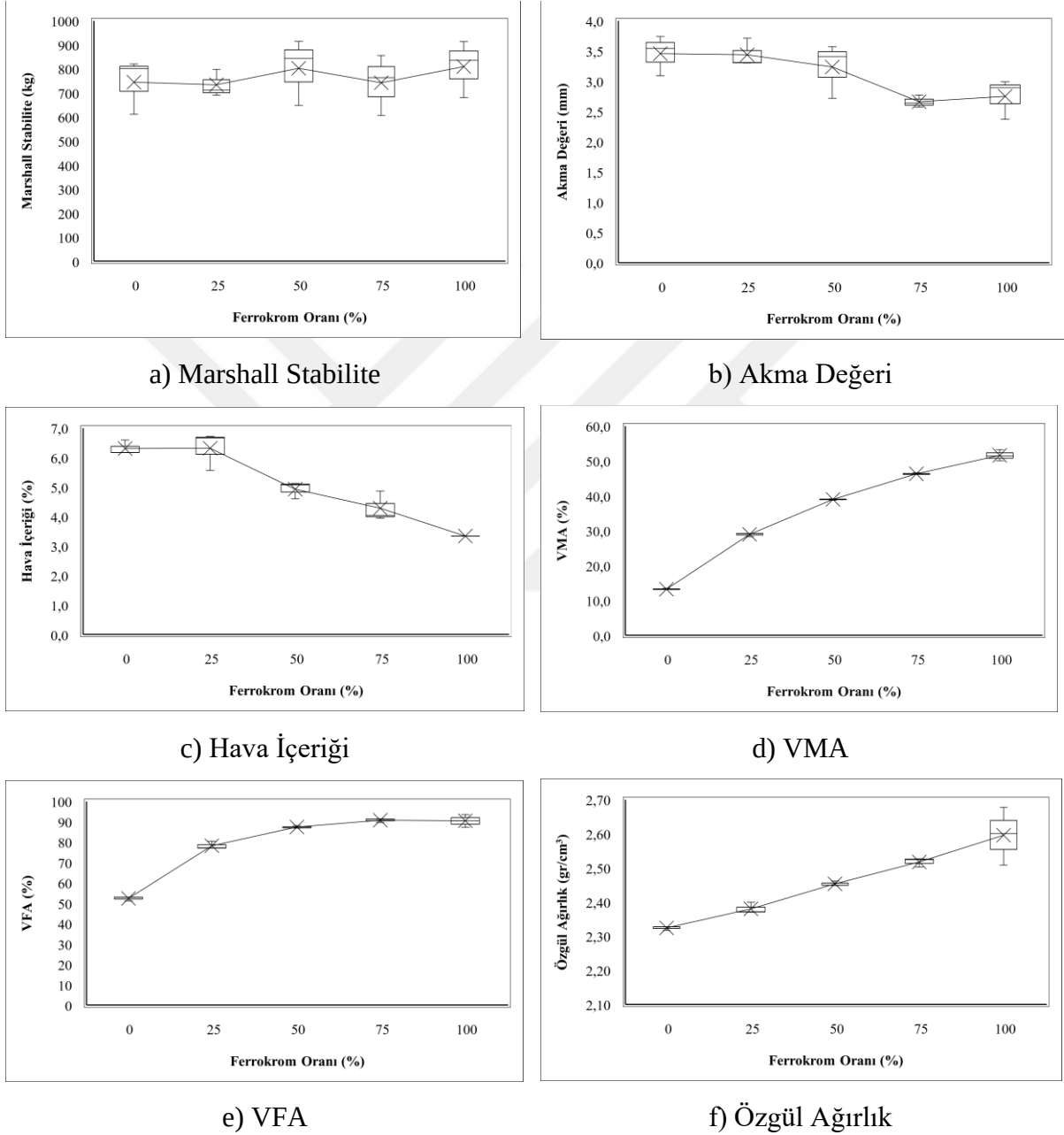
Şekil 4.7.b'deki grafikte karışımın akma değerlerinin sonuçları verilmektedir. Yapılan MS analizi sonucunda başlangıç akma değeri 3,24 mm (kuvars içermeyen karışım) çıkmıştır; ancak kuvars içeriğinin artış göstermesiyle karışımın akma değeri 2,94 mm'ye düşmüştür (%9,25 azalma). Kuvars mineralinin sertliğinin yüksek bir malzeme olması ve kuvars içeriği arttıkça karışımın elastik ve plastik davranışının olumsuz yönde etkilenmesi akma değerlerinin azalmasına neden olmuştur. Asfalt karışımlarda akma değerlerinin azalması karışımın rijitliğini artırarak düşük sıcaklıklarda çatlamaların meydana gelmesine sebep olmaktadır (Ahmedzade ve diğ., 2007).

Şekil 4.7.c ve Şekil 4.7.d'de görüldüğü üzere karışım içerisindeki kuvars oranı arttıkça hava içeriği (%59,39 oranında) ve mineraller arası boşluk oranı (VMA) (%18,74 oranında) artmıştır. Bu artışın sebebi kuvarsın su emme kapasitesinin (%0,5) kireç taşına (%0,3) göre yüksek olması şeklinde açıklanabilir. Kuvars oranı arttıkça karışım içerisindeki bağlayıcının emiliminin arttığı ve daha az bağlayıcının kuvars agregalarını kaplamak (efektif bitüm oranı azalıyor) için kullanıldığı sonucuna varılabilir. Ayrıca kuvarsın bağlayıcı emiliminin yüksek olması sonucunda bitüm ile dolu boşluk oranında (VFA) azalma meydana gelmiştir (%18,71 oranında) (Şekil 4.7.e). VMA ve VFA değerlerindeki bu değişim karışımlardaki agregaları kaplayan bağlayıcının azalmış olduğunu göstermektedir. Asfalt bağlayıcı film kalınlığının yetersiz olması asfalt kaplamalarda agrega ile bitüm arasındaki bağın azalmasına ve agregaların kaplama yüzeylerinden kopmasına neden olmaktadır (Gürer ve Karaşahin, 2014).

4.3.5. Ferrokrom içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel özellikleri

Ferrokrom agregası toplam agreganın %0, %25, %50, %75 ve %100' ü olarak belirlenmiş oranlarda Marshall karışım tasarımına göre asfalt karışımlarda geleneksel kireç taşı agregası ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Hazırlanan asfalt beton numuneleri üzerinde Marshall Stabilit

analizleri yapılmış ve karışımın MS, akma, özgül ağırlık, VFA, VMA ve hava içeriği belirlenmiştir. Elde edilen grafikler incelendiğinde ferrokrom oranı arttıkça, MS, VMA, VFA ve özgül ağırlık değerlerinin arttığı, akma değerleri ve hava içeriğinin azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Ferrokrom içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel analiz sonuçları

Şekil 4.8.a'da ferrokrom agregasıyla hazırlanan asfalt karışımların Marshall Stabilite değerleri gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre ferrokrom içermeyen numunelerin stabilite değeri

744 kg çıkmıştır. Ancak ferrokrom içeriğinin artmasıyla stabilite %8,87 oranda artış göstererek 810 kg'a ulaşmıştır. Bu artışın sebebi ferrokrom malzemesinin kireç taşına göre dayanımı yüksek bir malzeme olması ile açıklanabilir. Karışımda kullanılan her iki agreganın mekanik özelliklerine bakıldığında; yapılan Los Angeles aşınma deneyi sonucunda kireç taşının aşınma oranı %29,7; ferrokromun aşınma oranı ise %16,4 çıkmıştır (Tablo 4.4). Bu değer bize ferrokrom agregasının dayanımının yüksek bir malzeme olduğunu ve karışımın stabilite değerinin artmasında önemli bir etken olduğunu göstermektedir. Ayrıca farklı malzemelerin mekanik özelliklerinin araştırıldığı bir çalışmada; Los Angeles deneyi gibi malzemelerin aşınma dayanımının belirlenebildiği farklı bir yöntem olan Schmidt çekici sertlik deneyi ile ferrokromun sertliğinin ortalama 78,37 olduğu tespit edilmiş ve 'Aşırı Sert' kayaç sınıfında olduğu tespit edilmiştir (Vapur ve diğ., 2013).

Farklı oranlarda ferrokrom kullanılarak hazırlanan karışımların akma değerleri Şekil 4.8.b'de verilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde başlangıçta 3,46 mm olan akma değeri ferrokrom içeriği %100 oranına ulaştığında 2,75 mm'ye düşmektedir. Akma değerinde %19,94 gibi yüksek oranda bir azalmanın meydana gelmesi ferrokromun sertliğinin yüksek, tane yapısının köşeli ve keskin bir yapıda olması ile açıklanabilir (Şekil 3.9). Akma değeri, karışımın içsel sürtünmesinin bir ölçüsünü yansıtan bir parametredir (Yılmaz ve Süttaş, 2015). Ferrokromun keskin ve köşeli yüzeylere sahip olması karışımın içsel sürtünmesinin artmasına dolayısıyla akma değerinde azalma meydana gelmesine sebep olduğu sonucuna varılmıştır.

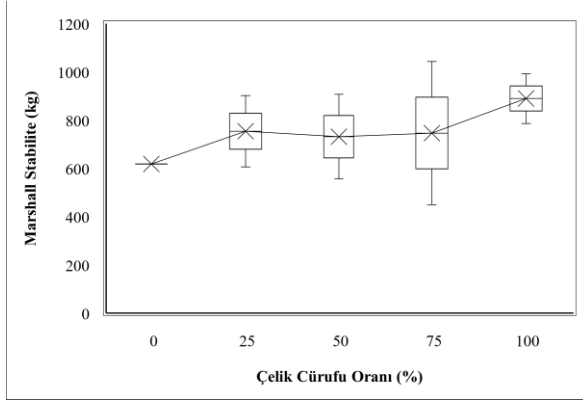
Karışımın ferrokrom oranı arttıkça Şekil 4.8.f'de verildiği üzere özgül ağırlık değerlerinde de artış meydana gelmiştir. Ferrokrom içermeyen karışımın özgül ağırlığı $2,32 \text{ g/cm}^3$ iken %100 ferrokrom içeriğine sahip karışımların özgül ağırlığı toplamda %12,06 oranında artarak $2,6 \text{ g/cm}^3$ değerine ulaşmıştır. Ferrokromun özgül ağırlığının ($2,93 \text{ g/cm}^3$) kireç taşının özgül ağırlığından ($2,73 \text{ g/cm}^3$) daha yüksek olması, karışımda ferrokrom içeriğinin artmasına bağlı olarak karışımın özgül ağırlığının artmasına sebep olmuştur.

Şekil 4.8.c, Şekil 4.8.e ve Şekil 4.8.d'de görüldüğü üzere karışım içerisindeki ferrokrom oranı arttıkça hava içeriğinde azalma, bitüm ile dolu boşluk (VFA) ve agregalar arası boşluk oranında (VMA) artma meydana gelmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde, ferrokromun içsel sürtünmesinin yüksek olmasından dolayı karışımda ferrokrom oranı arttıkça agregaların sıkışma miktarı artmış ve bu şekilde karışımın hava içeriğinin azaldığı sonucuna varılabilir.

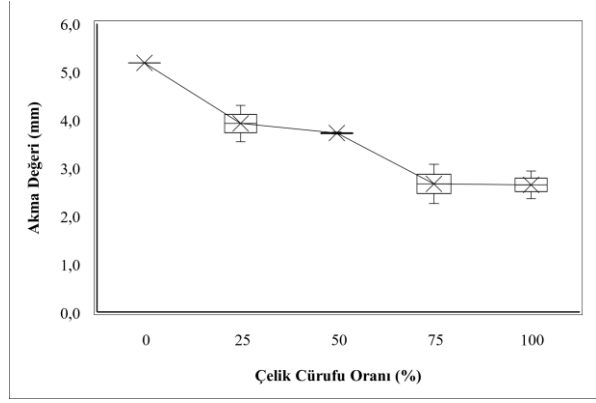
Ancak ferrokrom agregasının keskin ve köşeli yapısından kaynaklı karışımın agregalar arası boşluk oranı (VMA) artmıştır. Karışımın VFA değerlerindeki artış karışımdaki hava boşluğunun azalmasından dolayı agregaların bağlayıcı tarafından efektif bir şekilde kaplandığını göstermektedir. Asfalt bağlayıcı film kalınlığının yüksek olması agrega ile bitüm arasındaki bağın güçlü olmasına ve asfalt kaplamaların dayanım performansının artmasını sağlamaktadır.

4.3.6. Çelik cürufu içeren asfalt karışımlarının mekanik ve hacimsel özellikleri

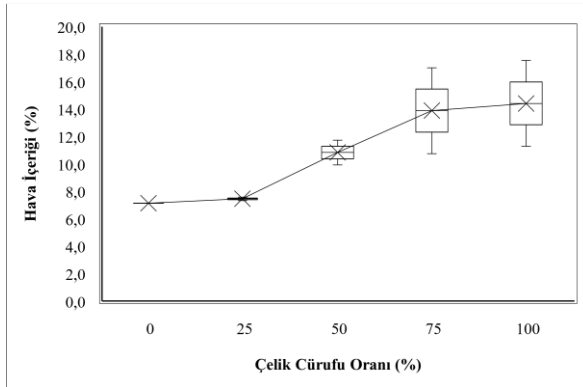
Çelik cürufu, toplam agreganın %0, %25, %50, %75 ve %100' ü olarak belirlenmiş oranlarda Marshall karışım tasarımına göre hazırlanan asfalt karışımlarda kireç taşı ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Hazırlanan asfalt beton numuneleri üzerinde Marshall Stabilitate analizleri yapılmış ve karışımın MS, akma, özgül ağırlık, VFA, VMA ve hava içeriği değerleri belirlenmiştir. Yapılan analizler sonucunda elde edilen grafiklerde çelik cürufu oranı arttıkça, VMA, VFA, MS, hava içeriği ve özgül ağırlık değerlerinin arttığı, akma değerlerinin azaldığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.9).



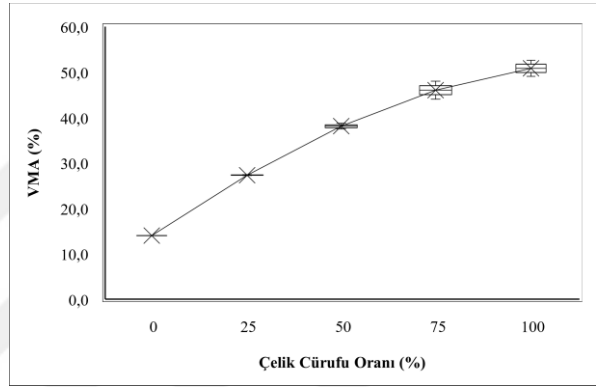
a) Marshall Stabilite



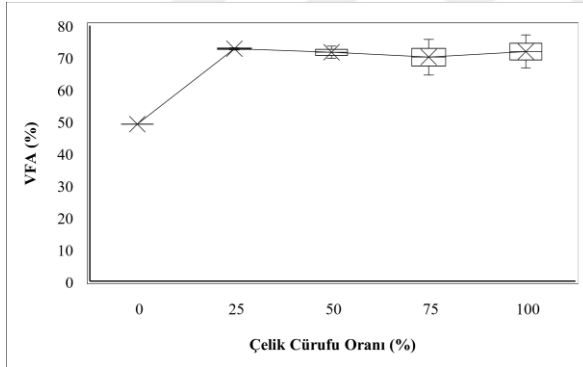
b) Akma Değeri



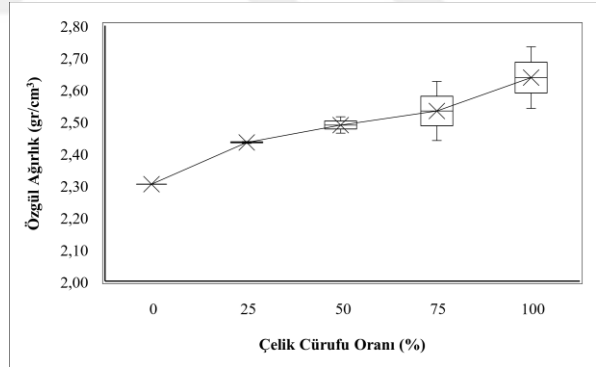
c) Hava İçeriği



d) VMA



e) VFA



f) Özgöl Ağırlık

Şekil 4.9. Çelik cürufu içeren asfalt karışımların mekanik ve hacimsel analiz sonuçları

Şekil 4.9.a'da farklı oranlarda çelik cürufu agregasıyla hazırlanan asfalt karışımların stabilite değerleri gösterilmektedir. Grafik sonuçlarına göre başlangıç stabilite değeri 618,13 kg iken cüruf oranı arttıkça 889,04 kg değerine ulaşmıştır (%100 cüruf içeriğinde). Çelik cürufunun kireç taşına göre dayanım özelliklerinin daha yüksek olması sebebiyle karışımdaki oranı arttıkça stabilite değerlerinde artış meydana gelmiştir. Karışımda kullanılan her iki agreganın mekanik özelliklerine bakıldığında; yapılan Los Angeles aşınma deneyi sonucunda kireç taşının

aşınma oranı %29,7 çelik cürufunun aşınma oranı ise %22,2 çıkmıştır (Tablo 4.4). Bu değer bize çelik cürufunun dayanımının yüksek bir malzeme olduğunu ve karışımın stabilite değerinin artmasında önemli bir etken olduğunu göstermektedir. Çelik cürufu ile ilgili yapılan farklı çalışmalarda da asfalt karışımın stabilite değerlerini olumlu yönde etkilediği ve dayanımı arttırdığı savunulmuştur (Kandhal ve Hoffman, 1982; Noureldin ve diğ., 1990; Ahmedzade ve Şengöz, 2009; Kehagia, 2009, Hainin ve diğ., 2012)

Çelik cürufu ile hazırlanan karışımların akma değerleri Şekil 4.9.b’de verilmiştir. Elde edilen veriler incelendiğinde başlangıçta 5,18 mm olan akma değeri çelik cürufu %100 oranına ulaştığında 2,65 mm’ye düşmektedir. Karışımın akma değerinde azalmanın meydana gelmesi çelik cürufunun dayanımı yüksek sert bir malzeme (Mohs sertlik derecesi 5-7) ve tane yapısının da köşeli olması (Şekil 3.10) sebebiyle karışımın içsel sürtünmesi artmış ve akma değerleri azalmıştır (Wen ve diğ., 2016). Akma değerinin çok düşük olması halinde karışım rijit bir davranış göstermekte ve bunun sonucunda da kaplamada tekerlek izi gibi kalıcı deformasyonlar meydana gelebilmektedir (Noureldin ve diğ., 1990; Behnood ve diğ., 2012; Hainin ve diğ., 2012; Chen ve diğ., 2021).

Karışımın çelik cüruf oranı arttıkça Şekil 4.9.f’de verildiği üzere özgül ağırlık değerlerinde artış meydana gelmiştir. Çelik cürufu içermeyen karışımın özgül ağırlığı $2,3 \text{ g/cm}^3$ iken %100 cüruf içeriğine sahip karışımların özgül ağırlığı toplamda %14,78 oranında artarak $2,64 \text{ g/cm}^3$ değerine ulaşmıştır. Çelik cürufunun özgül ağırlığının $3,43 \text{ g/cm}^3$ olması ve kireç taşının özgül ağırlığından (yaklaşık %26 oranında) çok daha yüksek olması, karışımın özgül ağırlığının artmasına neden olmuştur (Tablo 4.3).

Şekil 4.9.c, Şekil 4.9.e ve Şekil 4.9.d’de görüldüğü üzere karışım içerisindeki çelik cürufu oranı arttıkça hava içeriği, bitüm ile dolu boşluk (VFA) ve agregalar arası boşluk oranında (VMA) artma meydana gelmiştir. Karışımında kullanılan çelik cürufunun kireç taşına kıyasla köşeli ve gözenekli yapısından dolayı karışımın hava içeriğinin arttığı ve su emme kapasitesinin yüksek olması (%2,28) sebebiyle de karışım içerisindeki bağlayıcı emiliminin artmış olabileceğinden grafikte VFA değerleri yüksek çıkmıştır. Ayrıca çelik cürufun fiziksel yapısının çok sert, köşeli ve keskin şekilde olması karışımın sıkıştırılma miktarını etkilemiş ve agregalar arasındaki boşluk oranının (VMA) bu sebepten dolayı artış gösterdiği söylenebilir. Önceki yapılan çalışmalarda yukarıdaki sonuçları destekler nitelikte veriler elde edilmiş ve çelik cürufunun

dayanımının yüksek ve asfalt karışımlarda kullanılması uygun bir malzeme olduğu ancak fiziksel özelliklerinden dolayı (gözeneklilik, su emme ve köşelilik) karışım içerisinde fazla miktarda kullanılmasının kaplamanın performansını olumsuz etkileyebileceği sonucunda varılmıştır (Kneller ve diğ., 1994; Farrand ve diğ., 1995; Asi ve diğ., 2007; Wu ve diğ., 2007).

4.4. Katkı Malzemeleri İçeren Asfalt Karışımların Mikromorfolojik Analizleri

Doktora tez çalışması kapsamında asfalt karışımlarda kullanılan katkı malzemelerinin karışım içerisindeki davranışları ve asfaltla olan etkileşimlerini ve asfalt karışımları oluşturan bileşenler arasındaki ilişkileri incelemek amacıyla cilalı bloklar ve ince kesitler elde edilerek optik ve binoküler mikroskop altında incelenmiştir.

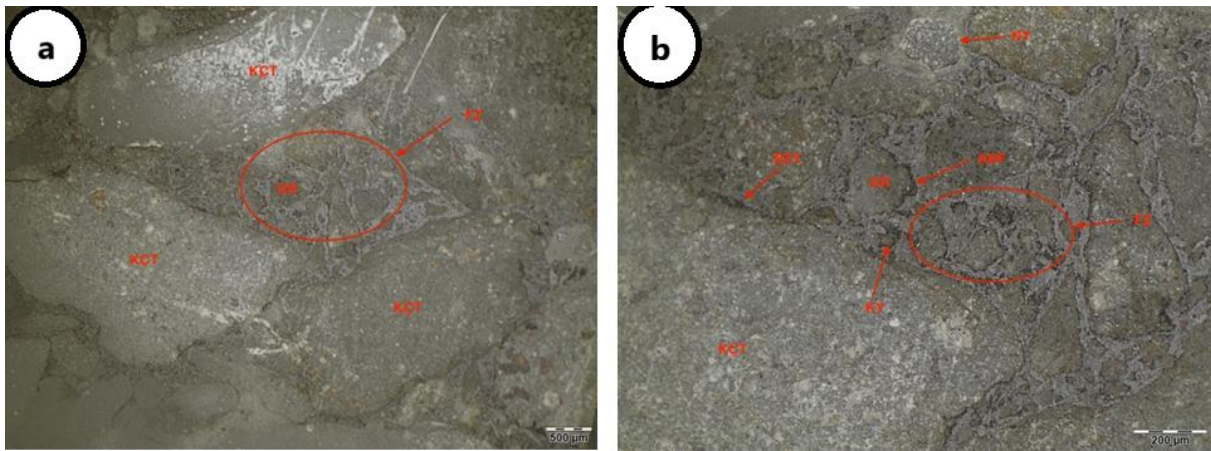
4.4.1. Grafit tozu içeren asfalt karışımın Mikromorfolojik analizi

Grafit tozu içeren asfalt karışımın tipik mikromorfolojik görünüşleri Şekil 4.10'da sunulmuştur. Agregata ve diğer bileşenlerin genel görünüşleri incelendiğinde, tanelerin gelişigüzel (random) yönelimli oldukları, boşlukların geniş ve genelde bağlantılı oldukları, tane dokusunun McConnachie (1974) tanımlamalarına göre köşe-köşe ve köşe-yüzey ilişkileriyle karakterize edildiği görülmektedir (Şekil 4.10.a ve 4.10.b). Filler olarak eklenen grafit tane şekilleri genelde köşeli ve yarı-köşeli şekilli olup, önemli bir kesimi uzamış yapıdadır ve bazı yüzeyler boyunca absorbe olmuş binder zonları bulunmaktadır.

Tam ve/veya kısmen gelişmiş asfalt binder film tabakası gelişmiş olup, ölçümler tam gelişmiş asfalt film tabakalarının kalınlıklarının minimum 10 µm ve maksimum 40 µm olduğunu göstermektedir. Asfalt binder film tabakası kalınlıklarının tane boyutları ile ilişkili oldukları, Kandhal ve Chakraborty (1996a, b) ve Kandhal ve diğerlerinin (1998) çalışmalarındaki sonuçlara benzer şekilde iri taneler etrafında daha ince film kalınlığı şeklinde oluştukları görülmektedir. Ayrıca, Karim ve diğerlerinin (2021) çalışma sonuçlarına benzer şekilde asfalt film tabakası filler taneleri etrafında, 150-1300 µm kalınlığında non-absorbe (efektif bağlayıcı kalınlığı) binder bantları şeklinde görülmektedir.

Ayrıca daha önce yapılmış birçok çalışmada (Elseifi ve diğ., 2008; Jiang ve diğ., 2022; Sukkari ve diğ., 2022a, b; Al-Khateeb ve diğ., 2023) olduğu gibi, asfalt binder agregata taneleri arasında

eşit olarak dağılım göstermemekte, filler taneleri ise bağlayıcı içerisinde gömülü veya çevrilmiş halde asfalt mastiği oluşturmaktadır. Ayrıca, hava boşlukları, uzun grafit filler taneleri ile pürüzsüz kireç taşı agrega tane yüzeyleri boyunca kümelenme eğiliminde olup, karışımda dolayısıyla da asfalt betonunda zayıf noktalar/hatlar oluşturmaktadır. Dolayısıyla, grafit tozu oranı arttıkça, stabilitede önemli sayılabilecek düşüşler gözlenmekle, oran arttıkça daha yüksek miktarda asfalt emilimi gerçekleşmekte, bu da taneler etrafında bağlayıcı film tabakası oluşturabilmek için kullanıma hazır asfalt miktarını azaltmaktadır. Bu durum karışımın VMA değeri artarken VFA değerinin yaklaşık aynı kalmasına sebep olmaktadır.

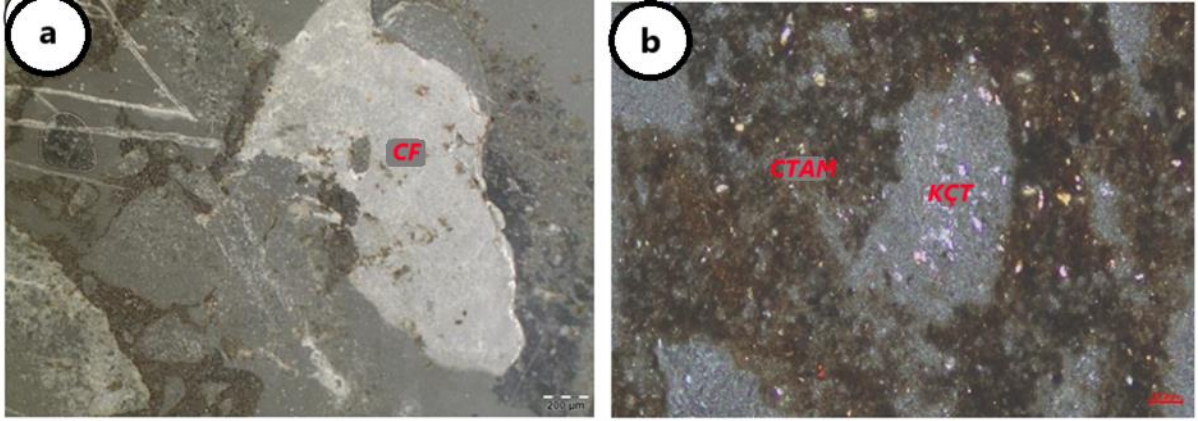


Şekil 4.10. Grafit tozu içeren asfalt karışımın tipik Mikromorfolojik görünümü; (a) tane ilişkilerini gösteren genel görünüm, (b) agregalar, grafit filler (GR), boşluklar, filler dolgulu boşluklar (FZ), başarısız yapışma (BZY), kısmi yapışma (KY), non-yapışma (NY), asfalt binder film tabakası (ABF), kireç taşı agregası (KÇT). Fotoğraflar daha net görüntü için gerekli filtreler kullanılarak binoküler mikroskop altında çekilmiştir.

4.4.2. Atık cam tozu içeren asfalt karışımın Mikromorfolojik analizi

Atık cam tozu içeren asfalt karışımın tipik mikromorfolojik görünümleri Şekil 4.11.'de verilmiştir. Agrega ve diğer bileşenlerin genel görünümleri incelendiğinde, tanelerin gelişigüzel (random) yönelimli oldukları, boşlukların geniş ve genelde bağlantılı oldukları, tane dokusunun McConnachie (1974) tanımlamalarına göre köşe-yüzey ve yüzey-yüzey ilişkileriyle karakterize edildiği görülmektedir (Şekil 4.11.a ve 4.11.b). Filler olarak eklenen atık cam tozu taneleri genelde köşeli ve yarı-köşeli şekillidir. Cam hidrofobik bir malzeme olmasından dolayı Şekil 4.11.a'da görüldüğü üzere cam tozu tarafından bağlayıcıyı emilimi gerçekleşmemiş ve bu durum sonucunda karışım içerisinde tam bir adezyon sağlanamamıştır. Bu durumun karışımın

stabilitesinin azalmasına sebep olduğu söylenebilir. Ayrıca Şekil 4.11.b incelendiğinde atık cam tozu ve kireç taşı filler malzemelerinin iri taneli kireç taşı agregalarının etrafında toplandığı görülmektedir. Bu durumun karışım içerisindeki atık cam tozu oranı arttıkça hava içeriği ve VMA değerlerinin artmasına neden olduğu söylenebilir.

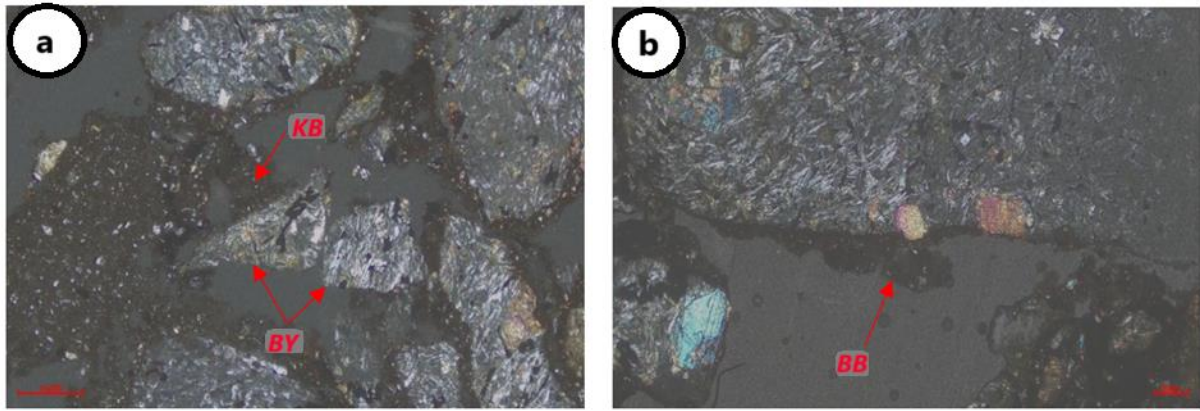


Şekil 4.11. Atık cam tozu içeren asfalt karışımın tipik Mikromorfolojik görünümü; (a) Bağlayıcı emilimi gerçekleştirilmeyen cam tozu tanecikleri, (b) Atık cam ve kireç taşı filler taneciklerinin, kireç taşı agregaları ile bağlanma sağlayarak asfalt mastik oluşturması. Fotoğraflar daha net görüntü için gerekli filtreler kullanılarak binoküler mikroskop altında çekilmiştir. Cam filler (CF), cam tozu içeren mastik asfalt (CTAM), kireç taşı agregası (KÇY).

4.4.3. Atık seramik içeren asfalt karışımın Mikromorfolojik analizi

Atık seramik içeren asfalt karışımın tipik mikromorfolojik görünümleri Şekil 4.12.'de sunulmuştur. Agrega ve diğer bileşenlerin genel görünümleri incelendiğinde, tanelerin gelişigüzel (random) yönelimli oldukları, boşlukların geniş ve genelde bağlantılı oldukları, tane dokusunun McConnachie (1974) tanımlamalarına göre köşe-yüzey ve yüzey-yüzey ilişkileriyle karakterize edildiği görülmektedir (Şekil 4.12.a ve 4.12.b). Tane şekilleri esas olarak köşeli ile yarı köşelidir, ancak özellikle filler bileşenleri arasında bazı yarı yuvarlak taneler bulunmaktadır. Seramik agregaları karışım içerisinde çoğunlukla pullu/plakamsı ve uzunlamasına şekildedir. Şekil 4.12.a'da görüldüğü üzere atık seramik agregalarının cilalı yüzeylerine sahip olan tanelerinde bağlayıcı emilimi gerçekleşmediğinden dolayı tam bir adezyon sağlayamadığı görülmektedir. Şekil 4.12.b'de ise cilalı olmayan kırık yüzeyli seramik agregalarda ise bağlayıcı emiliminin olduğu ve karışım içerisinde adezyonun bu kısımlardan dolayı sağlandığı anlaşılmaktadır. Ancak karışımlarda atık seramiğin agrega olarak

kullanılması ve cilalı yüzeye sahip tanelerin olması sebebiyle bağlayıcı emilimi sağlıklı olarak gerçekleşemeyen kısımlarda tam bir adezyon sağlanamamıştır. Bu durum sonucunda da asfalt karışımların stabilite değerlerinin azalmış olabileceği sonucuna varılabilir. Diğer bir yandan seramik agregaların genel olarak su emme oranı (%12) yüksek bir malzeme olmasından dolayı cilalı olmayan kırık yüzeyleri tarafından fazla miktarda asfalt emilimi gerçekleşmiş ve bu da agregaların etrafında bağlayıcı film kalınlığının azalmasına neden olmuştur. Bu durumdan dolayı karışımın seramik oranı arttıkça VMA değerlerinin artması ve VFA değerlerinin de azalmasına neden olmuştur.



Şekil 4.12. Atık seramik içeren asfalt karışımın tipik Mikromorfolojik görünümü; (a) kısmi bağlanma olan ve seramiğin cilalı yüzeyinden kaynaklanan bağlanmanın oluşmadığı yüzey, (b) Bağlanmanın tek yüzeyde olduğu ve diğer taneciklere ulaşmadığı başarılı bağlanma. Fotoğraflar daha net görüntü için gerekli filtreler kullanılarak optik mikroskop altında çekilmiştir. Kısmi bağlanma (KB), bağlanmayan yüzey (BY), başarılı bağlanma (BB).

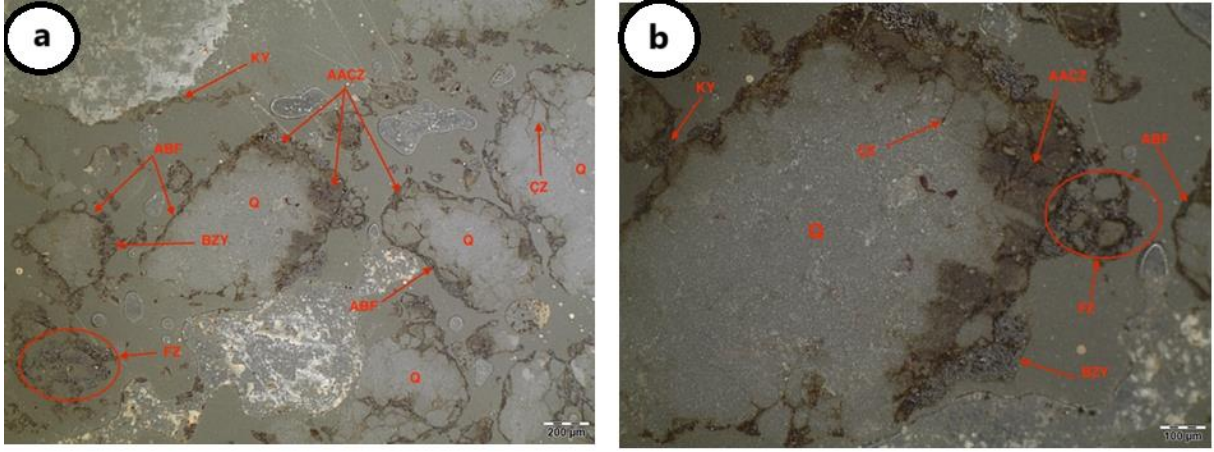
4.4.4. Kuvars içeren asfalt karışımın Mikromorfolojik analizi

Kuvars agregası içeren asfalt karışımın tipik mikromorfolojik görünümü Şekil 4.13'te sunulmuştur. Agregası ve diğer bileşenlerin genel görünümü incelendiğinde, tanelerin gelişigüzel (random) yönelimli oldukları, boşlukların geniş ve genelde bağlantılı oldukları, tane dokusunun McConnachie (1974) tanımlamalarına göre köşe-köşe ve köşe-yüzey ilişkileriyle karakterize edildiği görülmektedir (Şekil 4.13.a ve 4.13.b). Agregası olarak eklenen kuvars tane şekilleri genelde köşeli, yarı-köşeli şekilli olup, hemen hemen tamamı yüzeyleri boyunca, büyük olasılıkla yüksek sertliğe sahip olmalarından dolayı (MOHS sertlik cetvelinde 10

üzerinden çatlaklı zonlara sahiptir. Söz konusu bu çatlaklı yüzeyler boyunca absorbe olmuş binder zonlarının yaygın olması dikkat çekmektedir (minumum 10 μm , maksimum 260 μm).

Tam ve/veya kısmen gelişmiş asfalt film tabakaları mevcut olup, ölçümler tam gelişmiş asfalt film tabakalarının kalınlıklarının minumum 5 μm ve maksimum 80 μm olduğunu göstermektedir. Asfalt film tabakası kalınlıklarının tane boyutları ile ilişkili oldukları, Kandhal ve Chakraborty (1996a, b) ve Kandhal ve diğerlerinin (1998) çalışmalarındaki sonuçlara benzer şekilde iri taneler etrafında daha ince film tabakası şeklinde oluştukları görülmektedir. Ayrıca, Karim ve diğerlerinin (2021) çalışmasındaki sonuçlara benzer şekilde asfalt film tabakası filler taneleri etrafında, 160-1200 μm kalınlığında non-absorbe (efektif bağlayıcı kalınlığı) binder bantları şeklinde görülmektedir.

Ayrıca daha önce yapılmış birçok çalışmada (Elseifi ve diğ., 2008; Jiang ve diğ., 2022; Sukkari ve diğ., 2022a, b; Al-Khateeb ve diğ., 2023) olduğu gibi, asfalt agregası taneleri arasında eşit olarak dağılım göstermemekte, filler taneleri ise bağlayıcı içerisinde gömülü veya çevrilmiş halde asfalt mastiği oluşturmaktadır. Ayrıca, yukarıda bahsedilen çatlaklı zonların asfalt ile doldurulmadığı yerlerde, hava boşlukları, kuvars taneleri ile pürüzsüz kireç taşı agregası yüzeyleri boyunca kümelenme eğiliminde olup, asfalt betonunda zayıf noktalar/hatlar oluşturmaktadır. Bu sebeple de kuvars oranı arttıkça, stabilitede küçük artışlar gözlenmekle beraber, oran arttıkça, daha yüksek miktarda asfalt tane yüzeyleri boyunca gelişmiş olan çatlaklı zonlarda absorbe edilmekte, bu da taneler etrafında bağlayıcı film tabakası oluşturabilmek için kullanıma hazır asfalt miktarını azaltmakta, dolayısıyla da VMA değeri artmasına rağmen VFA değerinde düşüşler gözlenmektedir.



Şekil 4.13. Kuvars içeren asfalt karışımın tipik Mikromorfolojik görünümü; (a) tane ilişkilerini ve çatlaklı yüzeyler boyunca absorbe olmuş binder zonlarını gösteren genel görünüm, (b) yakın plan görüntüsü; kuvars agregaları (Q), filler, boşluklar, filler dolgulu boşluklar (FZ), çatlaklı zonlar (ÇZ), çatlaklı yüzeyler boyunca absorbe olmuş binder zonlarını (AACZ), başarısız yapışma (BZY), kısmi yapışma (KY), asfalt binder film kalınlığı (ABF). Fotoğraflar daha net görüntü için gerekli filtreler kullanılarak binoküler mikroskop altında çekilmiştir.

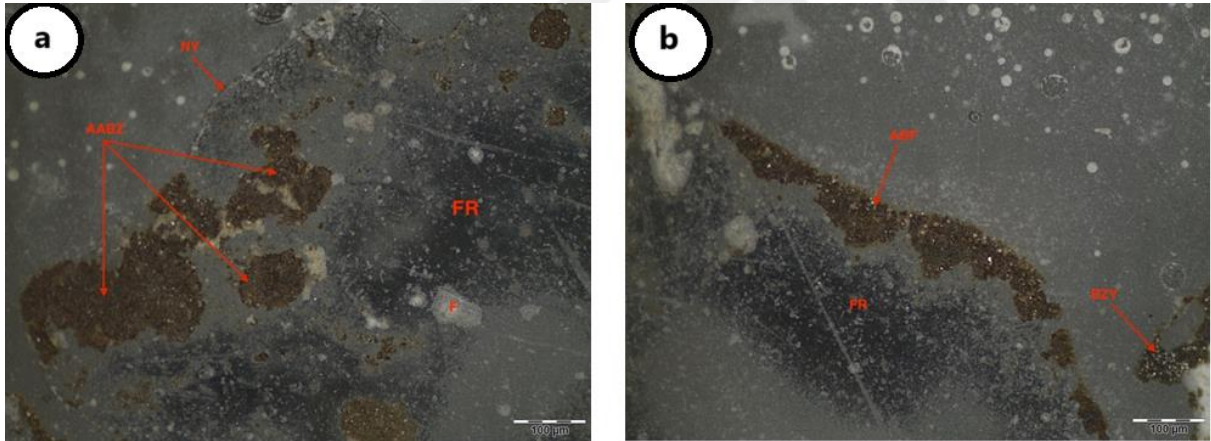
4.4.5. Ferrokrom içeren asfalt karışımın Mikromorfolojik analizi

Ferrokrom agregası içeren asfalt karışımın tipik mikromorfolojik görünümü Şekil 4.14.'te sunulmuştur. Agregat ve diğer bileşenlerin genel görünümü incelendiğinde, tanelerin gelişigüzel (random) yönelimli oldukları, boşlukların geniş ve genelde bağlantılı oldukları, tane dokusunun McConnachie (1974) tanımlamalarına göre köşe-yüzey ve yüzey-yüzey ilişkileriyle karakterize edildiği görülmektedir (Şekil 4.14.a ve 4.14.b). Her ne kadar filler bileşenleri arasında bazı taneler yuvarlak şekilli olsa da agregat olarak eklenen ferrokrom tane şekilleri genelde köşeli ve yarı-köşeli şekilli ve önemli bir kesimi levhamsı ve uzamış yapıda olup yüzeyler boyunca absorbe olmuş binder zonları görülebilmektedir.

Tam ve/veya kısmen gelişmiş binder film tabakası gelişmiş olup, ölçümlerimiz tam gelişmiş asfaltla kaplı film tabakalarının kalınlıklarının minimum 5 µm, maksimum 120 µm olduğunu göstermektedir. Binder film tabakası kalınlıklarının tane boyutları ile ilişkili oldukları, Kandhal ve Chakraborty (1996a, b), Kandhal ve diğerlerinin (1998) yapmış olduğu çalışmalarda sonuçlara benzer şekilde iri taneler etrafında daha ince olacak şekilde oluştukları görülmektedir. Ayrıca, Karim ve diğ. (2021) sonuçlarına benzer şekilde asfalt binder film tabakası filler

taneleri etrafında, 280-720 µm kalınlığında non-absorbe (efektif bağlayıcı kalınlığı) binder bantları şeklinde görülmektedir.

Literatüre bakıldığında yapılmış olan birçok çalışmada (Elseifi ve diğ., 2008; Jiang ve diğ., 2022; Sukkari ve diğ., 2022a, b; Al-Khateeb ve diğ., 2023) olduğu gibi, asfalt ile agrega taneleri arasında eşit olarak dağılım göstermemekte, filler taneleri ise asfalt içerisinde gömülü veya çevrilmiş halde asfalt mastiği oluşturmaktadır. Bu duruma ek olarak yukarıda bahsedilen boşlukların asfalt ile doldurulmadığı yerlerde, hava boşlukları, uzun ferrokrom taneleri ile pürüzsüz kireç taşı agrega tane yüzeyleri boyunca kümelenme eğiliminde olup, bu sebepten dolayı karışımda asfalt betonunda zayıf noktalar/hatlar oluşturmaktadır. Ferrokrom oranı arttıkça, stabilitede küçük artışlar gözlenmekle birlikte daha yüksek miktarda asfalt emilimi gerçekleşmektedir. Bu durum taneler etrafında asfalt binder film tabakası oluşturabilmek için kullanıma hazır asfalt miktarını azaltmakta ve VMA değeri artmasına rağmen VFA değeri %25, özellikle de %50'den sonra ise hemen hemen aynı kalmaktadır.



Şekil 4.14. Ferrokrom içeren asfalt karışımının tipik Mikromorfolojik görünümü; (a) tane ilişkilerini ve vesiküler (boşluklu) yüzeyler boyunca absorbe olmuş binder zonlarını (AABZ) gösteren genel görünüm, (b) yakın plan görüntüsü; ferrokrom agregaları (FR), filler (F), başarısız yapışma (BZY), non-yapışma (NY), asfalt binder film kalınlığı (ABF). Fotoğraflar daha net görüntü için gerekli filtreler kullanılarak binoküler mikroskop altında çekilmiştir.

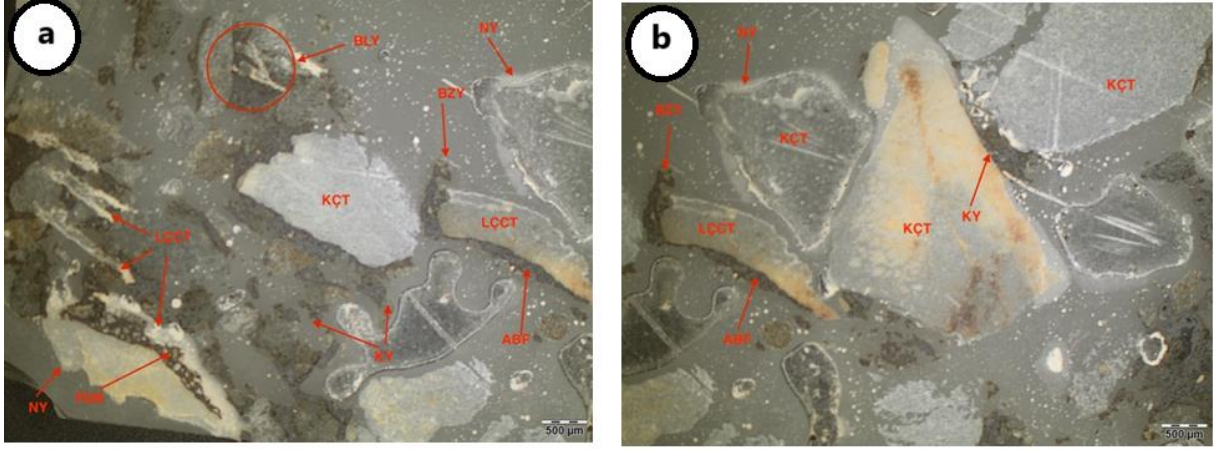
4.4.6. Çelik cürufu içeren asfalt karışımının Mikromorfolojik analizi

Çelik cürufu içeren asfalt karışımının tipik Mikromorfolojik görünümleri Şekil 4.15'te sunulmuştur. Agrega ve diğer bileşenlerin genel görünümleri incelendiğinde, tanelerin

gelişigüzel (random) yönelimli oldukları, boşlukların geniş ve genelde bağlantılı oldukları, tane dokusunun McConnachie (1974) tanımlamalarına göre köşe-yüzey ve yüzey-yüzey ilişkileriyle karakterize edildiği görülmektedir (Şekil 4.15.a ve 4.15.b). Her ne kadar filler bileşenleri arasında bazı taneler yuvarlak şekilli olsa da agrega olarak eklenen çelik cürufu tane şekilleri genelde köşeli ve yarı-köşeli şekilli ve önemli bir kesimi levhamsı ve uzamış yapıda olup yüzeyler boyunca absorbe olmuş binder zonları görülebilmektedir.

Tam ve/veya kısmen gelişmiş binder film tabakası gelişmiş olup, ölçümler tam gelişmiş asfalt film tabaka kalınlıklarının minimum 10 μm ve maksimum 150 μm olduğunu göstermektedir. Bağlayıcı film tabakası kalınlıklarının tane boyutları ile ilişkili oldukları, Kandhal ve Chakraborty (1996a, b) ve Kandhal ve diğerlerinin (1998) çalışmalarındaki sonuçlara benzer şekilde iri taneler etrafında daha ince film tabakası şeklinde oluştukları görülmektedir. Ayrıca, Karim ve diğerlerinin (2021) çalışmasının sonuçlarına benzer şekilde bağlayıcı film tabakası filler taneleri etrafında, 200-700 μm kalınlığında non-absorbe (efektif bağlayıcı kalınlığı) binder bantları şeklinde görülmektedir.

Ayrıca daha önce yapılmış birçok çalışmada (Elseifi ve diğ., 2008; Jiang ve diğ., 2022; Sukkari ve diğ., 2022a, b; Al-Khateeb ve diğ., 2023) olduğu gibi, asfalt agrega taneleri arasında eşit olarak dağılım göstermemekte, filler taneleri ise bağlayıcı içerisinde gömülü veya çevrilmiş halde asfalt mastiği oluşturmaktadır. Ayrıca, hava boşlukları, levhamsı ve/veya uzun çelik cürufu ile pürüzsüz kireç taşı agrega tane yüzeyleri boyunca kümelenme eğiliminde olup, asfalt betonunda zayıf noktalar/hatlar oluşturmaktadır. Bunun sonucunda stabilite önce hafifçe yükselmekte, sonra %75 karışım oranına kadar aynı kalmakta ve daha sonra da %100 oranda tekrar hafifçe yükselmektedir. Çelik cüruf oranı arttıkça, daha yüksek miktarda bağlayıcı absorbe edilmekte, bu durum taneler etrafında bağlayıcı film tabakası oluşturabilmek için kullanıma hazır asfalt miktarını azaltmakta, dolayısıyla da VMA değeri artmasına rağmen VFA değeri %25 oranından sonra aynı kalmaktadır.



Şekil 4.15. Çelik cürufu içeren asfalt karışımının tipik Mikromorfolojik görünümü; (a) tane ilişkilerini gösteren genel görünüm, (b) agregalar, filler, boşluklar, filler dolgulu boşluklar (FDB), başarısız yapışma (BZY), kısmi yapışma (KY), non-yapışma (NY), başarılı yapışma (BLY), asfalt binder film kalınlığı (ABF), levhamsı çelik curüfu tanesi (LÇCT), kireç taşı agregası (KÇT). Fotoğraflar daha net görüntü için gerekli filtreler kullanılarak binoküler mikroskop altında çekilmiştir.

4.5. Katkı Malzemesi İçeren Asfalt Karışımların Elektromanyetik İletim Özellikleri

Asfalt karışımların içerisinde kullanılan farklı katkı malzemelerinin asfalt betonunun elektromanyetik iletimin artırılmasının araştırılması ve elektromanyetik iletim ölçümlerinin daha sağlıklı yapılması amacıyla yüzey alanı geniş (150 mm×150 mm×23,25 mm) ve Marshall deneyinde hazırlanan karışımlarla aynı hacimde numuneler üretilmiştir. Numunelerin homojen bir şekilde sıkıştırılması amacıyla 150 mm×150 mm×23,25 mm boyutlarında kalıp ve yarım santimetre kalınlığında bir çelik plaka tasarlanarak imal edilmiştir. Vektör Network Analizörü, S parametreleri olarak adlandırılan saçılma parametrelerini ölçmektedir. S11 ve S22 parametreleri bir porttan diğerine yansıyan sinyalleri ifade ederken, S12 ve S21 parametreleri iki portlu bir sistemde bir porttan diğerine iletilen sinyalleri ifade etmektedir. Elektromanyetik dalgaların iletiminin ölçüleceği numuneler Süper Yüksek Frekans Bandında (SHF) 3-18 GHz geniş bir frekans bandında test edilmiştir. Frekans bandında elektromanyetik dalgalar geniş spektrumlarına sahiptir olmaktadır. Elektromanyetik iletimde; gönderilen elektromanyetik dalgaların soğurulması veya yansıtılmasından dolayı oluşan kayıp elektromanyetik geçirgenliğin sanal kısmını oluşturmaktadır (Chen ve diğ., 2009; Dai ve diğ., 2010; Tong ve diğ., 2011; Wang ve diğ., 2014; Öztürk ve diğ., 2020). Elektromanyetik geçirgenliğin

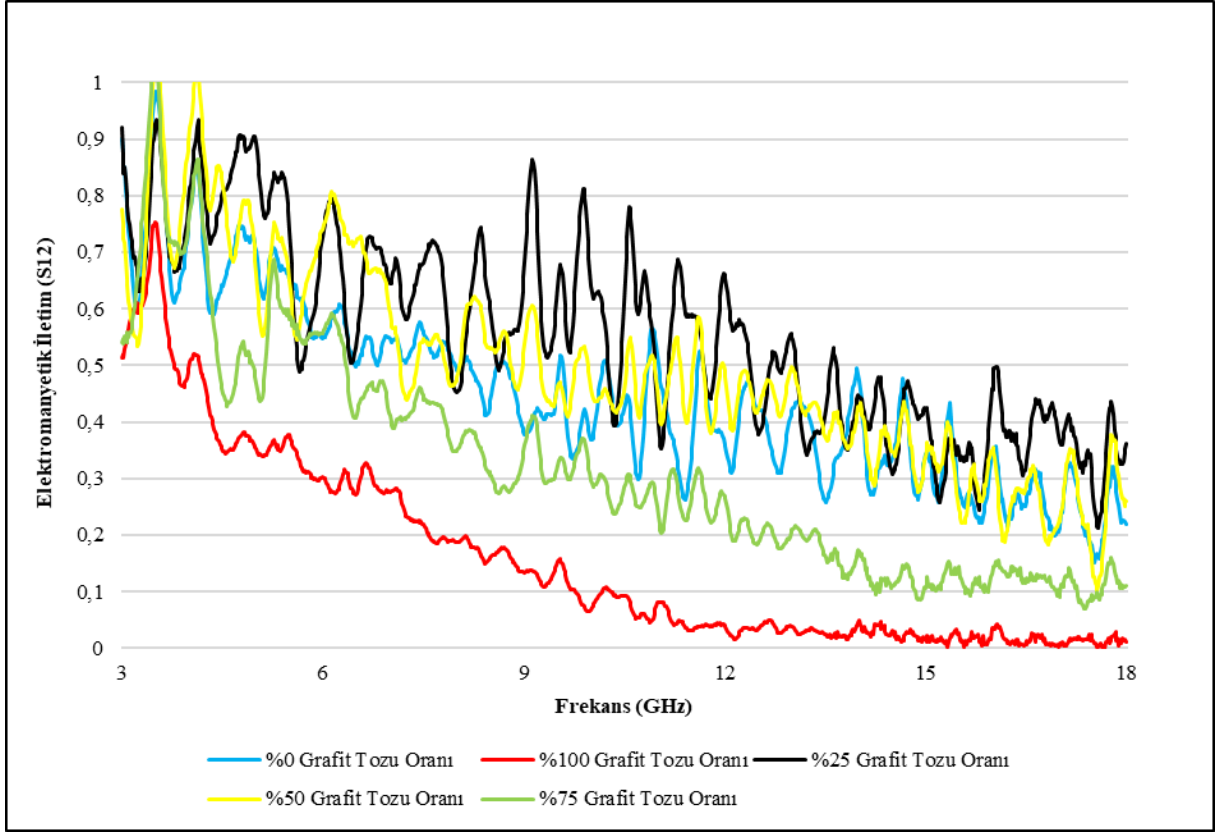
arttırılması, sanal kısımdan dolayı oluşacak kayıpların en aza indirilmesiyle sağlanmış olacaktır.

4.5.1. Grafit tozu içeren asfalt karışımların elektromanyetik iletim özellikleri

Grafit tozu, %5 olan toplam filler ağırlığının %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında kullanılarak Marshall numunesi ile aynı hacimde olacak şekilde özel boyutlarda (150 mm×150 mm×23,25 mm) asfalt betonu numuneleri üretilmiş ve Vektör Network Analizör ile elektromanyetik iletimleri ölçülmüştür (Tablo 4.6).

Tablo 4.6. Elektromanyetik iletimin ölçülmesi amacıyla grafit tozu içeren asfalt betonlarının deneysel test matrisi

Numune Özellikleri	Numune Sayısı	Agrega Karışımındaki Toplam Filler İçeriği (%)	Filler İçindeki Kireç Taşı Oranı (%)	Filler İçindeki Grafit Tozu Oranı (%)
Elektromanyetik Özellikler	3	5	5	0
	3	5	3,75	1,25
	3	5	2,5	2,5
	3	5	1,25	3,75
	3	5	0	5



Şekil 4.16. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin elektromanyetik iletim büyüklüğü (S12 veya S21) sonuçları

Farklı oranlar (%0, %25, %50, %75 ve %100) kullanılarak hazırlanan grafit numunelerinin elektromanyetik iletim büyüklükleri, %100 grafit tozu oranına sahip numune dışındaki diğer numuneler için 8 GHz'e kadar %50'nin üzerinde çıkmıştır (Şekil 4.16). 13 GHz'e kadar %25 ve %50 oranında grafit tozu içeren numuneler içermeyen numuneye göre sürekli artış göstermiştir. 3-6 GHz frekans aralığı dikkate alındığında, %25 grafit tozu oranına sahip numunelerin ortalama iletim büyüklüğü %80'den yüksek çıkmıştır. 9-12 GHz frekans aralığında ise %25 grafit tozu oranına sahip numunenin diğer oranlardaki numunelere göre en yüksek elektromanyetik iletim performansı gösterdiği aralık olmuştur. %75 ve %100 grafit tozu içeren numunelerin en düşük elektromanyetik iletim büyüklüğüne sahiptir. Grafit tozu zayıf Van der Waals bağlarının bir araya getirdiği ince levha katmanlardan oluşmaktadır. Bu sebepten dolayı grafitler diğer birçok minerale göre daha geniş özgül yüzey alanına sahiptir (20-35 m²/g) (Wu ve diğ., 2005; Liu ve diğ., 2008; Liu, 2011; Coşkun, 2023). Grafit tozu yoğunluğu arttıkça ince levha katmanları numune içerisinde kümelenmiş ve tek bir metal levha gibi davranarak elektromanyetik dalgaları yansıtıcı olarak görev yapmış olabileceği sonucuna

varılmıştır. Şekil 4'te görülebileceği gibi %25 oranında grafit tozu içeren asfalt betonu numunesi, %90 iletim oranıyla 5,4 GHz frekans değerinde en verimli iletim performansını göstermiştir.

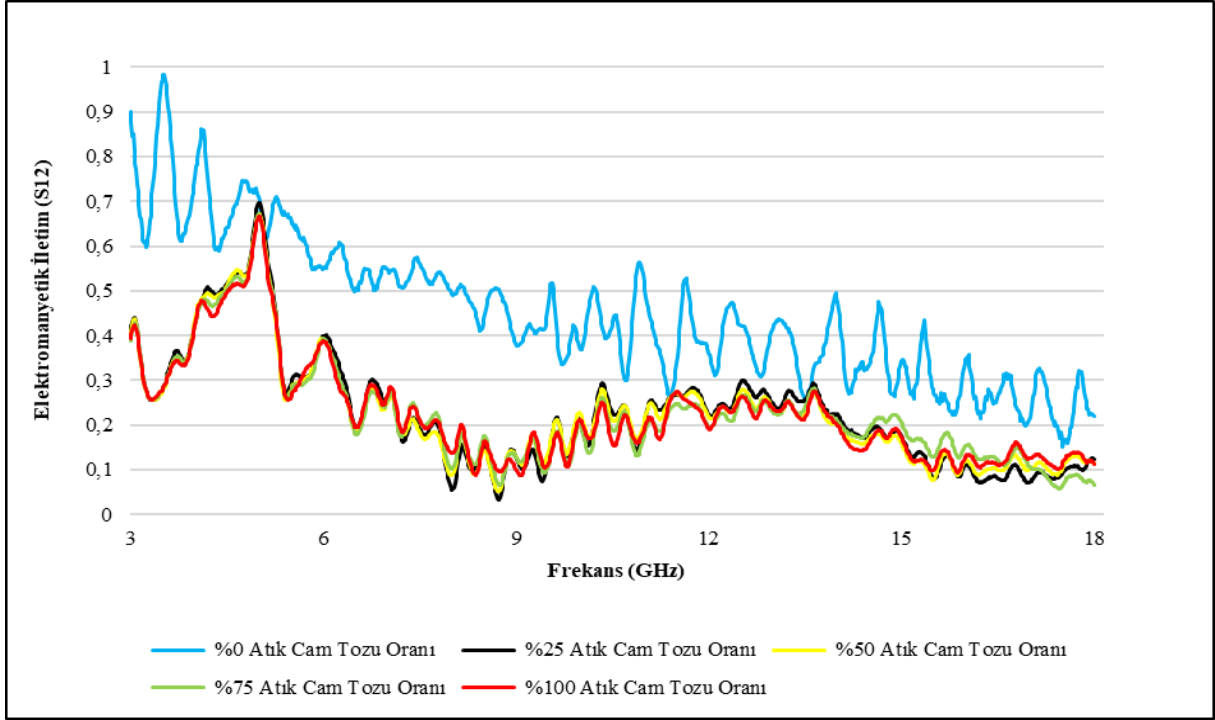
4.5.2. Atık cam tozu içeren asfalt karışımların elektromanyetik iletim özellikleri

Farklı oranlarda (toplam filler ağırlığının %0, %25, %50, %75 ve %100) atık cam tozu içeren asfalt karışımların elektromanyetik iletiminin belirlenmesi amacıyla 150 mm×150 mm×23,25 mm boyutlarda numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler, Marshall karışım tasarımı ile hazırlanan numuneler ile aynı hacme sahip olup elektromanyetik iletimin daha iyi ölçülmesi amacıyla daha geniş bir yüzey ve daha ince bir kalınlıkta özel olarak üretilmiştir. (Tablo 4.7).

Tablo 4.7. Elektromanyetik iletimin ölçülmesi amacıyla atık cam tozu içeren asfalt betonlarının deneysel test matrisi

Numune Özellikleri	Numune Sayısı	Agrega Karışımındaki Toplam Filler İçeriği (%)	Filler İçindeki Kireç Taşı Oranı (%)	Filler İçindeki Atık Cam Tozu Oranı (%)
	3	5	5	0
	3	5	3,75	1,25
Elektromanyetik Özellikler	3	5	2,5	2,5
	3	5	1,25	3,75
	3	5	0	5

Şekil 4.17'de, 3-18 GHz frekans aralığında çeşitli oranlarda atık cam tozu içeren asfalt karışımların Vektör Network Analizör ile ölçülen elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları gösterilmektedir. Analiz sonucunda atık cam tozu içermeyen karışımın elektromanyetik iletim performansı, atık cam tozu içeren diğer karışımlardan genel olarak daha yüksek çıkmıştır. Elektromanyetik iletimde daha önceden de belirtildiği üzere elektromanyetik dalgaların iletim performansı dalgaların yansıması ve soğurulmasından kaynaklı kayıpların en aza indirilmesi ile sağlanmaktadır.



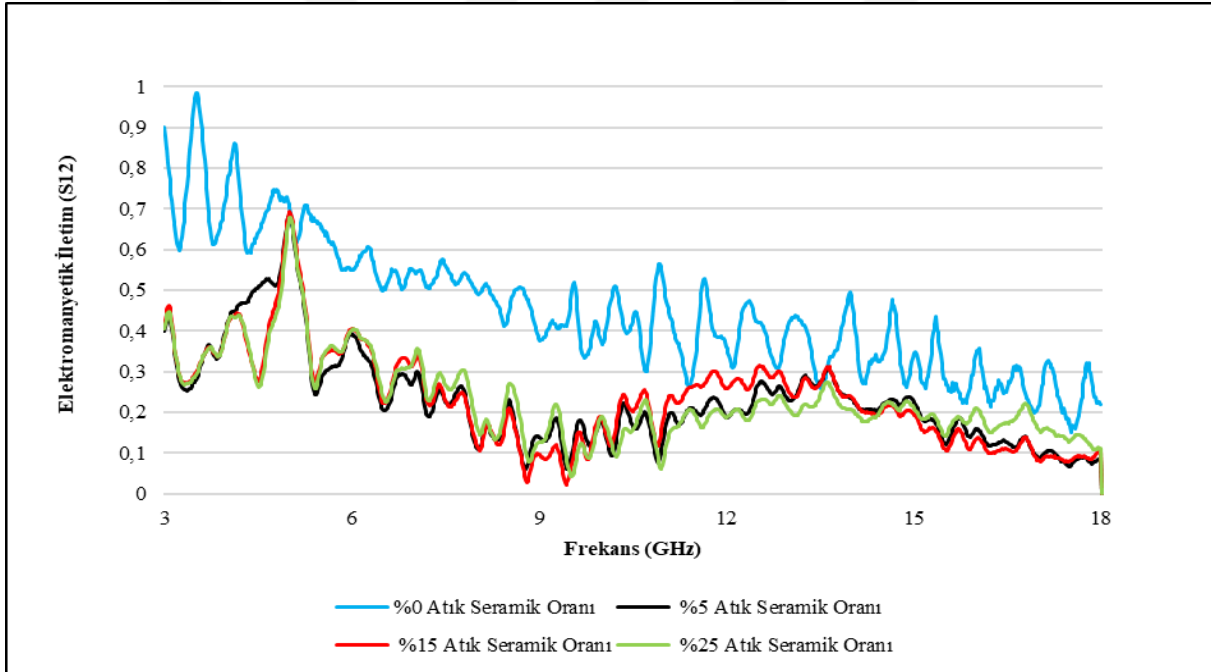
Şekil 4.17. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin elektromanyetik iletim büyüklüğü (S12 veya S21) sonuçları

Şekil 4.17’de görüldüğü üzere atık cam tozu içeren tüm numuneler elektromanyetik iletim katsayılarını azaltarak kayba neden olmuş karışım içerisinde daha çok elektromanyetik kalkanlama (ekranlama) etkisi göstermiştir. Elektromanyetik kalkanlama mekanizması, elektromanyetik dalgaların temas edilen malzemeden geri yansıtılması, yüzey tarafından soğurulması ve malzeme içinde çoklu yansıtılması aşamalarından oluşmaktadır. Kalkanlama etkisi, malzemenin elektriksel/manyetik özelliklerine, kalınlığına ve dalgaın frekansına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Akın ve diğ., 2012; Öksüz ve diğ., 2012; Yılmaz, 2014; Kaşgöz, 2017). Atık cam tozu da karışım içerisinde kalkanlama etkisi göstermiş ve elektromanyetik iletim katsayılarını düşürmüştür. Bu durum atık camın dielektrik katsayısının yüksek olması ve karışımın elektromanyetik iletim özelliğini değiştirmiş olabileceği şeklinde açıklanabilir. Yüksek dielektrik katsayısı değerlerine sahip malzemelerin enerji depolayabilme kapasiteleri yüksek dolayısıyla da elektromanyetik geçirgenlikleri daha düşük olmaktadır (Porubiaková ve Komačka, 2015). Bu nedenle, analiz sırasında asfalt beton numunesine gönderilen elektromanyetik dalgaların bir kısmı karşı tarafa iletilememiş (yansıyamamış) ve bir kısmı da soğurulmuştur. Ancak grafikten de görüldüğü üzere 5-5,5 GHz frekans aralığında farklı oranlardaki atık cam tozu oranı içeren numuneler için iletim katsayıları, %0 atık cam

tozuna sahip numune ile benzer performansı göstermiş ve tüm numunelerin iletim büyüklükleri yaklaşık %70 çıkmıştır. Bu değer atık cam malzemesinin elektromanyetik iletim performansının en verimli olduğu frekans aralığını göstermektedir.

4.5.3. Atık seramik içeren asfalt karışımların elektromanyetik iletim özellikleri

Farklı oranlarda (toplam agregata ağırlığının %0, %5, %15 ve %25) atık seramik agregası içeren asfalt karışımların elektromanyetik iletiminin belirlenmesi amacıyla 150 mm×150 mm×23,25 mm boyutlarda numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler, Marshall karışım tasarımı ile hazırlanan numuneler ile aynı hacme sahip olup elektromanyetik iletimin daha iyi ölçülmesi amacıyla daha geniş bir yüzey ve daha ince bir kalınlıkta özel olarak üretilmiştir.



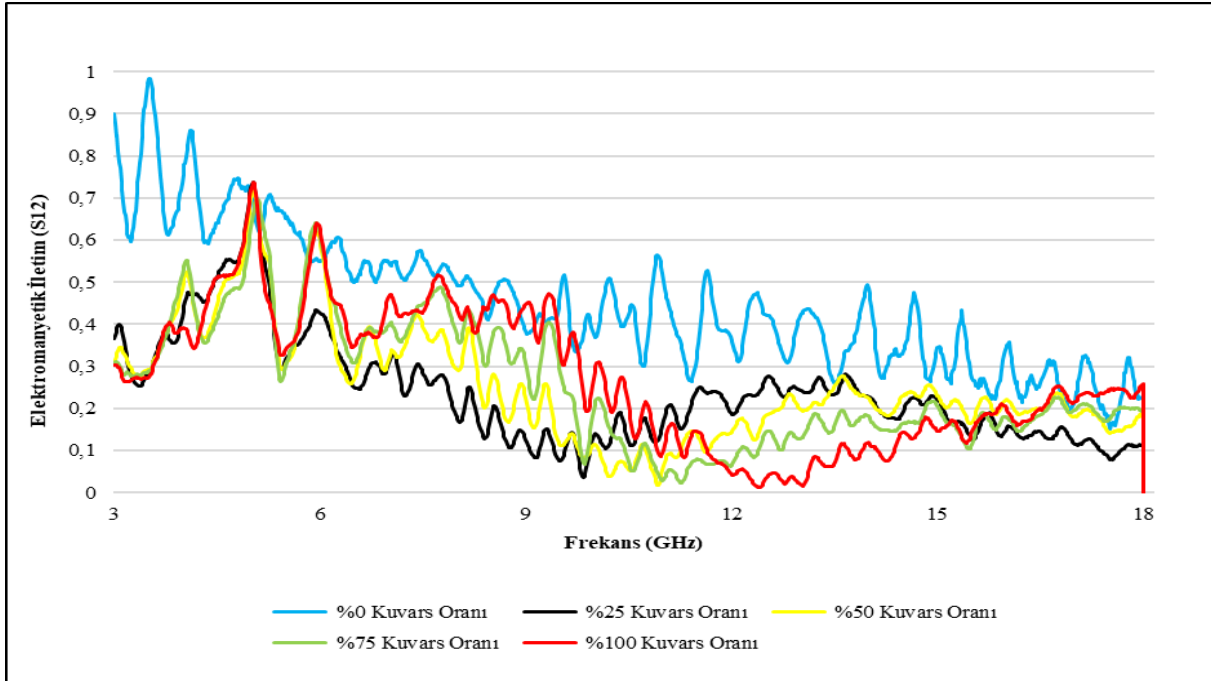
Şekil 4.18. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin elektromanyetik iletim büyüklüğü (S12 veya S21) sonuçları

En yüksek elektromanyetik iletim büyüklüğü atık seramik agregası içermeyen karışımda 3-6 GHz frekans aralığında çıkmıştır (Şekil 4.18). Ancak atık cam tozu içeren karışımlarda da olduğu gibi atık seramik agregası içeren karışımlar, 5-5,5 GHz frekans aralığı elektromanyetik iletimin en verimli olduğu aralık çıkmıştır. Ayrıca elektromanyetik iletimin en yüksek olduğu bu noktada atık seramik agregası içeren ve içermeyen karışımlarda tüm numuneler için yaklaşık

iletim büyüklüğü %70 çıkmıştır. Sonuç olarak atık seramik agregası içeren tüm numuneler karışımların elektromanyetik iletim katsayılarının azalmasına sebep olmuştur. İletim katsayısının azalması, elektromanyetik dalgaların temas edilen yüzey tarafından soğurulması ve iletilememesine neden olmaktadır. Atık seramik malzemesinin bu davranışı daha önce incelenmiş olan atık cam tozuna benzemekte ve yaklaşık aynı oranlarda kayba neden olarak karışım içerisinde daha çok elektromanyetik kalkanlama (ekranlama) etkisi göstermiştir. Bu benzer davranışın nedeni; atık seramik malzemesi ile atık cam tozunun kimyasal yapısının benzerliği ve dielektrik katsayılarının yaklaşık aynı değerler arasında olması şeklinde açıklanabilir (3-8 Farad/metre) (Kocabağ, 2002; Jawahar ve diğ., 2003; Priya Rani ve Sebastian, 2008; Singh ve diğ., 2014).

4.5.4. Kuvars içeren asfalt karışımların elektromanyetik iletim özellikleri

Farklı oranlarda (toplam agregası ağırlığının %0, %25, %50, %75 ve %100' ü) kuvars agregası içeren asfalt karışımların elektromanyetik iletiminin belirlenmesi amacıyla 150 mm×150 mm×23,25 mm boyutlarda numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler, Marshall karışım tasarımı ile hazırlanan numuneler ile aynı hacme sahip olup elektromanyetik iletimin daha iyi ölçülmesi amacıyla daha geniş bir yüzey ve daha ince bir kalınlıkta özel olarak üretilmiştir.



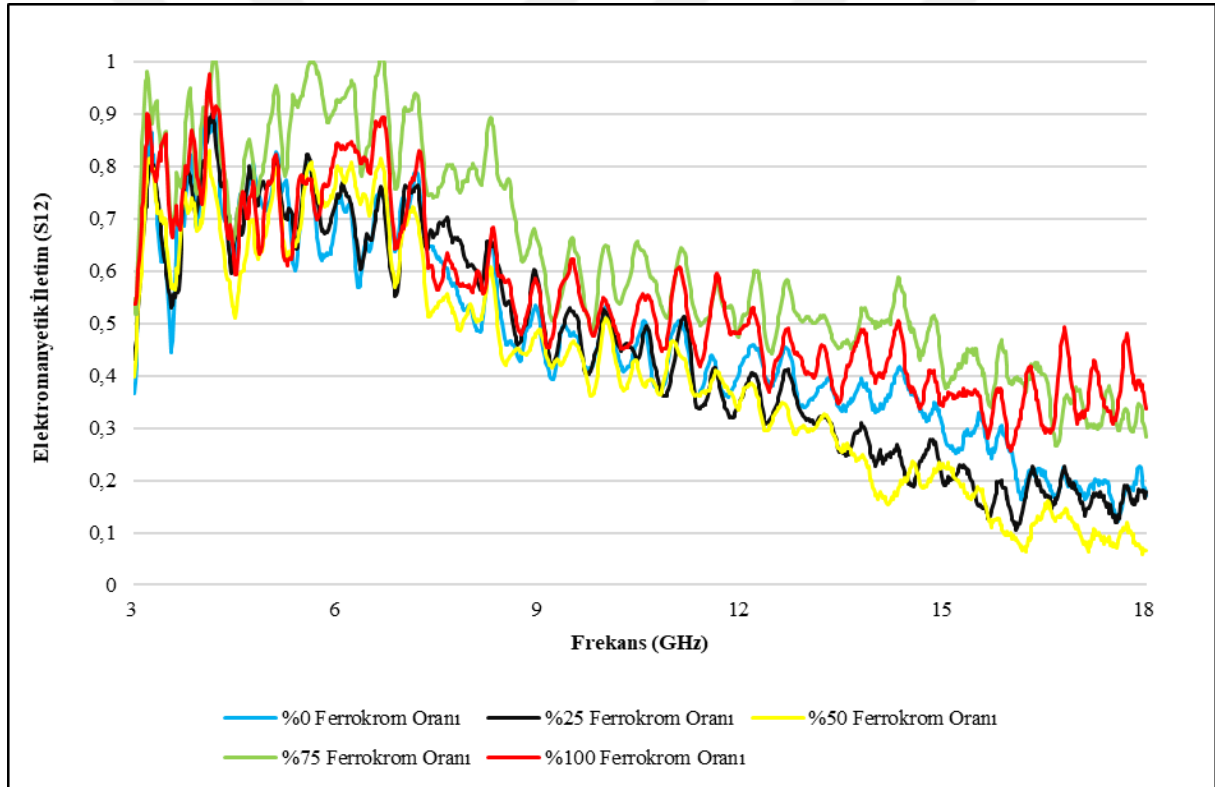
Şekil 4.19. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin elektromanyetik iletim büyüklüğü (S12 veya S21) sonuçları

3-18 GHz frekans aralığında çeşitli oranlarda kuvars agregası içeren asfalt karışımların Vektör Network Analizör ile ölçülen elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları gösterilmektedir (Şekil 4.19). Analiz sonuçlarına bakıldığında kuvars agregası içermeyen karışımın elektromanyetik iletim performansı, kuvars agregası içeren diğer karışımlara oranla genel olarak yüksek çıkmıştır. Ancak bazı frekans aralıklarında kuvars agregası içeren numunelerin performanslarında yükselmeler gözlemlenmiştir. 3-6 GHz frekans aralığında kuvars agregası içeren tüm numunelerin iletim performansları yaklaşık 5,5 GHz frekans değerinde en yüksek verimi göstermiştir (yaklaşık %70). Özellikle 6 GHz frekans değeri için %50, %75 ve %100 oranında kuvars içeren karışımlar (yaklaşık %65) hiç kuvars içermeyen karışımlardan (yaklaşık %55) çok daha iyi performans göstermişlerdir. Genel olarak frekans arttığında tüm karışımların iletim katsayıları düşmüştür ancak 8-10 GHz aralığında %100 kuvars içeren numune en iyi performansı sergilemiştir. Bu durumun kuvars mineralinin piezoelektrik malzeme olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Piezoelektrik malzemeler yüksek basınç ve sıcaklık altında elektrik enerjisi üretebilen malzemelerdir (Smith ve Rhodes, 1994). Asfalt karışımların elektromanyetik iletim ölçümü için kuvars agregası içeren numunelerin hazırlanması sırasında karışımlar (karıştırma ve sıkıştırma esnasında) yüksek sıcaklık ve basınca maruz kalmıştır. Bu mekanik

işlemlerin uygulanması kuvarsın elektromanyetik iletim performansını etkilediği sonucuna varılabilir.

4.5.5. Ferrokrom içeren asfalt karışımların elektromanyetik iletim özellikleri

Toplam agregat ağırlığının %0, %25, %50, %75 ve %100' ü oranlarda ferrokrom agregası ile hazırlanan asfalt karışımların elektromanyetik iletiminin belirlenmesi amacıyla 150 mm×150 mm×23,25 mm boyutlarda numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler, Marshall karışım tasarımı ile hazırlanan numuneler ile aynı hacme sahip olup elektromanyetik iletimin daha iyi ölçülmesi amacıyla daha geniş bir yüzey ve daha ince bir kalınlıkta özel olarak üretilmiştir.



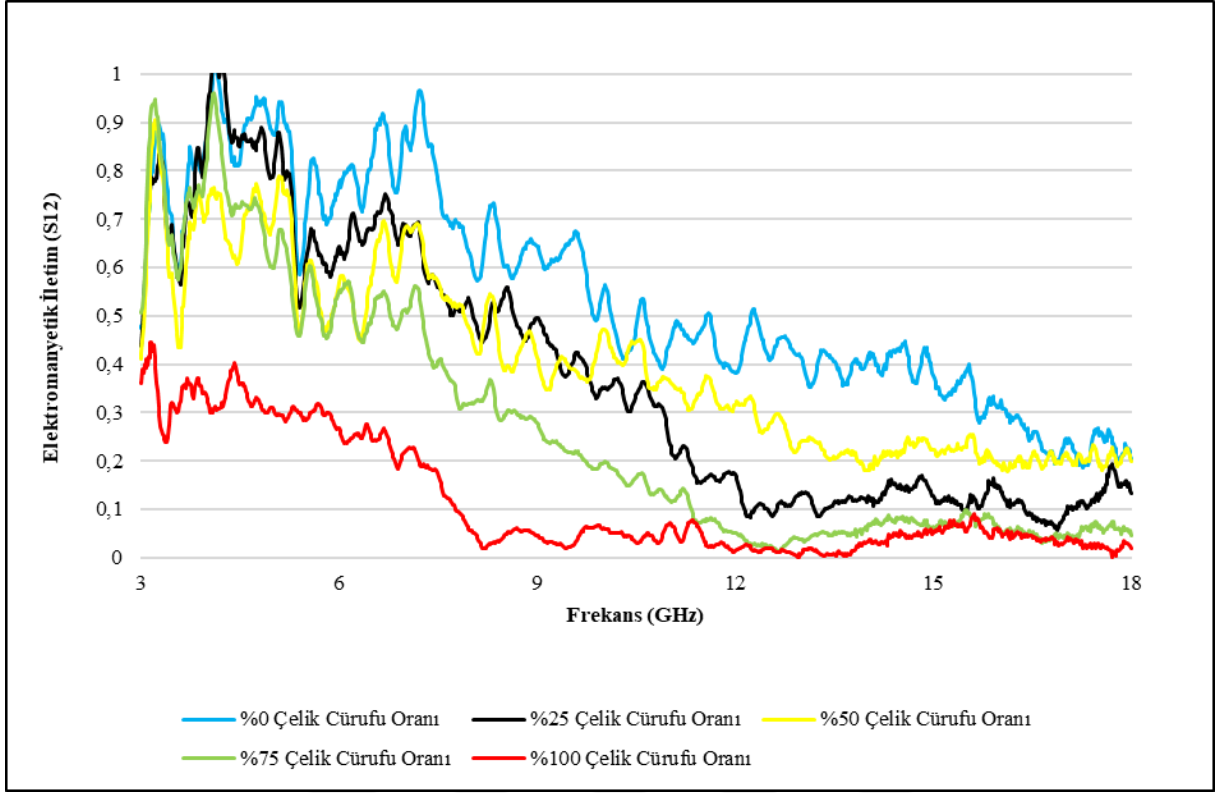
Şekil 4.20. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin elektromanyetik iletim büyüklüğü (S12 veya S21) sonuçları

Ferrokrom içeren numunelerin Vektör Network Analizör ile ölçülen elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları Şekil 4.20’de gösterilmiştir. Genel olarak frekans şiddeti arttıkça elektromanyetik iletim, tüm numuneler için düşme eğilimi göstermiştir. Ancak analiz edilen karışımların iletim büyüklükleri incelendiğinde %75 oranında ferrokrom içeren numune

yaklaşık 3-16 GHz frekans aralığı boyunca diğer karışımlara göre en yüksek performansı göstermiş ve yaklaşık 4-6,5 GHz frekans aralığında elektromanyetik iletimin %100 olduğu maksimum değerini vermiştir. %100 oranında ferrokrom içeren karışım ise en iyi iletim performansı gösteren ikinci numune olmuştur ve yaklaşık 16-18 GHz frekans aralığında iletim büyüklüğü artarak en yüksek değerine ulaşmıştır (%50). Elektromanyetik iletim ile ilgili yapılan bazı çalışmalarda elektromanyetik dalgaların geçirgenliği; malzemelerin içerikleri, yoğunluğu, gözenekliliği, sıcaklık ve fiziksel oluşumlarına bağlı olduğu ifade edilmektedir (Olhoeft, 1981; Yalın, 2018). Araştırmalarda; malzemenin yoğunluğunun yüksek olması elektromanyetik iletiminin artmasını sağladığı ortaya çıkmıştır (Jaselskis ve diğ., 2003). Ayrıca ferrokromun demir gibi elektriği ileten elementlerden oluşmasıyla elektromanyetik bir alan içerisinde etkileşime neden olması elektromanyetik iletiminin artmasını sağladığı söylenebilir.

4.5.6. Çelik cürufu içeren asfalt karışımların elektromanyetik iletim özellikleri

Toplam agrega ağırlığının %0, %25, %50, %75 ve %100' ü oranlarda çelik cürufu agregası ile hazırlanan asfalt karışımların elektromanyetik iletiminin belirlenmesi amacıyla 150 mm×150 mm×23,25 mm boyutlarda numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler, Marshall karışım tasarımı ile hazırlanan numuneler ile aynı hacme sahip olup elektromanyetik iletimin daha iyi ölçülmesi amacıyla daha geniş bir yüzey ve daha ince bir kalınlıkta özel olarak üretilmiştir.



Şekil 4.21. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin elektromanyetik iletim büyüklüğü (S12 veya S21) sonuçları

Çelik cürufu içeren numunelerin Vektör Network Analizör ile ölçülen elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları Şekil 4.21’de gösterilmiştir. Genel olarak frekans şiddeti arttıkça elektromanyetik iletim, tüm numuneler için düşme eğilimi göstermiştir. Ancak %25 çelik cürufu içeren karışım yaklaşık 4 GHz frekans noktasında en yüksek iletim değerini göstermiştir (%100). Ayrıca %75 oranında cüruf içeren karışım da aynı frekans noktasında iletim değeri yaklaşık %95 çıkmıştır. Çelik cürufunun serbest MgO, CaO ve yüksek miktarda demir oksit gibi aktif minerallerden oluşması (Jiao ve diğ., 1988; Wang ve diğ., 2017; Barala ve diğ., 2022), özgül yüzey alanının (1,96 m²/g) kireç taşına (1,43 m²/g) (Li ve diğ., 2018; Wang ve diğ., 2023) göre yüksek olması sebebiyle karışımdaki çelik cürufu oranı arttıkça cürufun karışım içerisindeki dağılımı artmış ve asfalt betonunun elektromanyetik dalgaların karşı tarafa iletiminin azalmasına neden olabileceği sonucuna varılmıştır. Daha önceki yapılan çalışmalarda da çelik cürufunun elektromanyetik iletim ile ilgili benzer sonuçlar vermesi, elde edilen verileri destekler nitelikte olmuştur (Sun ve diğ., 2011; Hong ve diğ., 2020; Santillan ve diğ., 2022; Huang ve diğ., 2023).

4.6. Katkı Malzemeleriyle Üretilen Asfalt Beton Numunelerinin Marshall Sonuçları ve Elektromanyetik İletim Değerlerinin Yorumlanması

Deneysel çalışmada kullanılan grafit tozu, atık cam tozu, atık seramik agregası, kuvars, ferrokrom ve çelik cürufu kullanılarak hazırlanan asfalt betonlarının; elektromanyetik iletim büyüklükleri ile Marshall analizinden elde edilen verilerden grafikler oluşturulmuş ve aralarındaki ilişkiler yorumlanmıştır.

4.6.1. Grafit tozu içeren asfalt betonlarının Marshall ile elektromanyetik iletim verilerinin değerlendirilmesi

Grafit tozu içeren numuneler için yapılan Marshall deneyinden ve Elektromanyetik iletim ölçümünden elde edilen sonuçlar hatırlatılacak olursa;

Grafit tozu içeren numunelerin Marshall Stabilité analizi sonuçlarından elde edilen; özgül ağırlık, MS, akma, hava içeriği, VMA ve VFA değerleri incelendiğinde; MS, akma, VFA ve özgül ağırlık değerlerinde azalma, hava içeriği ve VMA değerlerinde ise artma meydana gelmiştir. Asfalt karışım içerisindeki grafit tozu miktarı arttıkça numunelerde efektif bağlayıcı miktarının azaldığı gözlemlenmiştir. Grafit tozunun özgül yüzeyinin ($20-35 \text{ m}^2/\text{g}$) geniş olması ve su emme kapasitesinin yüksek olması karışım içerisindeki efektif bağlayıcı miktarının azalmasına neden olduğu söylenebilir (Wu ve diğ., 2005; Liu ve diğ., 2008; Liu, 2011; Coşkun, 2023). Yapılan analizler sonucunda binder tabakası tasarımı için asfalt karışımlarda kullanılması gereken optimum grafit tozu oranı %25 (toplam karışımın %5 filler oranı içerisinde) olarak belirlenmiştir.

Farklı oranlarda grafit tozu (%0, %25, %50, %75 ve %100) kullanılarak hazırlanan numunelerin elektromanyetik iletim büyüklükleri, %100 grafit tozu oranına sahip numune dışındaki diğer numuneler için 8 GHz'e kadar %50'nin üzerinde çıkmıştır. 13 GHz'e kadar %25 ve %50 oranında grafit tozu içeren numuneler içermeyen numuneye göre sürekli artış göstermiştir. 3-6 GHz frekans aralığı dikkate alındığında, %25 grafit tozu oranına sahip numunelerin ortalama iletim büyüklüğü %80'den yüksek çıkmıştır. 9-12 GHz frekans aralığında ise %25 grafit tozu oranına sahip numunenin diğer oranlardaki numunelere göre en yüksek elektromanyetik iletim performansı gösterdiği aralık olmuştur. %75 ve %100 grafit tozu

içeren numunelerin en düşük elektromanyetik iletim büyüklüğüne sahiptir. Grafit tozu zayıf Van der Waals bağlarının bir araya getirdiği ince levha katmanlardan oluşmakta ve dış etkilerden (basınç veya sıcaklık) etkilenecek levhaları bir araya getiren bağlar kolayca kopmaktadır. Bu sebepten dolayı grafitlerin diğer birçok minerale göre daha geniş özgül yüzey alanına sahiptir. Grafit tozu yoğunluğu arttıkça ince levha katmanları numune içerisinde kümelenmiş ve tek bir metal levha gibi davranarak elektromanyetik dalgaları yansıtıcı olarak görev yapmış olabileceği sonucuna varılmıştır. %25 oranında grafit tozu içeren asfalt betonu numunesi, %90 iletim oranıyla 5,4 GHz frekans değerinde en verimli iletim performansını göstermiştir.

Çalışmanın bu kısmında ise grafit tozu kullanılarak üretilen asfalt betonlarının Marshall deneyinden elde edilen verilerin elektromanyetik iletim miktarı ile ilişkileri açıklanarak yorumlanmıştır (Tablo 4.8).

Tablo 4.8. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin Marshall deney sonuçları ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

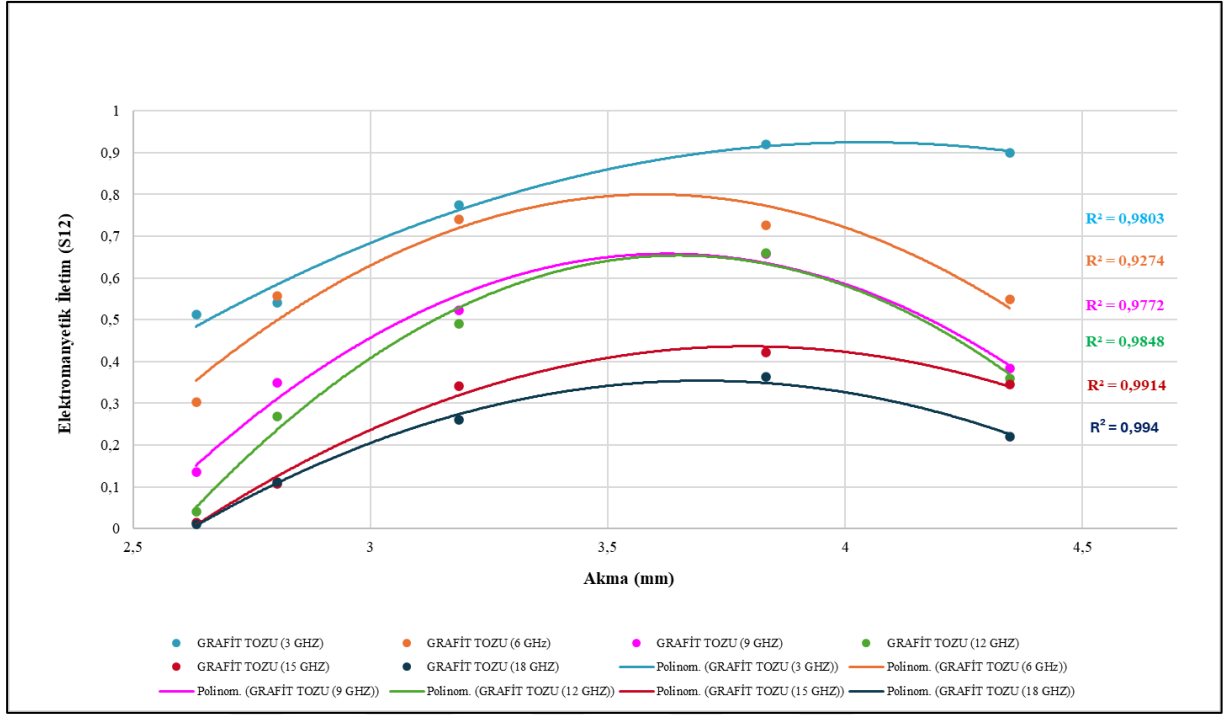
Grafit Tozu Oranı	Özgül Ağırlık (g/cm³)	Hava İçeriği (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kg)
%0	2,368	5,504	15,776	65,116	4,347	929,409
%25	2,350	6,224	16,418	62,092	3,832	754,424
%50	2,346	6,372	16,550	61,554	3,186	692,612
%75	2,318	7,470	17,529	57,430	2,803	719,847
%100	2,311	7,755	17,783	56,413	2,632	630,186
Grafit Tozu Oranı	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	0,9207	0,7264	0,6568	0,6598	0,4214	0,3625
%50	0,7751	0,7405	0,5228	0,4909	0,3402	0,2596
%75	0,5407	0,5571	0,3488	0,2684	0,1068	0,1103
%100	0,5130	0,3022	0,1348	0,0400	0,0149	0,0111

Akma ile elektromanyetik iletim

Genel olarak akma arttıkça elektromanyetik iletim 3,8-3,85 mm akma değerlerine kadar artmakta, daha sonra 4,35 mm akma değerine gelindiğinde iletimde azalma meydana gelmektedir. Ayrıca düşük frekanslarda (örneğin 3 ve 6 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Akma ile elektromanyetik iletim arasındaki ilişki seviyesi, “Çok Yüksek” ($R^2=0,92-0,99$) düzeydedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile hem düşük hem de yüksek akma değerlerinde belirgin olarak görülebilmektedir. Elektromanyetik iletimin 3,80-3,85 mm akma değerlerine kadar bir miktar artması, düşük frekanslarda akımın daha laminer (düzenli) olması ve kısmen artmış olan akma ile dokunun iletimi olumsuz etkileyecek kadar bozulmamış olması, ek olarak Mikromorfolojik analiz bölümünde de görüldüğü üzere, grafitin taneler arasındaki bazı kısmi bağlantılı hava boşluklarının doldurulması sonucu iletimin olumlu etkilemesi şeklinde açıklanabilir (Tablo 4.9) (Şekil 4.22).

Tablo 4.9. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin akma ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Grafitt Tozu Oranı	Akma (mm)	3 GHz	6 GHz	9 GHz	12 GHz	15 GHz	18 GHz
		Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)
%0	4,347	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	3,832	0,9207	0,7264	0,6568	0,6598	0,4214	0,3625
%50	3,186	0,7751	0,7405	0,5228	0,4909	0,3402	0,2596
%75	2,803	0,5407	0,5571	0,3488	0,2684	0,1068	0,1103
%100	2,632	0,5130	0,3022	0,1348	0,0400	0,0149	0,0111



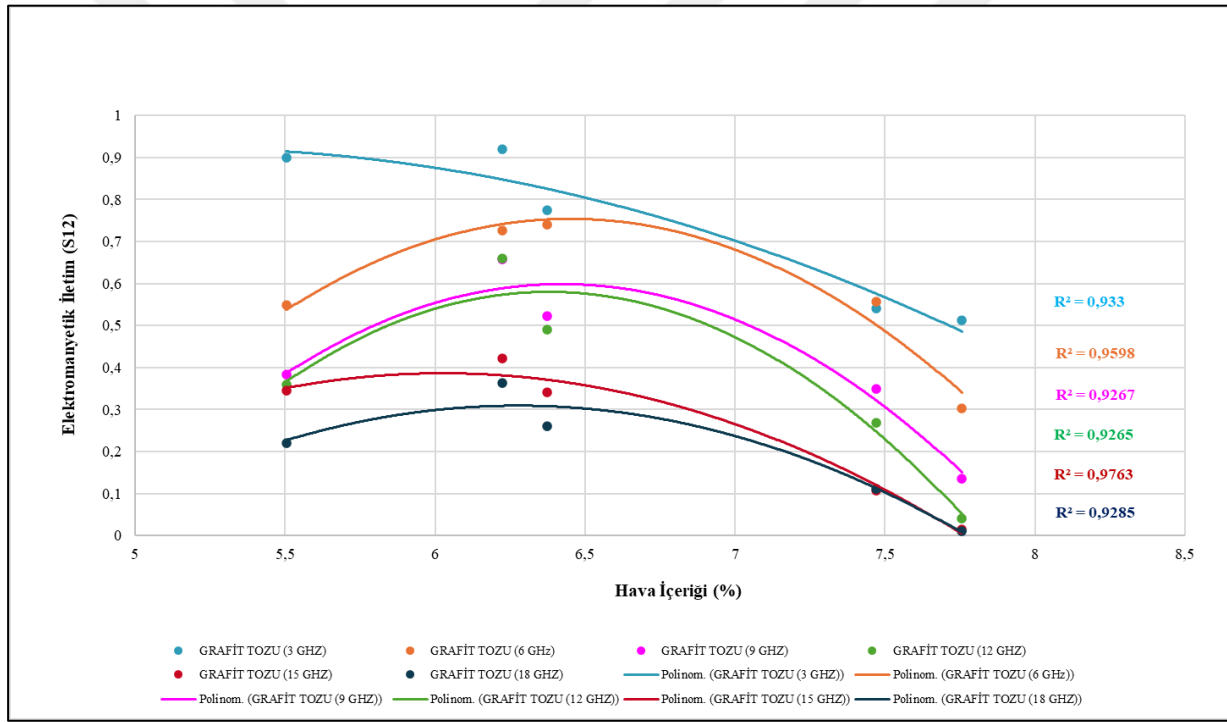
Şekil 4.22. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin akma ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Hava içeriği ile elektromanyetik iletim

Genel olarak hava içeriği arttıkça elektromanyetik iletimin azaldığı gözlemlenmiştir. İlişki seviyesi “Çok Yüksek” ($R^2=0,93-0,98$) düzeydedir. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3-9 GHz arası) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu durum, yüksek düşme oranları ile hem düşük hem de yüksek hava içeriği değerlerinde belirgin olarak görülebilmektedir. Elektromanyetik iletimin azalması, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan hava içeriği ile azalan tane temas oranının iletimi olumsuz etkilemesi ile açıklanabilir (Tablo 4.10) (Şekil 4.23).

Tablo 4.10. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Grafit Tozu Oranı	Hava İçeriği (%)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	5,504	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	6,224	0,9207	0,7264	0,6568	0,6598	0,4214	0,3625
%50	6,372	0,7751	0,7405	0,5228	0,4909	0,3402	0,2596
%75	7,470	0,5407	0,5571	0,3488	0,2684	0,1068	0,1103
%100	7,755	0,5130	0,3022	0,1348	0,0400	0,0149	0,0111



Şekil 4.23. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

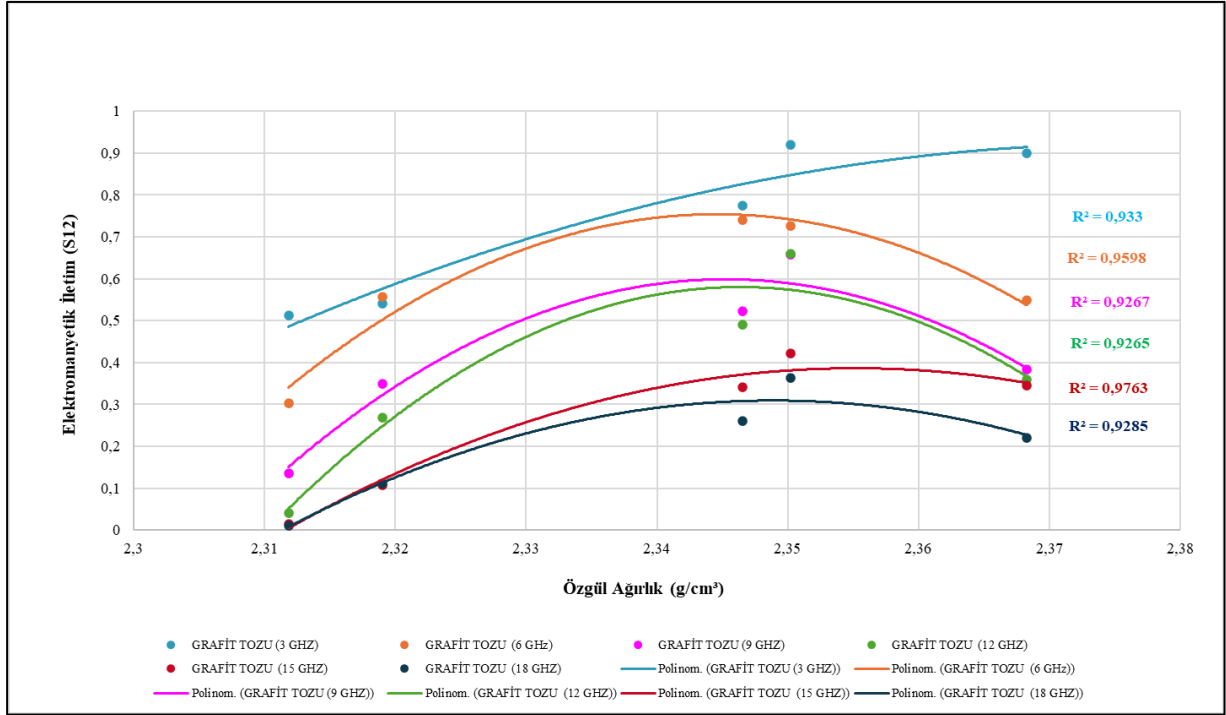
Özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim

Özgül ağırlık arttıkça cismin yoğunluğu artmakta dolayısıyla içerisindeki katı tane bileşenlerin oranı artarken hava oranı azalmaktadır. Bu sebepten ötürü, yukarıda hava içeriği için yapılan yorum özgül ağırlık içinde geçerlidir, ancak ters ilişki vardır. Genel olarak, grafit tozu için, özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim arasında “Çok Yüksek” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,93-0,98$). Yani, özgül ağırlık arttıkça elektromanyetik iletim artmaktadır. Ayrıca, düşük

frekanslarda (örneğin 3 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile hem yüksek hem de düşük özgül ağırlık değerlerinde belirgin olarak görülebilmektedir. Özgül ağırlık arttıkça elektromanyetik iletim değerlerinin artması ve düşük frekanslarda elektromanyetik iletimin daha yüksek olması, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan özgül ağırlık (yani düşük hava içeriği) ile artan tane temas oranının iletimi olumlu etkilemesi (kolaylaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.11) (Şekil 4.24).

Tablo 4.11. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Grafit Tozu Oranı	Özgül Ağırlık (g/cm³)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	2,368	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	2,350	0,9207	0,7264	0,6568	0,6598	0,4214	0,3625
%50	2,346	0,7751	0,7405	0,5228	0,4909	0,3402	0,2596
%75	2,318	0,5407	0,5571	0,3488	0,2684	0,1068	0,1103
%100	2,311	0,5130	0,3022	0,1348	0,0400	0,0149	0,0111



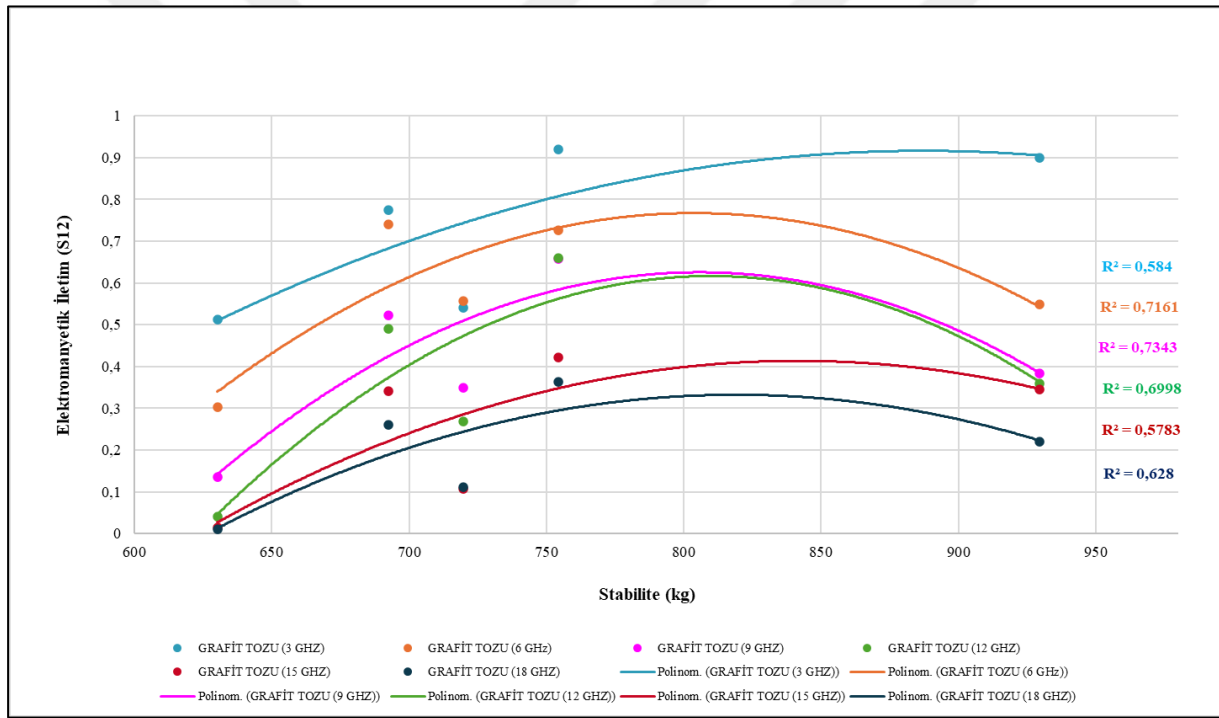
Şekil 4.24. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Stabilite ile elektromanyetik iletim

Genel olarak, grafit tozu için, stabilite ile elektromanyetik iletim arasında “Orta-Yüksek” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,58-0,73$). Kısmen özgül ağırlık ilişkisine benzer şekilde, genel olarak stabilite arttıkça elektromanyetik iletim artmaktadır. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile hem yüksek hem de düşük stabilite değerlerinde belirgin olarak görülebilmektedir. Stabilite arttıkça elektromanyetik iletim değerlerinin artması ve düşük frekanslarda elektromanyetik iletimin daha yüksek olması, düşük frekanslarda akımın daha laminer (düzenli) olması ve artan stabilite (yani yüksek özgül ağırlık, düşük hava içeriği) ile artan tane temas oranı, dolayısıyla artan tane kenetlenmesinin iletimi olumlu etkilemesi (kolaylaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.12) (Şekil 4.25).

Tablo 4.12. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Grafit Tozu Oranı	Stabilite (kg)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	929,409	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	754,424	0,9207	0,7264	0,6568	0,6598	0,4214	0,3625
%50	692,612	0,7751	0,7405	0,5228	0,4909	0,3402	0,2596
%75	719,847	0,5407	0,5571	0,3488	0,2684	0,1068	0,1103
%100	630,186	0,5130	0,3022	0,1348	0,0400	0,0149	0,0111



Şekil 4.25. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

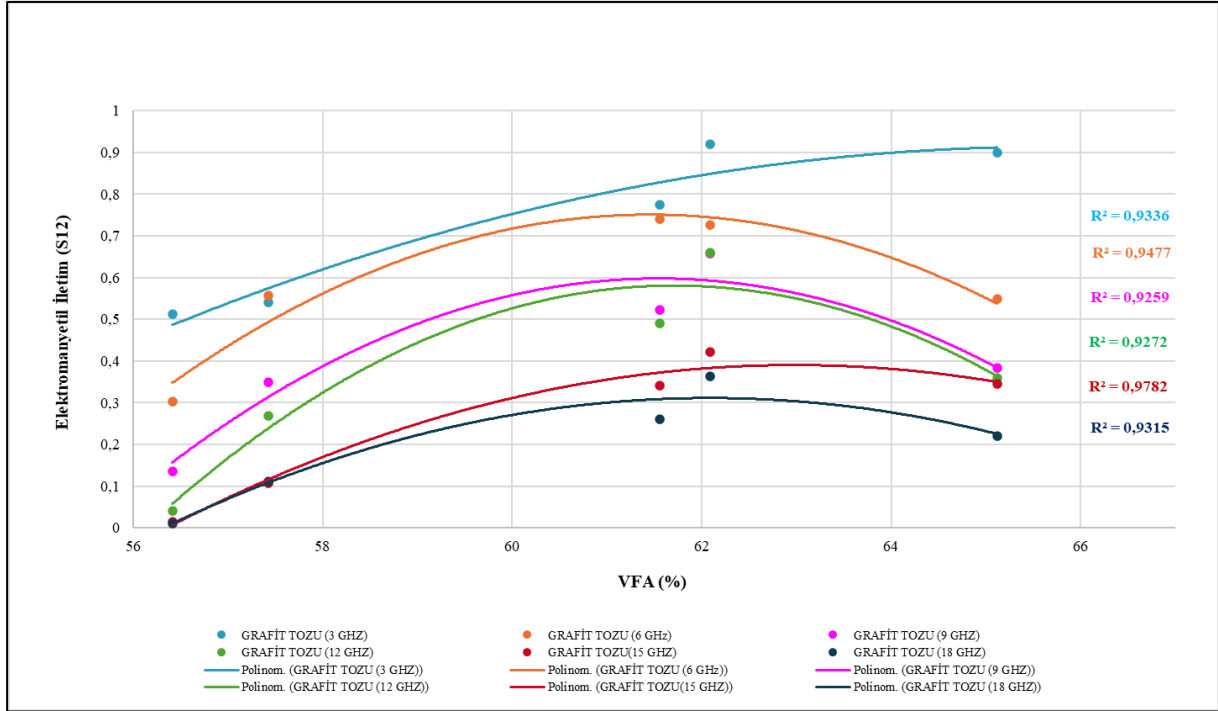
VFA ile elektromanyetik iletim

VFA (Voids Filled with Asphalt) asfaltla dolu boşluk oranı olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak, grafit tozu için, VFA ile elektromanyetik iletim arasında “Çok Yüksek” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,93-0,98$). Boşlukların dolması özgül ağırlığın artması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, burada da özgül ağırlık ilişkisine benzer şekilde, genel olarak VFA

arttıkça elektromanyetik iletim artmaktadır. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3-9 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda (örneğin 12-18 GHz) iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile hem yüksek hem de düşük VFA değerlerinde net olarak görülebilmektedir. Bu durum, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan VFA yani boşlukların asfalt ile dolması (dolayısıyla özgül ağırlığın artarak, hava içeriğinin düşmesi) sonucu artan binder film kalınlığı ve bunun sonucunda da artan tane tutunmasının (yapışma) iletimi olumlu etkilemesi (kolaylaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.13) (Şekil 4.26).

Tablo 4.13. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin VFA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Grafit Tozu Oranı	VFA (%)	3 GHz	6 GHz	9 GHz	12 GHz	15 GHz	18 GHz
		Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)
%0	65,116	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	62,092	0,9207	0,7264	0,6568	0,6598	0,4214	0,3625
%50	61,554	0,7751	0,7405	0,5228	0,4909	0,3402	0,2596
%75	57,430	0,5407	0,5571	0,3488	0,2684	0,1068	0,1103
%100	56,413	0,5130	0,3022	0,1348	0,0400	0,0149	0,0111



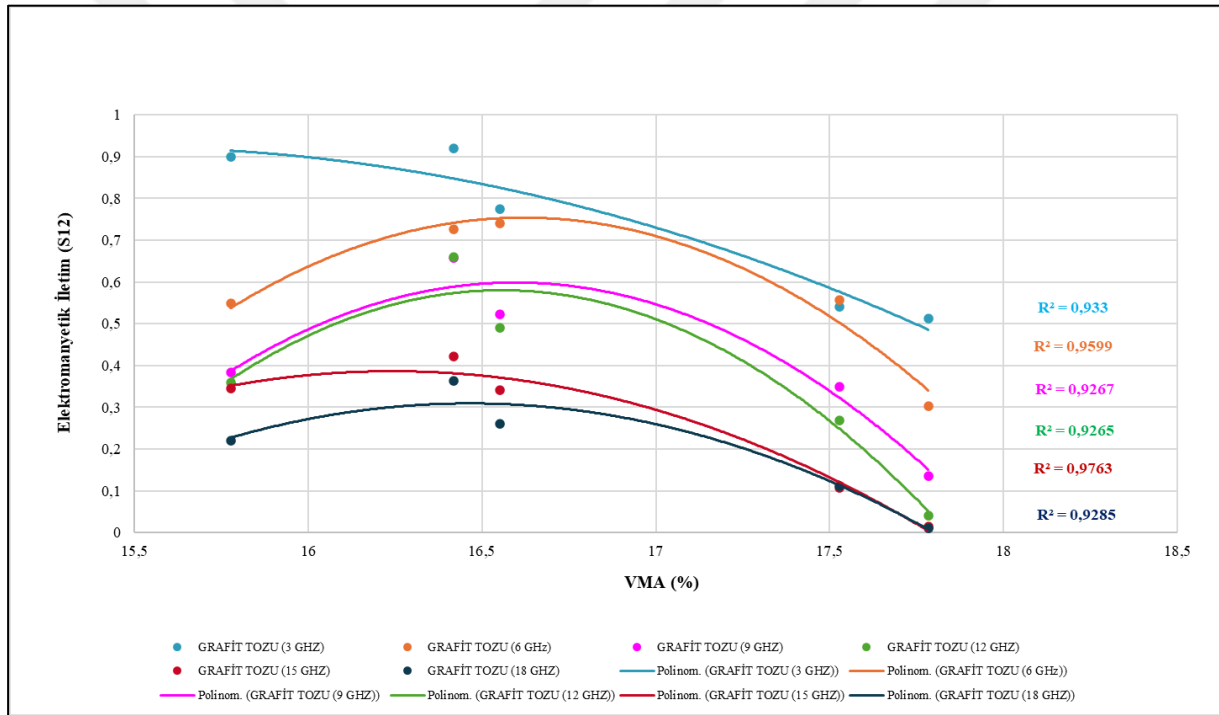
Şekil 4.26. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin VFA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

VMA ile elektromanyetik iletim

VMA (Voids in Mineral Aggregate) mineral agregalar arası boşluk oranı olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak, grafit tozu için, VMA ile elektromanyetik iletim arasında, VFA’da olduğu gibi “Çok Yüksek” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,93-0,98$). Hava içeriği ilişkisine benzer şekilde, genel olarak VMA arttıkça (yani VFA azaldıkça) elektromanyetik iletim azalmaktadır. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3-9 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda (örneğin 12-18 GHz) iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile hem düşük hem de yüksek VMA değerlerinde daha belirgindir. Bu durum, düşük frekanslarda akımın daha laminer (düzenli) olması ve artan VMA (düşen VFA, artan hava içeriği) ile boşlukların daha az asfalt ile dolması sonucu azalan binder film kalınlığı ve bunun sonucunda da olumsuz etkilenen yani azalan tane tutunmasının (yapışma) iletimi olumsuz etkilemesi (zorlaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.14) (Şekil 4.27).

Tablo 4.14. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin VMA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Grafit Tozu Oranı	VMA (%)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	15,776	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	16,418	0,9207	0,7264	0,6568	0,6598	0,4214	0,3625
%50	16,550	0,7751	0,7405	0,5228	0,4909	0,3402	0,2596
%75	17,529	0,5407	0,5571	0,3488	0,2684	0,1068	0,1103
%100	17,783	0,5130	0,3022	0,1348	0,0400	0,0149	0,0111



Şekil 4.27. Grafit tozu içeren asfalt beton numunelerinin VMA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

4.6.2. Atık cam tozu içeren asfalt betonlarının Marshall ile elektromanyetik iletim verilerinin değerlendirilmesi

Atık cam tozu içeren numuneler için yapılan Marshall deneyinden ve elektromanyetik iletim ölçümünden elde edilen sonuçlar hatırlatılacak olursa;

Atık cam tozu içeren numunelerin özgül ağırlık, MS, akma, hava içeriği, VMA ve VFA değerleri incelendiğinde atık cam tozu oranı arttıkça, MS, VFA ve özgül ağırlık değerleri azalırken; hava içeriği, VMA ve akma değerlerinde artma meydana gelmiştir. Tüm değerler için bakıldığında ise %25 atık cam tozu içeren numune şartname limitleri içerisinde kalarak en yüksek performansı göstermiştir. Literatüre bakıldığında cam malzemesinin asfalt karışımlarda belirli bir oranda (toplam agrega ağırlığının en fazla %40 oranında) ve ince taneli olarak kullanılması önerilmektedir. Yapılan tez çalışmasında ise atık cam, toz formunda ve toplam karışımın %5 filler oranı içerisinde kullanılması karışımın mekanik ve hacimsel özelliklerini negatif yönde çok fazla etkilemediği söylenebilir. Elde edilen veriler sonucunda asfalt karışımlarda kullanılması gereken optimum atık cam tozu oranı %25 (toplam karışımın %5 filler oranı içerisinde) olarak belirlenmiştir.

Atık cam tozu içeren tüm numuneler elektromanyetik iletim karışımların katsayılarını azaltarak kayba neden olmuş karışım içerisinde daha çok elektromanyetik kalkanlama (ekranlama) etkisi göstermiştir. Elektromanyetik kalkanlama mekanizması, elektromanyetik dalgaların temas edilen malzemeden geri yansıtılması, yüzey tarafından soğurulması ve malzeme içinde çoklu yansıtılması aşamalarından oluşmaktadır. Kalkanlama etkisi, malzemenin elektriksel/manyetik özelliklerine, kalınlığına ve dalga frekansına bağlı olarak değişiklik göstermektedir (Akın ve diğ., 2012; Öksüz ve diğ., 2012; Yılmaz, 2014; Kaşgöz, 2017). Atık cam tozu da karışım içerisinde kalkanlama etkisi göstermiş ve elektromanyetik iletim değerlerini düşürmüştür. Bu durum atık camın dielektrik katsayısının yüksek olması ve karışımın elektromanyetik iletim özelliğini değiştirmiş olabileceği şeklinde açıklanabilir. Yüksek dielektrik katsayısı değerlerine sahip malzemelerin enerji depolayabilme kapasiteleri yüksek dolayısıyla da elektromanyetik geçirgenlikleri daha düşük olmaktadır (Porubiaková ve Komačka, 2015). Bu nedenle, analiz sırasında asfalt beton numunesine gönderilen elektromanyetik dalgaların bir kısmı karşı tarafa iletilmemiş ve bir kısmı da soğurulmuştur. Ancak 5-5,5 GHz frekans aralığında farklı oranlardaki atık cam tozu oranı içeren numuneler için iletim katsayıları, %0 atık cam tozuna sahip numune ile benzer performansı göstermiş ve tüm numunelerin iletim büyüklükleri yaklaşık %70 çıkmıştır. Bu değer atık cam malzemesinin elektromanyetik iletim performansının en verimli olduğu frekans aralığını göstermektedir.

Çalışmanın bu kısmında ise Atık cam tozu kullanılarak üretilen asfalt betonlarının Marshall deneyinden elde edilen verilerin elektromanyetik iletim miktarı ile ilişkileri açıklanarak yorumlanmıştır (Tablo 4.15).

Tablo 4.15. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin Marshall deney sonuçları ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

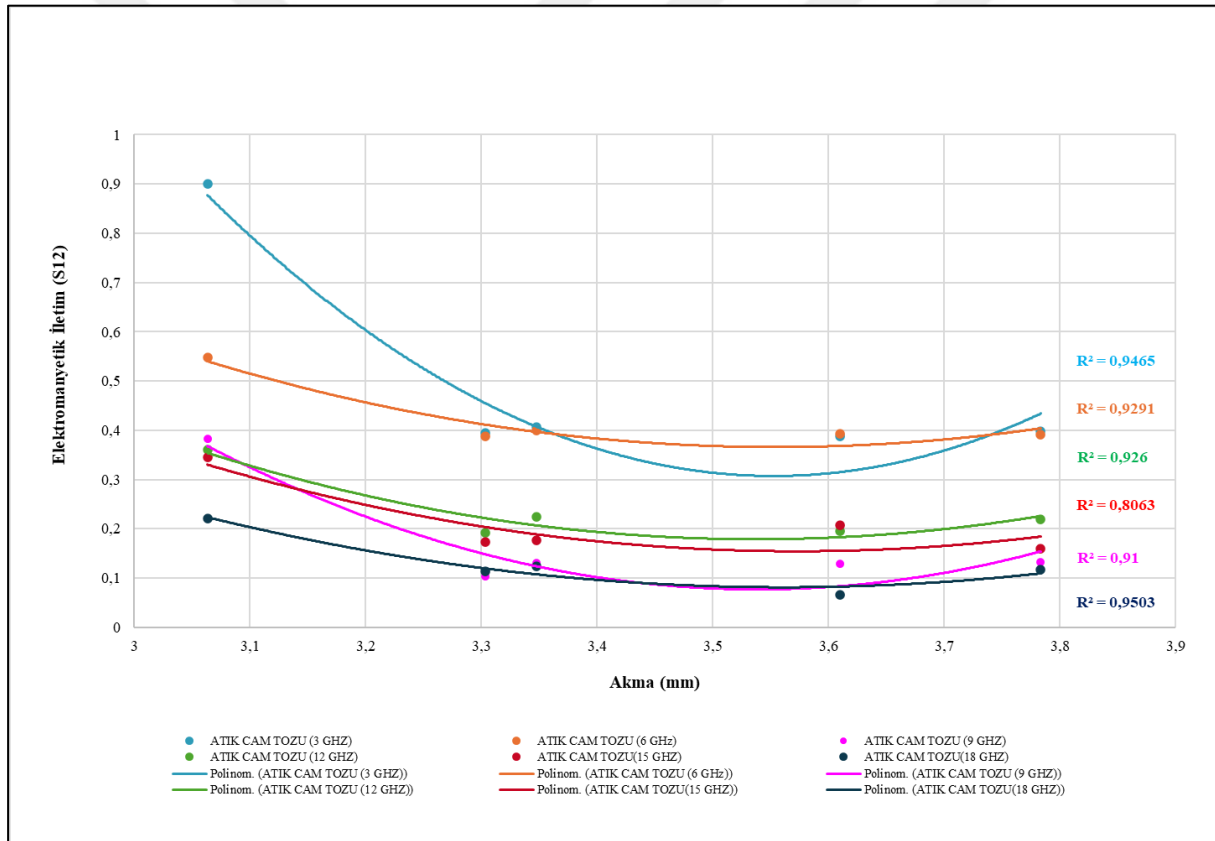
Atık Cam Tozu Oranı	Özgül Ağırlık (g/cm³)	Hava İçeriği (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kg)
%0	2,367	5,540	15,808	65,062	3,063	883,347
%25	2,366	5,589	15,852	65,044	3,347	894,644
%50	2,352	6,123	16,328	62,586	3,783	879,365
%75	2,350	6,214	16,410	62,531	3,61	825,020
%100	2,339	6,639	16,788	60,506	3,303	837,229
Atık Cam Tozu Oranı	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	0,4069	0,3992	0,1308	0,2244	0,1766	0,1244
%50	0,3982	0,3916	0,1316	0,2190	0,1596	0,1163
%75	0,3885	0,3928	0,1290	0,1955	0,2065	0,0666
%100	0,3948	0,3881	0,1030	0,1918	0,1739	0,1139

Akma ile elektromanyetik iletim

Akma ile elektromanyetik iletim arasında “Yüksek-Çok Yüksek” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,81-0,95$). Akma arttıkça elektromanyetik iletim azalmaktadır. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile düşük akma değerlerinde daha belirgindir. Bu durum, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan akma ile bozulan dokunun iletimi olumsuz etkilemesi ile açıklanabilir (Tablo 4.16) (Şekil 4.28).

Tablo 4.16. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin akma ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Atık Cam Tozu Oranı	Akma (mm)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	3,063	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	3,347	0,4069	0,3992	0,1308	0,2244	0,1766	0,1244
%50	3,783	0,3982	0,3916	0,1316	0,2190	0,1596	0,1163
%75	3,61	0,3885	0,3928	0,1290	0,1955	0,2065	0,0666
%100	3,303	0,3948	0,3881	0,1030	0,1918	0,1739	0,1139



Şekil 4.28. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin akma ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

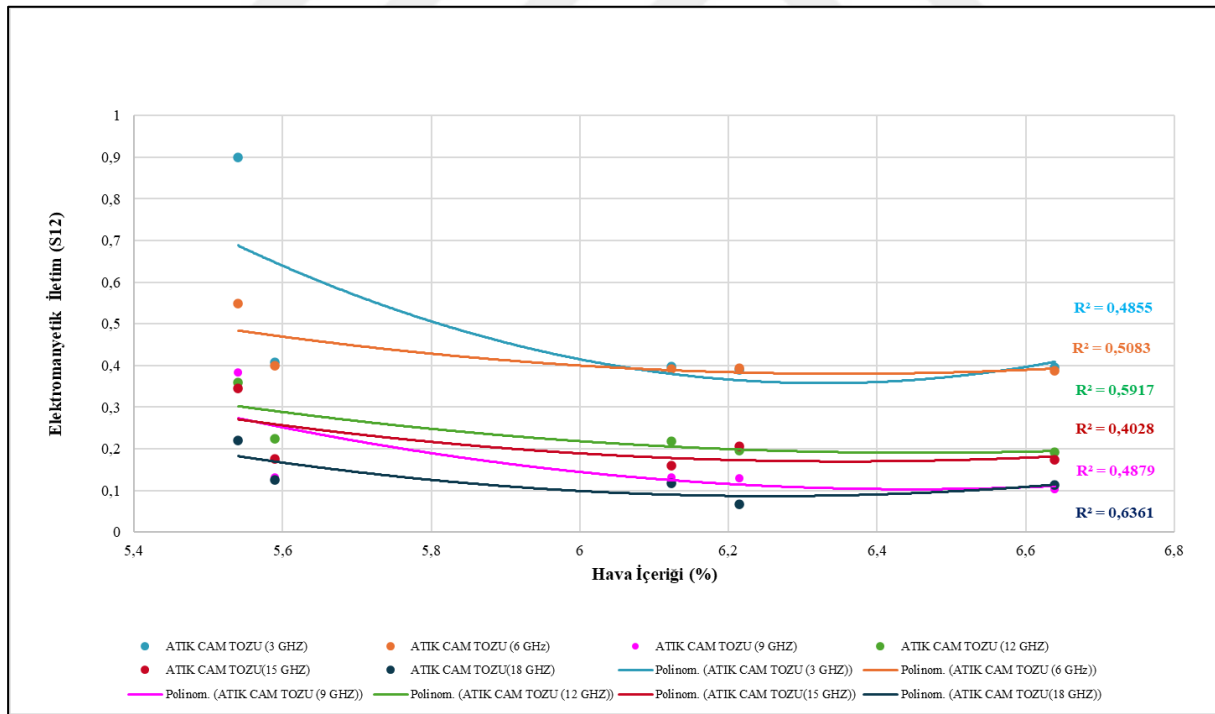
Hava içeriği ile elektromanyetik iletim

Genel olarak, hava içeriği ile elektromanyetik iletim arasında “Orta” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,40-0,64$). Hava içeriği arttıkça elektromanyetik iletimin azaldığı ortaya çıkmıştır. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek

olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile düşük hava içeriği değerlerinde daha belirgindir. Bu durum, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan hava içeriği ile azalan tane temas oranının iletimi olumsuz etkilemesi ile açıklanabilir (Tablo 4.17) (Şekil 4.29).

Tablo 4.17. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Atık Cam Tozu Oranı	Hava İçeriği (%)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	5,540	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	5,589	0,4069	0,3992	0,1308	0,2244	0,1766	0,1244
%50	6,123	0,3982	0,3916	0,1316	0,2190	0,1596	0,1163
%75	6,214	0,3885	0,3928	0,1290	0,1955	0,2065	0,0666
%100	6,639	0,3948	0,3881	0,1030	0,1918	0,1739	0,1139



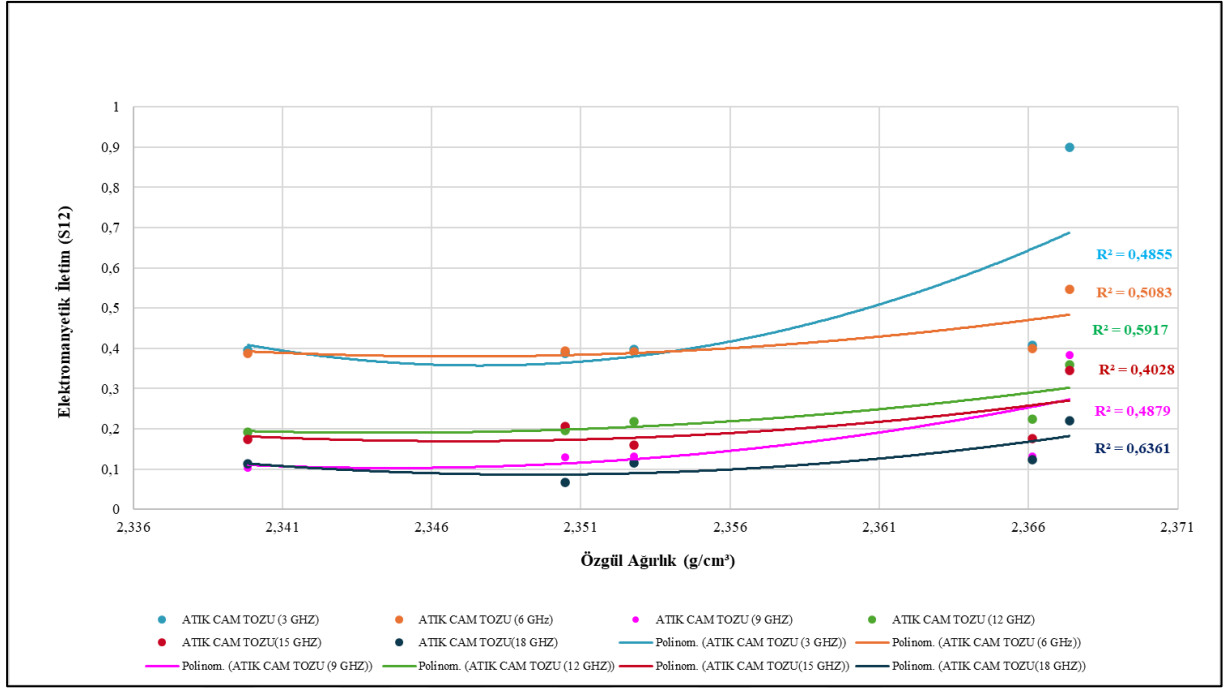
Şekil 4.29. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim

Özgül ağırlık arttıkça cismin yoğunluğu artmakta dolayısıyla içerisindeki katı tane bileşenlerin oranı artarken hava oranı azalmaktadır. Bu sebepten dolayı, yukarıda hava içeriği için yapılan yorum özgül ağırlık içinde geçerlidir, ancak ters ilişki vardır. Genel olarak, atık cam tozu için, özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim arasında “Orta” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,40-0,64$). Yani, özgül ağırlık arttıkça elektromanyetik iletim artmaktadır. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile yüksek özgül ağırlık (yani düşük hava içeriği) değerlerinde daha belirgindir. Bu durum, düşük frekanslarda akımın daha laminer (düzenli) olması ve artan özgül ağırlık (yani düşük hava içeriği) ile artan tane temas oranının iletimi olumlu etkilemesi (kolaylaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.18) (Şekil 4.30).

Tablo 4.18. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Atık Cam Tozu Oranı	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	2,367	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	2,366	0,4069	0,3992	0,1308	0,2244	0,1766	0,1244
%50	2,352	0,3982	0,3916	0,1316	0,2190	0,1596	0,1163
%75	2,350	0,3885	0,3928	0,1290	0,1955	0,2065	0,0666
%100	2,339	0,3948	0,3881	0,1030	0,1918	0,1739	0,1139



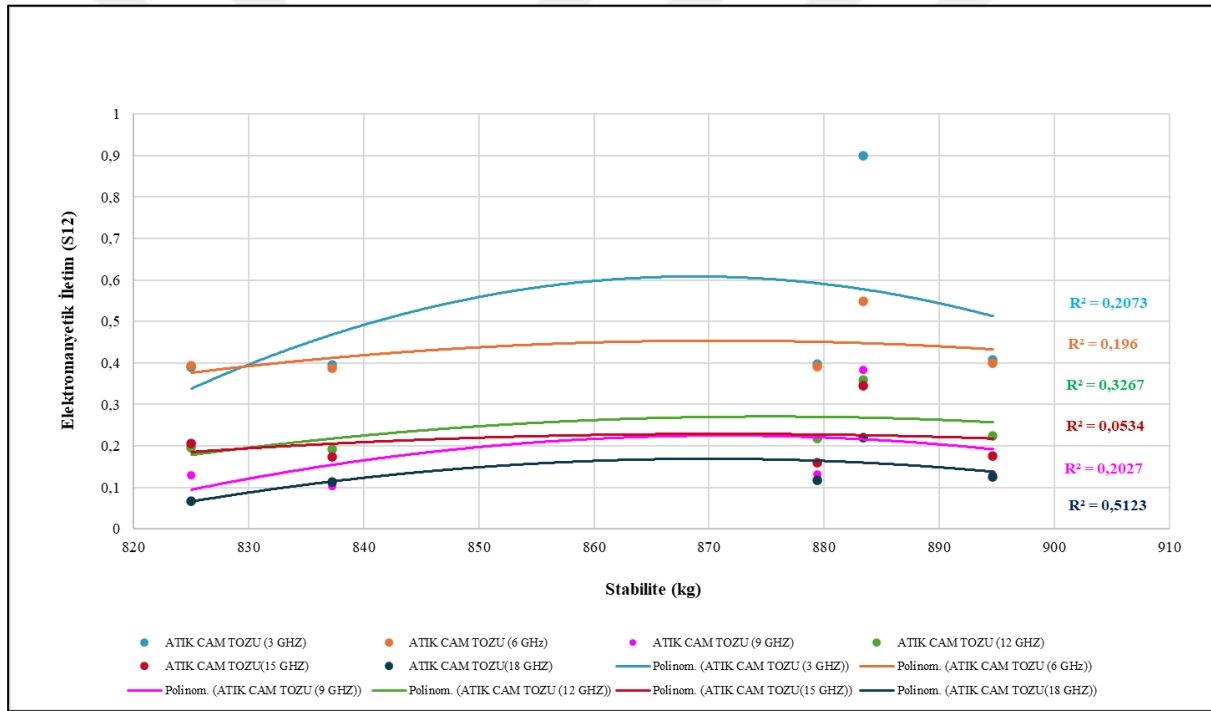
Şekil 4.30. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Stabilite ile elektromanyetik iletim

Genel olarak, atık cam tozu için, stabilite ile elektromanyetik iletim arasında “Düşük-Orta” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,20-0,51$). Kısmen özgül ağırlık ilişkisine benzer şekilde, genel olarak stabilite arttıkça elektromanyetik iletim artmaktadır. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile yüksek stabilite (yani yüksek özgül ağırlık, düşük hava içeriği) değerlerinde daha belirgindir. Bu durum, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan stabilite (yani yüksek özgül ağırlık, düşük hava içeriği) ile artan tane temas oranı, dolayısıyla artan tane kenetlenmesinin iletimi olumlu etkilemesi (kolaylaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.19) (Şekil 4.31).

Tablo 4.19. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Atık Cam Tozu Oranı	Stabilite (kg)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	883,347	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	894,644	0,4069	0,3992	0,1308	0,2244	0,1766	0,1244
%50	879,365	0,3982	0,3916	0,1316	0,2190	0,1596	0,1163
%75	825,020	0,3885	0,3928	0,1290	0,1955	0,2065	0,0666
%100	837,229	0,3948	0,3881	0,1030	0,1918	0,1739	0,1139



Şekil 4.31. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

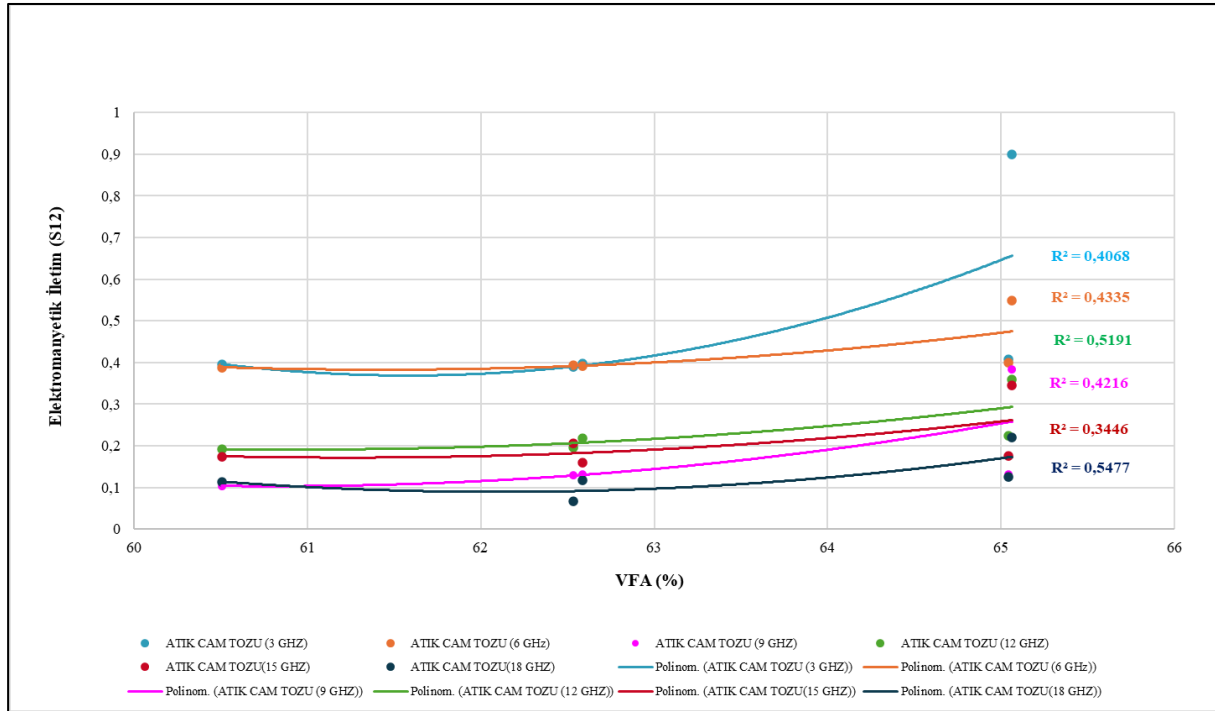
VFA ile elektromanyetik iletim

VFA (Voids Filled with Asphalt) asfaltla dolu boşluk oranı olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak, atık cam tozu için, VFA ile elektromanyetik iletim arasında “Düşük-Orta” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,34-0,55$). Boşlukların dolması özgül ağırlığın artması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, burada da özgül ağırlık ilişkisine benzer şekilde, genel olarak VFA arttıkça elektromanyetik iletim artmaktadır. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3 GHz)

elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile yüksek VFA (yani yüksek özgül ağırlık, düşük hava içeriği) değerlerinde daha belirgindir. Bu durum, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan VFA yani boşlukların asfalt ile dolması (dolayısıyla özgül ağırlığın artması) sonucu artan binder film kalınlığı ve bunun sonucunda da artan tane tutunmasının (yapışma) iletimi olumlu etkilemesi (kolaylaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.20) (Şekil 4.32).

Tablo 4.20. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin VFA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Atık Cam Tozu Oranı	VFA (%)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	65,062	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	65,044	0,4069	0,3992	0,1308	0,2244	0,1766	0,1244
%50	62,586	0,3982	0,3916	0,1316	0,2190	0,1596	0,1163
%75	62,531	0,3885	0,3928	0,1290	0,1955	0,2065	0,0666
%100	60,506	0,3948	0,3881	0,1030	0,1918	0,1739	0,1139



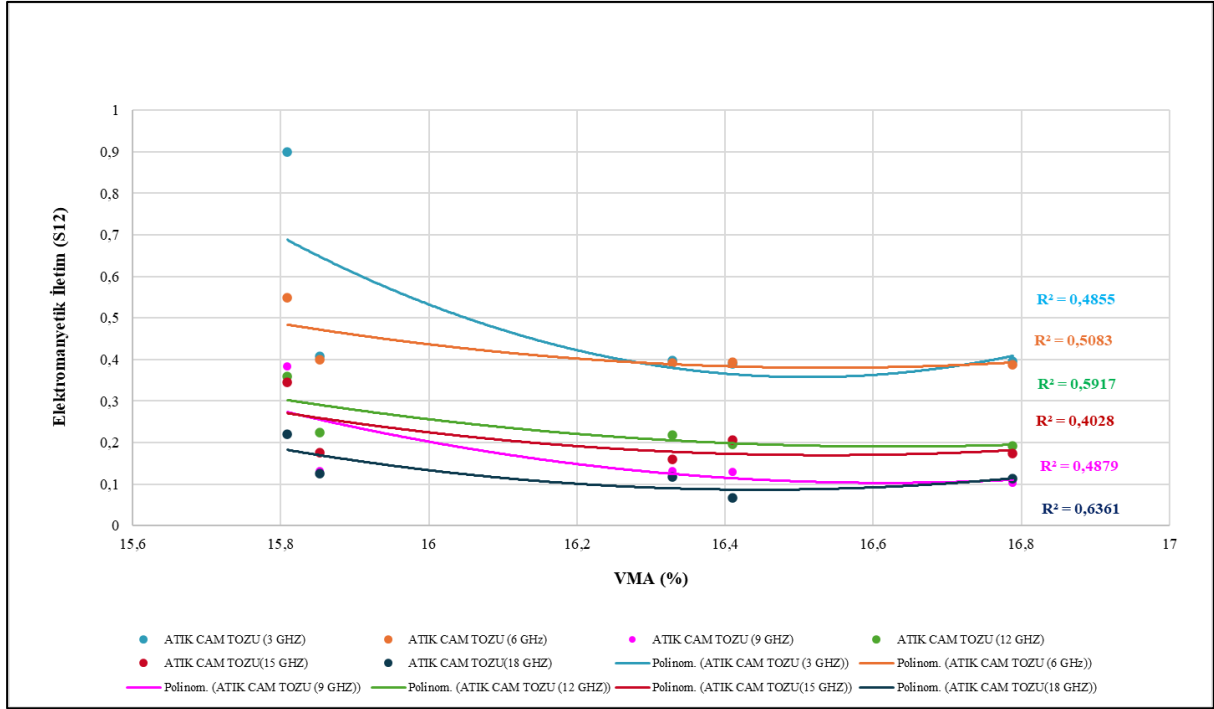
Şekil 4.32. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin VFA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

VMA ile elektromanyetik iletim

VMA (Voids in Mineral Aggregate) mineral agregalar arası boşluk oranı olarak tanımlanmaktadır. Atık cam tozu için, VMA ile elektromanyetik iletim arasında “Orta” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,40-0,64$). Hava içeriği ilişkisine benzer şekilde, genel olarak VMA arttıkça elektromanyetik iletim azalmaktadır. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile düşük VMA değerlerinde daha belirgindir. Bu durum, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan VMA (düşen VFA, artan hava içeriği) ile boşlukların daha az asfalt ile dolması sonucu azalan binder film kalınlığı ve bunun sonucunda da olumsuz etkilenen yani azalan tane tutunmasının (yapışma) iletimi olumsuz etkilemesi (zorlaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.21) (Şekil 4.33).

Tablo 4.21. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin VMA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Atık Cam Tozu Oranı	VMA (%)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	15,808	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	15,852	0,4069	0,3992	0,1308	0,2244	0,1766	0,1244
%50	16,328	0,3982	0,3916	0,1316	0,2190	0,1596	0,1163
%75	16,410	0,3885	0,3928	0,1290	0,1955	0,2065	0,0666
%100	16,788	0,3948	0,3881	0,1030	0,1918	0,1739	0,1139



Şekil 4.33. Atık cam tozu içeren asfalt beton numunelerinin VMA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

4.6.3. Atık seramik içeren asfalt betonlarının Marshall ile elektromanyetik iletim verilerinin değerlendirilmesi

Atık seramik agregası içeren numuneler için yapılan Marshall deneyinden ve elektromanyetik iletim ölçümünden elde edilen sonuçlar hatırlatılacak olursa;

Toplam agreganın %5, %15 ve %25 oranında atık seramik agregası ile hazırlanan numunelerin Marshall Stabilité sonuçlarına göre atık seramik içeriğinin artmasıyla; MS, VFA, özgül ağırlık ve akma değerleri azalırken, hava içeriği ve VMA değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Atık seramik agregasının yüksek su emme kapasitesi (%12) ve gözenekli yapısı sebebiyle karışım içerisindeki oranı sınırlandırılmıştır. Seramik ile ilgili yapılan farklı çalışmalarda da asfalt karışımlarında toplam agreganın ağırlığının en fazla %30 oranında kullanılması önerilmiştir. Yapılan analizler sonucunda binder tabakası şartname limitlerini karşılayan ve karışımda kullanılması gereken optimum atık seramik oranı %5 olarak belirlenmiştir.

En yüksek elektromanyetik iletim büyüklüğü atık seramik agregası içermeyen karışımda 3-6 GHz frekans aralığında çıkmıştır. Ancak atık cam tozu içeren karışımlarda da olduğu gibi atık

seramik agregası içeren karışımlar, 5-5,5 GHz frekans aralığı elektromanyetik iletimin en verimli olduğu aralık çıkmıştır. Ayrıca elektromanyetik iletimin en yüksek olduğu bu noktada atık seramik agregası içeren ve içermeyen karışımlarda tüm numuneler için yaklaşık iletim büyüklüğü %70 çıkmıştır. Sonuç olarak atık seramik agregası içeren tüm numuneler karışımların elektromanyetik iletim katsayılarının azalmasına sebep olmuştur. İletim katsayısının azalması, elektromanyetik dalgaların temas edilen yüzey tarafından soğurulması ve iletilememesine neden olmaktadır. Atık seramik malzemesinin bu davranışı daha önce incelenmiş olan atık cam tozuna benzemekte ve yaklaşık aynı oranlarda kayba neden olarak karışım içerisinde daha çok elektromanyetik kalkanlama (ekranlama) etkisi göstermiştir. Bu benzer davranışın nedeni; atık seramik malzemesi ile atık cam tozunun kimyasal yapısının benzerliği ve dielektrik katsayılarının yaklaşık aynı değerler arasında olması şeklinde açıklanabilir (3-8 Farad/metre) (Kocabağ, 2002; Jawahar ve diğ., 2003; Priya Rani ve Sebastian, 2008; Singh ve diğ., 2014).

Çalışmanın bu kısmında ise atık seramik agregası kullanılarak üretilen asfalt betonlarının Marshall deneyinden elde edilen verilerin elektromanyetik iletim miktarı ile ilişkileri açıklanarak yorumlanmıştır (Tablo 4.22).

Tablo 4.22. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin Marshall deney sonuçları ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

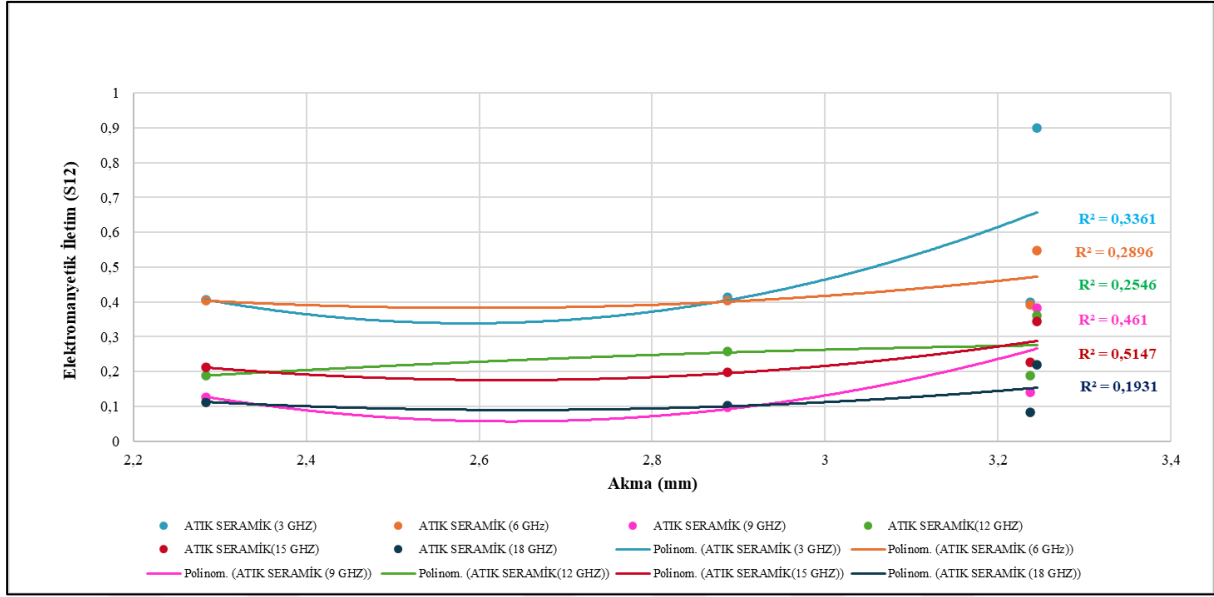
Atık Seramik Oranı	Özgül Ağırlık (g/cm³)	Hava İçeriği (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kg)
%0	2,367	5,540	15,808	65,062	3,245	883,347
%5	2,321	7,371	17,441	57,736	3,237	730,105
%15	2,233	10,884	20,572	47,171	2,887	662,516
%25	2,154	14,028	23,374	40,012	2,284	635,923
Atık Seramik Oranı	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%5	0,3994	0,3921	0,1395	0,1873	0,2262	0,0824
%15	0,4135	0,4031	0,0961	0,2576	0,1968	0,1023
%25	0,4052	0,4030	0,1266	0,1877	0,2110	0,1122

Akma ile elektromanyetik iletim

Genel olarak akma arttıkça elektromanyetik iletim 2,9 mm akma değerlerine kadar hemen hemen aynı kalmakta, daha sonra 3,25 mm akma değerine kadar ise bir miktar artmaktadır. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3 ve 6 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda (örneğin 12-18 GHz) iletim değerleri düşük çıkmaktadır. İlişki seviyesi, “Düşük-Orta” ($R^2=0,19-0,51$) düzeydedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile yüksek akma değerlerinde daha belirgin olarak görülebilmektedir. Elektromanyetik iletimin bir miktar artması, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan akma miktarı ile dokunun henüz iletimi olumsuz etkileyecek kadar bozulmamış, hatta Mikromorfolojik Analiz bölümünde de görüldüğü gibi, levhamsı yapıdaki seramik taneleri arasındaki bazı hava boşluklarının doldurulması sonucu iletimi olumlu etkilemesi (kolaylaşması) ile açıklanabilir (Tablo 4.23) (Şekil 4.34).

Tablo 4.23. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin akma ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Atık Seramik Oranı	Akma (mm)	3 GHz	6 GHz	9 GHz	12 GHz	15 GHz	18 GHz
		Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)
%0	3,245	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%5	3,237	0,3994	0,3921	0,1395	0,1873	0,2262	0,0824
%15	2,887	0,4135	0,4031	0,0961	0,2576	0,1968	0,1023
%25	2,284	0,4052	0,4030	0,1266	0,1877	0,2110	0,1122



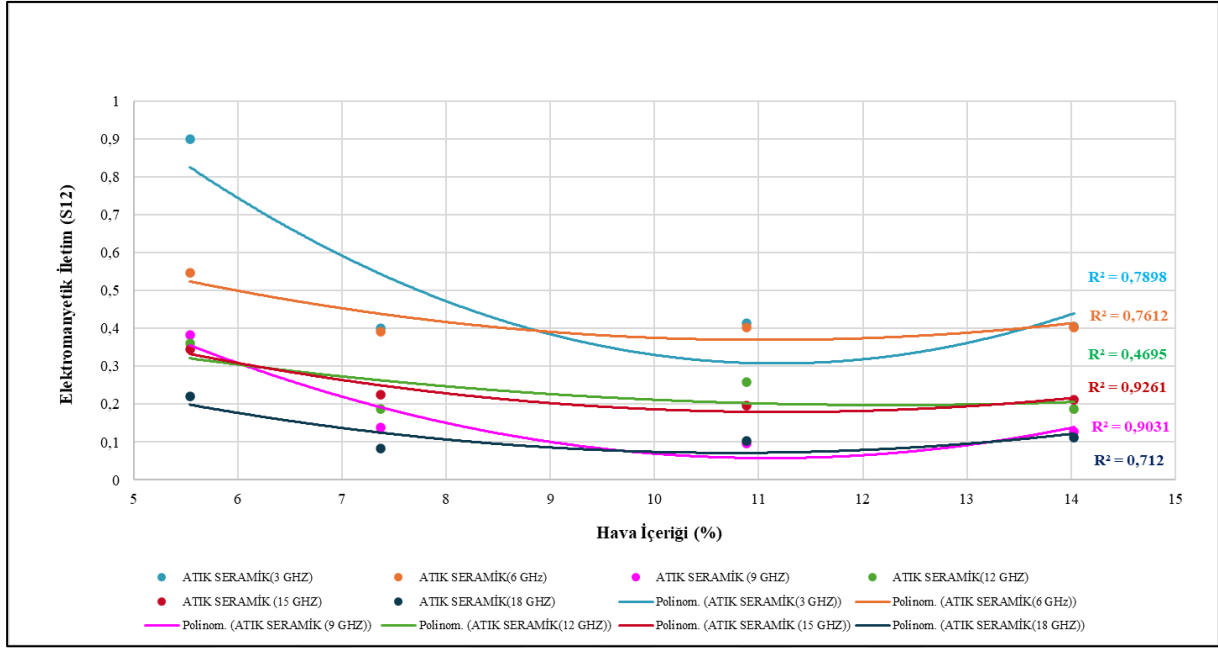
Şekil 4.34. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin akma ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Hava içeriği ile elektromanyetik iletim

Genel olarak, hava içeriği ile elektromanyetik iletim arasında “Yüksek-Çok Yüksek” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,71-0,93$). Hava içeriği arttıkça elektromanyetik iletim azalmaktadır. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3-6 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile düşük hava içeriği değerlerinde daha belirgindir. Bu durum, düşük frekanslarda akımın daha laminer (düzenli) olması ve artan hava içeriği ile azalan tane temas oranının iletimi olumsuz etkilemesi ile açıklanabilir (Tablo 4.24) (Şekil 4.35).

Tablo 4.24. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Atık Seramik Oranı	Hava İçeriği (%)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	5,540	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%5	7,371	0,3994	0,3921	0,1395	0,1873	0,2262	0,0824
%15	10,889	0,4135	0,4031	0,0961	0,2576	0,1968	0,1023
%25	14,028	0,4052	0,4030	0,1266	0,1877	0,2110	0,1122



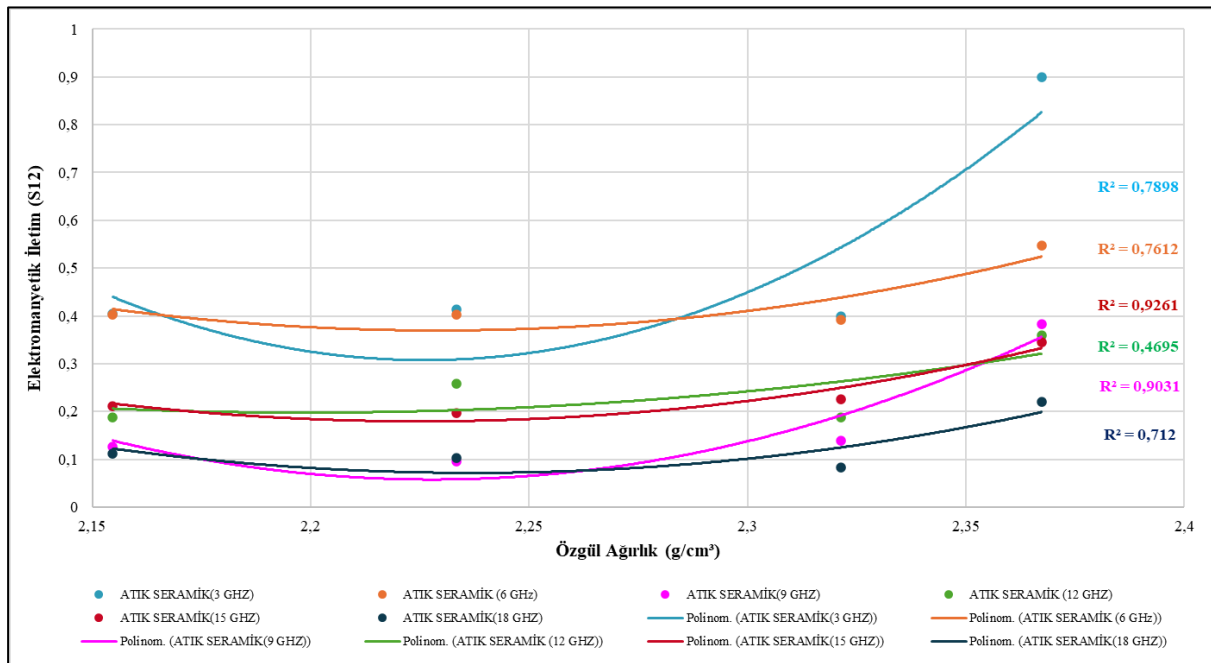
Şekil 4.35. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim

Özgül ağırlık arttıkça cismin yoğunluğu artmakta dolayısıyla içerisindeki katı tane bileşenlerin oranı artarken hava oranı azalmaktadır. Bu sebepten ötürü, yukarıda hava içeriği için yapılan yorum özgül ağırlık içinde geçerlidir, ancak ters ilişki vardır. Genel olarak, atık seramik için, özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim arasında “Yüksek-Çok Yüksek” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,71-0,93$). Yani, özgül ağırlık arttıkça elektromanyetik iletim artmaktadır. Ayrıca, genel olarak, düşük frekanslarda (örneğin 3-6 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile yüksek özgül ağırlık (yani düşük hava içeriği) değerlerinde daha belirgindir. Bu durum, düşük frekanslarda akımın daha laminer (düzenli) olması ve artan özgül ağırlık (yani düşük hava içeriği) ile artan tane temas oranının iletimi olumlu etkilemesi (kolaylaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.25) (Şekil 4.36).

Tablo 4.25. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Atık Seramik Oranı	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	2,367	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%5	2,321	0,3994	0,3921	0,1395	0,1873	0,2262	0,0824
%15	2,233	0,4135	0,4031	0,0961	0,2576	0,1968	0,1023
%25	2,154	0,4052	0,4030	0,1266	0,1877	0,2110	0,1122



Şekil 4.36. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

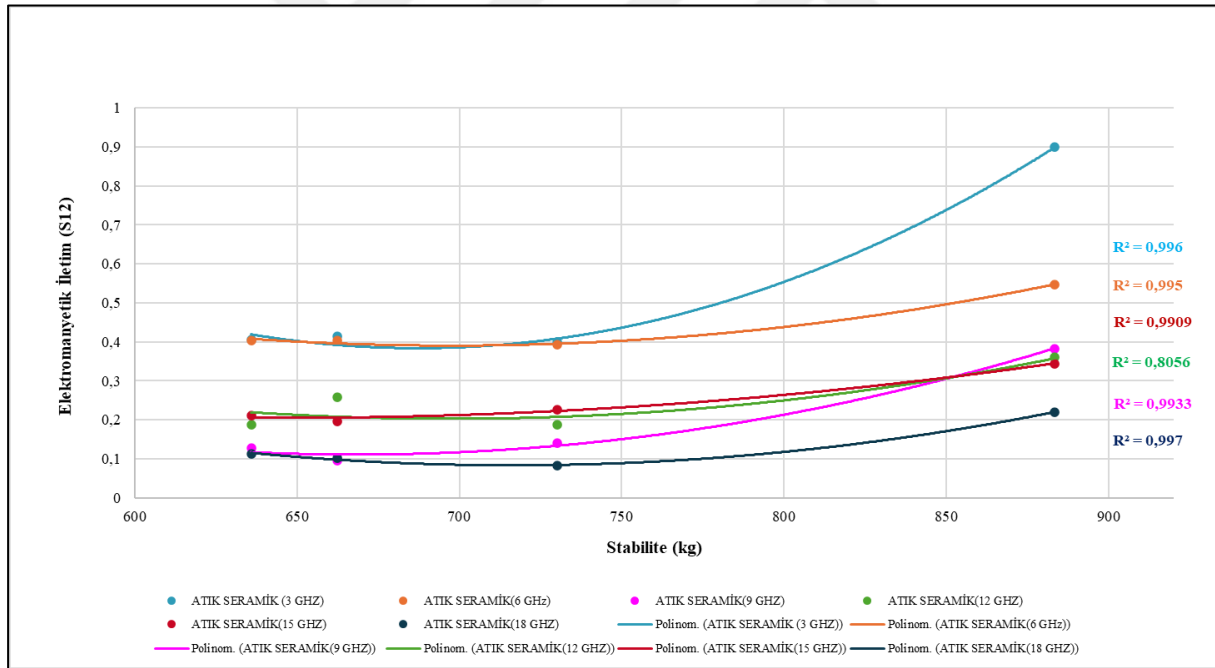
Stabilite ile elektromanyetik iletim

Genel olarak, atık seramik için, stabilite ile elektromanyetik iletim arasında “Yüksek-Çok Yüksek” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,81-1,0$). Kısmen özgül ağırlık ilişkisine benzer şekilde, genel olarak stabilite arttıkça elektromanyetik iletim artmaktadır. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3-6 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile yüksek stabilite (yani yüksek özgül ağırlık, düşük hava içeriği) değerlerinde daha belirgindir. Bu durum, düşük

frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan stabilite (yani yüksek özgül ağırlık, düşük hava içeriği) ile artan tane temas oranı, dolayısıyla artan tane kenetlenmesinin iletimi olumlu etkilemesi (kolaylaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.26) (Şekil 4.37).

Tablo 4.26. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Atık Seramik Oranı	Stabilite (kg)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	883,347	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%5	730,105	0,3994	0,3921	0,1395	0,1873	0,2262	0,0824
%15	662,516	0,4135	0,4031	0,0961	0,2576	0,1968	0,1023
%25	635,923	0,4052	0,4030	0,1266	0,1877	0,2110	0,1122



Şekil 4.37. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

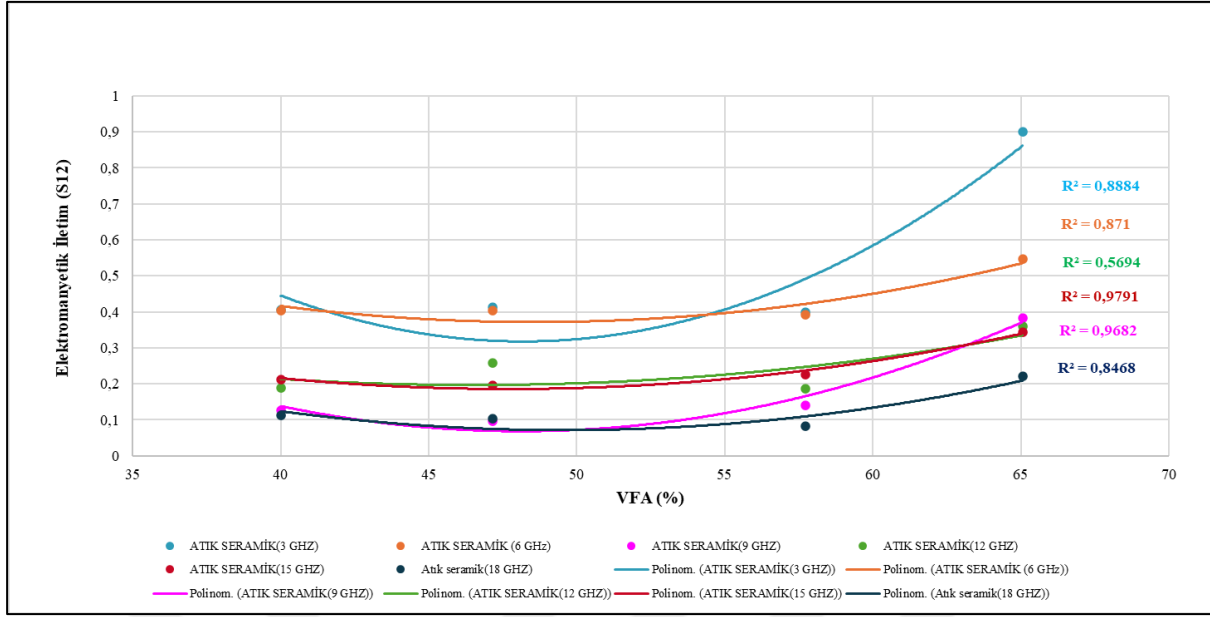
VFA ile elektromanyetik iletim

VFA (Voids Filled with Asphalt) asfaltla dolu boşluk oranı olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak, atık seramik için, VFA ile elektromanyetik iletim arasında “Yüksek-Çok Yüksek”

düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,85-0,98$). Boşlukların dolması özgül ağırlığın artması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, burada da özgül ağırlık ilişkisine benzer şekilde, genel olarak VFA arttıkça elektromanyetik iletim artmaktadır. Artış, %58'e kadar az miktarda olup bu değerden sonra oldukça belirgin hale gelmektedir. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3-6 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile yüksek VFA (yani yüksek özgül ağırlık, düşük hava içeriği) değerlerinde daha belirgindir. Bu durum, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan VFA yani boşlukların asfalt ile dolması (dolayısıyla özgül ağırlığın artarak, hava içeriğinin düşmesi) sonucu artan binder film kalınlığı ve bunun sonucunda da artan tane tutunmasının (yapışma) iletimi olumlu etkilemesi (kolaylaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.27) (Şekil 4.38).

Tablo 4.27. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin VFA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Atık Seramik Oranı	VFA (%)	3 GHz	6 GHz	9 GHz	12 GHz	15 GHz	18 GHz
		Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)
%0	65,062	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%5	57,736	0,3994	0,3921	0,1395	0,1873	0,2262	0,0824
%15	47,171	0,4135	0,4031	0,0961	0,2576	0,1968	0,1023
%25	40,012	0,4052	0,4030	0,1266	0,1877	0,2110	0,1122



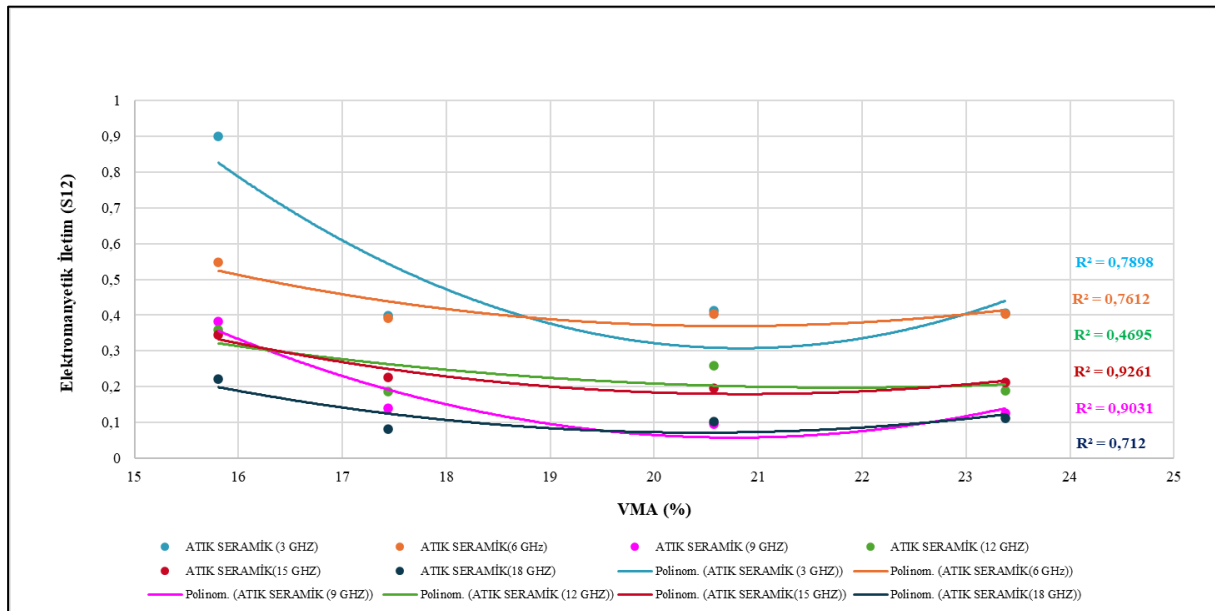
Şekil 4.38. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin VFA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

VMA ile elektromanyetik iletim

VMA (Voids in Mineral Aggregate) mineral agregalar arası boşluk oranı olarak tanımlanmaktadır. Atık seramik için, VMA ile elektromanyetik iletim arasında “Yüksek-Çok Yüksek” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,71-0,93$). Hava içeriği ilişkisine benzer şekilde, VMA arttıkça elektromanyetik iletim azalmaktadır. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3-6 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile düşük VMA değerlerinde daha belirgindir. Bu durum, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan VMA (düşen VFA, artan hava içeriği) ile boşlukların daha az asfalt ile dolması sonucu azalan binder film kalınlığı ve bunun sonucunda da olumsuz etkilenen yani azalan tane tutunmasının (yapışma) iletimi olumsuz etkilemesi (zorlaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.28) (Şekil 4.39).

Tablo 4.28. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin VMA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Atık Seramik Oranı	VMA (%)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	15,808	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%5	17,441	0,3994	0,3921	0,1395	0,1873	0,2262	0,0824
%15	20,572	0,4135	0,4031	0,0961	0,2576	0,1968	0,1023
%25	23,374	0,4052	0,4030	0,1266	0,1877	0,2110	0,1122



Şekil 4.39. Atık seramik içeren asfalt beton numunelerinin VMA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

4.6.4. Kuvars içeren asfalt betonlarının Marshall ile elektromanyetik iletim verilerinin değerlendirilmesi

Kuvars agregası içeren numuneler için yapılan Marshall deneyinden ve elektromanyetik iletim ölçümünden elde edilen sonuçlar hatırlatılacak olursa;

Kuvars agregası toplam agreganın %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında asfalt karışımlarda geleneksel agregası ile yer değiştirilerek kullanılmıştır. Hazırlanan asfalt beton numuneleri üzerinde Marshall Stabilité analizleri yapılmış ve elde edilen grafikler incelendiğinde kuvars

oranı arttıkça, VFA, özgül ağırlık ve akma değerleri azalırken, MS, hava içeriği ve VMA değerlerinin arttığı ortaya çıkmıştır. Kuvars agregasının sertliği yüksek bir malzeme olmasından dolayı karışımda yeterli dayanımı sağlamış ancak hava içeriğinin şartname limitlerini aştığı ortaya çıkmıştır.

3-18 GHz frekans aralığında çeşitli oranlarda kuvars agregası içeren asfalt karışımların Vektör Network Analizör ile ölçülen elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. Analiz sonuçlarına bakıldığında kuvars agregası içermeyen karışımın elektromanyetik iletim performansı, kuvars agregası içeren diğer karışımlara oranla genel olarak yüksek çıkmıştır. Ancak bazı frekans aralıklarında kuvars agregası içeren numunelerin performanslarında yükselmeler gözlemlenmiştir. 3-6 GHz frekans aralığında kuvars agregası içeren tüm numunelerin iletim performansları yaklaşık 5,5 GHz frekans değerinde en yüksek verimi göstermiştir (yaklaşık %70). Özellikle 6 GHz frekans değeri için %50, %75 ve %100 oranında kuvars içeren karışımlar (yaklaşık %65) hiç kuvars içermeyen karışımlardan (yaklaşık %55) çok daha iyi performans göstermişlerdir. Genel olarak frekans arttığında tüm karışımların iletim katsayıları düşmüştür ancak 8-10 GHz aralığında %100 kuvars içeren numune en iyi performansı sergilemiştir. Bu durumun kuvars mineralinin piezoelektrik malzeme olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Piezoelektrik malzemeler yüksek basınç ve sıcaklık altında elektrik enerjisi üretebilen malzemelerdir (Smith ve Rhodes, 1994). Asfalt karışımların elektromanyetik iletim ölçümü için kuvars agregası içeren numunelerin hazırlanması sırasında karışımlar (karıştırma ve sıkıştırma esnasında) yüksek sıcaklık ve basınca maruz kalmıştır. Bu mekanik işlemlerin uygulanması kuvarsın elektromanyetik iletim performansını etkilediği sonucuna varılabilir.

Çalışmanın bu kısmında ise kuvars agregası kullanılarak üretilen asfalt betonlarının Marshall deneyinden elde edilen verilerin elektromanyetik iletim miktarı ile ilişkileri açıklanarak yorumlanmıştır (Tablo 4.29).

Tablo 4.29. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin Marshall deney sonuçları ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Kuvars Oranı	Özgül Ağırlık (g/cm³)	Hava İçeriği (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kg)
%0	2,36	5,64	15,9	64,53	3,24	810,58
%25	2,33	7,2	17,29	58,37	3,37	694,1
%50	2,3	8,04	18,04	55,46	3,15	714,2
%75	2,3	8,41	18,37	54,29	3,19	949,47
%100	2,28	8,99	18,88	52,45	2,94	934

Kuvars Oranı	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	0,3659	0,4270	0,1244	0,1868	0,2204	0,1094
%50	0,3079	0,5982	0,2241	0,1433	0,2305	0,1859
%75	0,3089	0,6144	0,30893	0,0644	0,2061	0,1906
%100	0,3028	0,6259	0,4466	0,0435	0,1465	0,2592

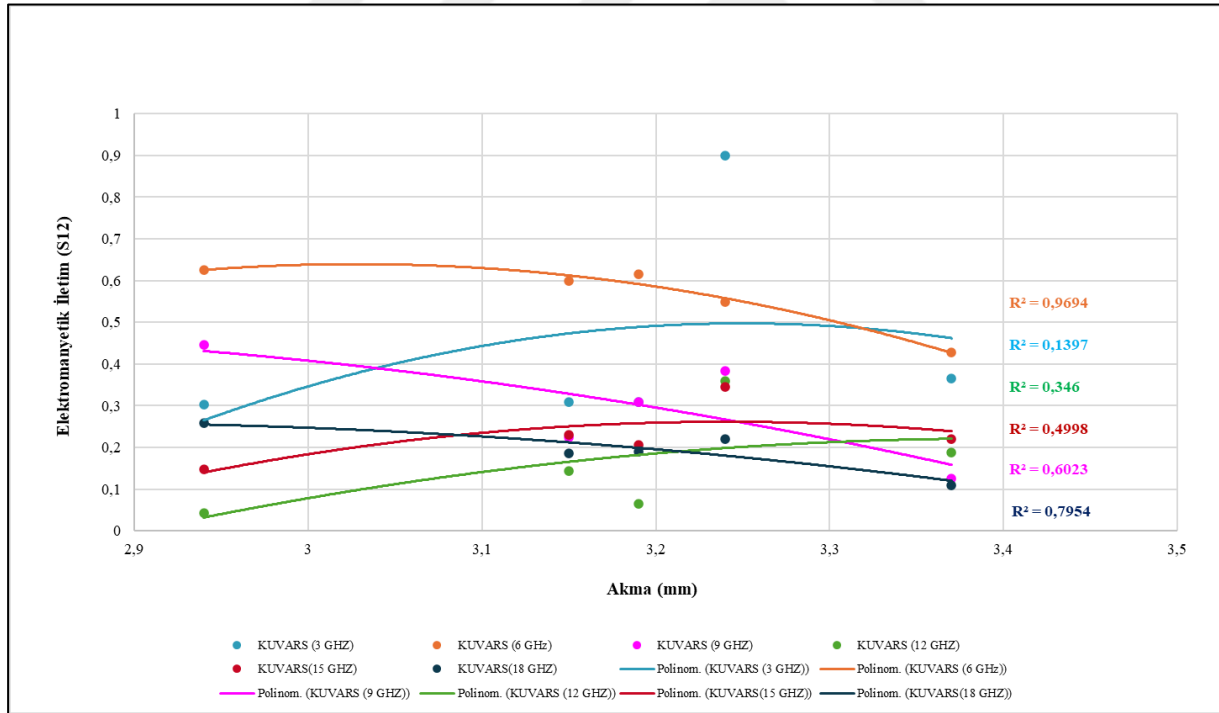
Akma ile elektromanyetik iletim

Kuvars için elde edilen akma ve elektromanyetik iletim eğrilerine bakıldığında, genel olarak, akma arttıkça, 6, 9 ve 18 GHz için iletimin azaldığı, 3, 15 ve 12 GHz için ise arttığı görülmektedir. Ancak, ilişki düzeylerine bakıldığında 6, 9 ve 18 GHz için “Orta-Çok Yüksek” ($R^2=0,60-0,97$), 3, 15 ve 12 GHz için ise “Düşük-Orta” ($R^2=0,14-0,50$) düzeyde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, akma arttıkça, elektromanyetik iletimin azaldığı ilişkisinin daha geçerli olduğu değerlendirilmesi yapılmıştır. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3-9 GHz arası) Elektromanyetik İletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşük çıkmaktadır. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile düşük akma değerlerinde daha belirgindir. Bu durum, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan akma ile bozulan dokunun iletimi olumsuz etkilemesi (zorlaştırması) ile açıklanabilir. Burada, her ne kadar, ilişki düzeylerine bakılarak (R^2) akma arttıkça, elektromanyetik iletimin azaldığı ilişkisinin daha geçerli olduğu değerlendirilmesi yapılmış olsa da, 3, 15 ve 12 GHz için akma ile elektromanyetik iletim arasındaki düşük düzeyli de olsa farklı çıkan ilişki durumu, Mikromorfolojik Analiz bölümünde de görüldüğü gibi, çok sert yapıdaki kuvars tanelerinin (MOHS Sertliği: 7) kenar

zonları boyunca değişik derecede çatlaklı bir yapı kazanmış olması ve bu çatlaklı zonların farklı oranlarda asfaltın emilmesine neden olması sonucu asfalt betonunun farklı davranması ile açıklanabilir (Tablo 4.30) (Şekil 4.40).

Tablo 4.30. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin akma ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Kuvars Oranı	Akma (mm)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	3,24	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	3,37	0,3659	0,4270	0,1244	0,1868	0,2204	0,1094
%50	3,15	0,3079	0,5982	0,2241	0,1433	0,2305	0,1859
%75	3,19	0,3089	0,6144	0,30893	0,0644	0,2061	0,1906
%100	2,94	0,3028	0,6259	0,4466	0,0435	0,1465	0,2592



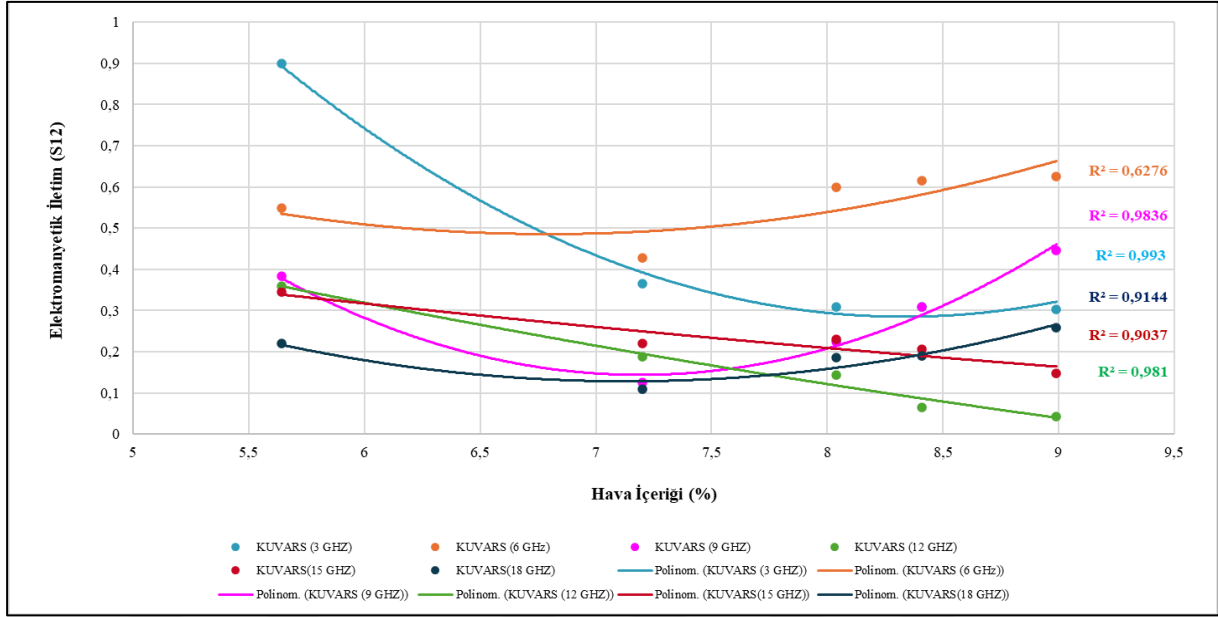
Şekil 4.40. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin akma ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Hava içeriği ile elektromanyetik iletim

Yukarıda, akma ile elektromanyetik iletim ilişkisinde olduğu gibi, burada da kuvars için elde edilen hava içeriği ile elektromanyetik iletim eğrilerine bakıldığında, genel olarak, hava içeriği arttıkça, 6, 9 ve 18 GHz için iletimin arttığı, 3, 15 ve 12 GHz için ise azaldığı görülmektedir. İlişki düzeylerine bakıldığında 6, 9 ve 18 GHz için “Orta-Çok Yüksek” ($R^2=0,62-0,98$), 3, 15 ve 12 GHz için ise “Çok Yüksek” ($R^2=0,90-0,99$) düzeyde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, her iki ilişki durumunun geçerli olabileceği değerlendirilmesi yapılmıştır. Yukarıda da belirtildiği gibi, çelişkili gibi görünen bu durum, Mikromorfolojik Analiz bölümünde de görüldüğü üzere, çok sert yapıdaki kuvars tanelerinin (MOHS Sertliği: 7, Press ve Siever, 1982; Thompson ve Turk, 1991) kenar zonları boyunca değişik derecede çatlaklı bir yapı kazanmış olması ve bu çatlaklı zonların farklı oranlarda asfaltın emilmesine neden olması sonucu asfalt betonunun farklı davranması ile açıklanabilir. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3-6 GHz arası) Elektromanyetik İletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşük çıkmaktadır. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile hem düşük hem de yüksek hava içeriği değerlerinde belirgin olarak görülebilmektedir (Tablo 4.31) (Şekil 4.41).

Tablo 4.31. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Kuvars Oranı	Hava İçeriği (%)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	5,64	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	7,2	0,3659	0,4270	0,1244	0,1868	0,2204	0,1094
%50	8,04	0,3079	0,5982	0,2241	0,1433	0,2305	0,1859
%75	8,41	0,3089	0,6144	0,30893	0,0644	0,2061	0,1906
%100	8,99	0,3028	0,6259	0,4466	0,0435	0,1465	0,2592



Şekil 4.41. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

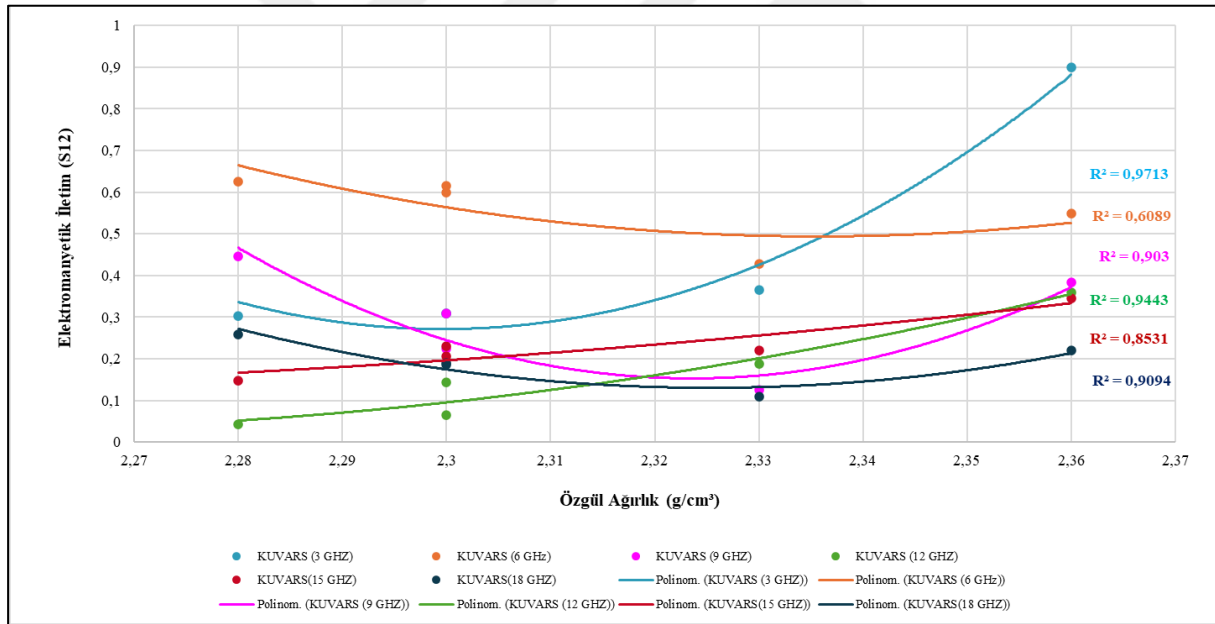
Özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim

Yukarıdaki her iki ilişkide olduğu gibi, burada da kuvars için elde edilen özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim eğrilerine bakıldığında, genel olarak, özgül ağırlık arttıkça, 6, 9 ve 18 GHz için iletimin çok az da olsa azaldığı, 3, 15 ve 12 GHz için ise belirgin olarak arttığı görülmektedir. İlişki düzeylerine bakıldığında 6, 9 ve 18 GHz için “Orta-Çok Yüksek” ($R^2=0,61-0,94$), 3, 15 ve 12 GHz için ise “Yüksek-Çok Yüksek” ($R^2=0,85-0,97$) düzeyde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, her iki ilişki durumunun geçerli olabileceği değerlendirilmesi yapılmıştır. Yukarıda da belirtildiği gibi, çelişkili gibi görünen bu durum, Mikromorfolojik Analiz bölümünde de görüldüğü üzere, çok sert yapıdaki kuvars tanelerinin (MOHS Sertliği: 7, Press ve Siever, 1982; Thompson ve Turk, 1991) kenar zonları boyunca değişik derecede çatlaklı bir yapı kazanmış olması ve bu çatlaklı zonların farklı oranlarda asfaltın emilmesine neden olması sonucu asfalt betonunun farklı davranması ile açıklanabilir. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3-6 GHz arası) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşük çıkmaktadır. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile hem düşük hem de yüksek özgül ağırlık değerlerinde belirgin olarak görülebilmektedir. Özgül ağırlık arttıkça elektromanyetik iletimin artması ve düşük frekanslarda elektromanyetik iletimin daha yüksek olması, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan özgül ağırlık

(yani düşük hava içeriği) ile artan tane temas oranının iletimi olumlu etkilemesi (kolaylaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.32) (Şekil 4.42).

Tablo 4.32. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Kuvars Oranı	Özgöl Ağırlık (g/cm ³)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	2,36	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	2,33	0,3659	0,4270	0,1244	0,1868	0,2204	0,1094
%50	2,3	0,3079	0,5982	0,2241	0,1433	0,2305	0,1859
%75	2,3	0,3089	0,6144	0,30893	0,0644	0,2061	0,1906
%100	2,28	0,3028	0,6259	0,4466	0,0435	0,1465	0,2592



Şekil 4.42. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

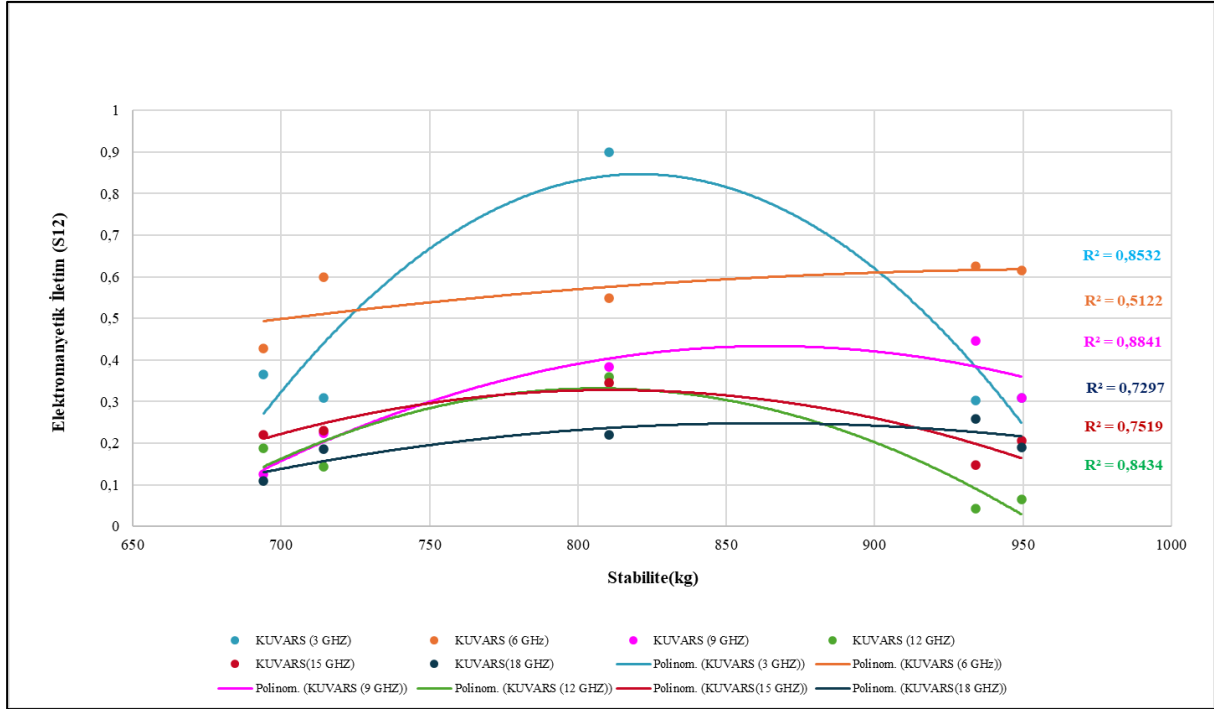
Stabilite ile elektromanyetik iletim

Yukarıdaki üç ilişkide de olduğu gibi, burada da kuvars için elde edilen stabilite ile elektromanyetik iletim eğrilerine bakıldığında, genel olarak, stabilite arttıkça, 6, 9 ve 18 GHz için iletimin arttığı, 3, 15 ve 12 GHz için ise, 810,58 kg Stabilite değerine kadar arttığı, daha sonra ise 950 kg değerine kadar düşüş gösterdiği görülmektedir. İlişki düzeylerine bakıldığında

6, 9 ve 18 GHz için “Orta-Yüksek” ($R^2=0,51-0,88$); 3, 15 ve 12 GHz için ise “Yüksek” ($R^2=0,75-0,85$) düzeyde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, her iki ilişki durumunun geçerli olabileceği değerlendirilmesi yapılmıştır. Daha önce de belirtildiği gibi, çelişkili gibi görünen bu durum, çok sert yapıdaki kuvars tanelerinin kenar zonları boyunca değişik derecede çatlaklı bir yapı kazanmış olması ve bu çatlaklı zonların farklı oranlarda asfaltın emilmesine neden olması sonucu asfalt betonunun farklı davranması ile açıklanabilir. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3-6 GHz arası) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşük çıkmaktadır. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile hem düşük hem de yüksek Stabilitate değerlerinde belirgin olarak görülebilmektedir. Stabilitate arttıkça elektromanyetik iletimin artması ve düşük frekanslarda elektromanyetik iletimin daha yüksek olması, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan stabilitate (yani yüksek özgül ağırlık, düşük hava içeriği) ile artan tane temas oranı, dolayısıyla artan tane kenetlenmesinin iletimi olumlu etkilemesi (kolaylaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.33) (Şekil 4.43).

Tablo 4.33. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin stabilitate ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Kuvars Oranı	Stabilitate (kg)	3 GHz	6 GHz	9 GHz	12 GHz	15 GHz	18 GHz
		Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)
%0	810,58	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	694,1	0,3659	0,4270	0,1244	0,1868	0,2204	0,1094
%50	714,2	0,3079	0,5982	0,2241	0,1433	0,2305	0,1859
%75	949,47	0,3089	0,6144	0,30893	0,0644	0,2061	0,1906
%100	934	0,3028	0,6259	0,4466	0,0435	0,1465	0,2592



Şekil 4.43. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

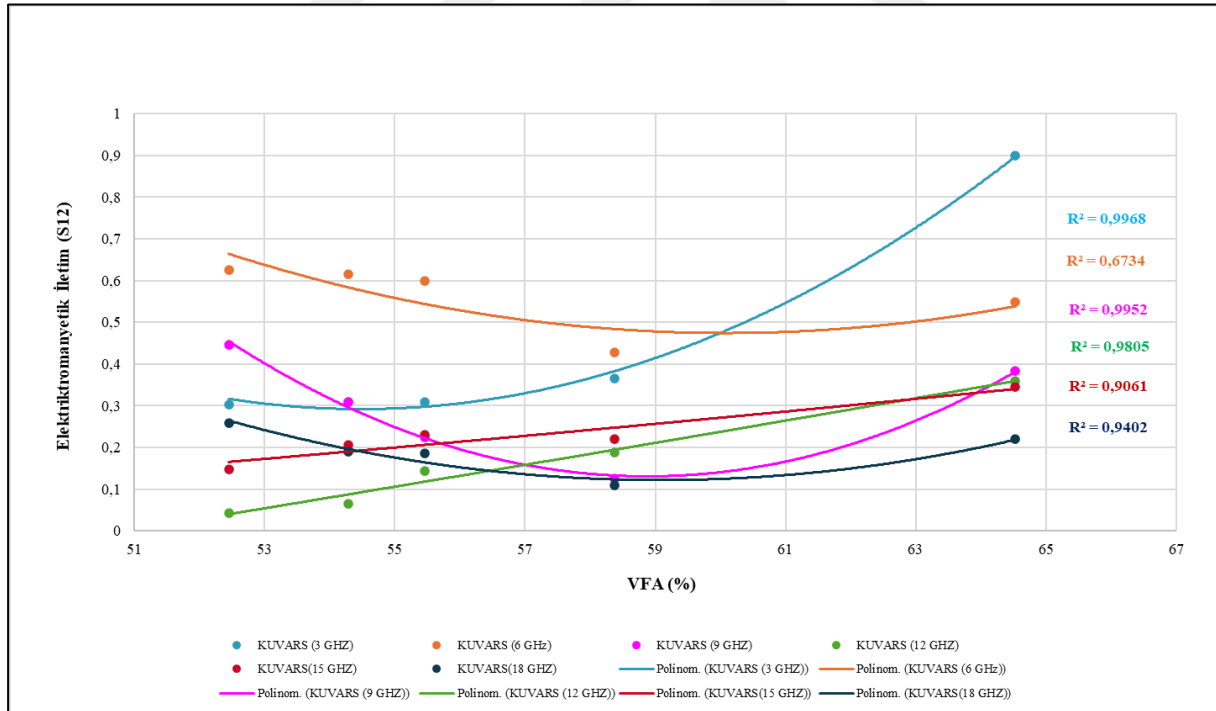
VFA ile elektromanyetik iletim

VFA (Voids Filled with Asphalt) asfaltla dolu boşluk oranı olarak tanımlanmaktadır. Yukarıdaki ilişkilerde olduğu gibi, burada da kuvars için elde edilen VFA ile elektromanyetik iletim eğrilerine bakıldığında, genel olarak, VFA arttıkça, 6, 9 ve 18 GHz için iletimin %58,37 VFA değerine kadar azaldığı, bu değerden sonra ise %64,53 VFA değerine kadar arttığı, 3, 15 ve 12 GHz için ise sürekli ve belirgin şekilde arttığı görülmektedir. İlişki düzeylerine bakıldığında 6, 9 ve 18 GHz için “Orta-Çok Yüksek” ($R^2=0,67-1,0$), 3, 15 ve 12 GHz için ise “Çok Yüksek” ($R^2=0,91-1,0$) düzeyde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, her iki ilişki durumunun geçerli olabileceği değerlendirilmesi yapılmıştır. Yukarıda da belirtildiği gibi, çelişkili gibi görünen bu durum, çok sert yapıdaki kuvars tanelerinin kenar zonları boyunca değişik derecede çatlaklı bir yapı kazanmış olması ve bu çatlaklı zonların farklı oranlarda asfaltın emilmesine neden olması sonucu asfalt betonunun farklı davranması ile açıklanabilir. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3-6 GHz arası) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşük çıkmaktadır. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile hem düşük hem de yüksek VFA değerlerinde belirgin olarak görülebilmektedir. VFA arttıkça elektromanyetik iletimin artması ve düşük frekanslarda elektromanyetik iletimin daha yüksek olması, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan VFA

yani boşlukların asfalt ile dolması (dolayısıyla özgül ağırlığın artarak, hava içeriğinin düşmesi) sonucu artan binder film kalınlığı ve bunun sonucunda da artan tane tutunmasının (yapışma) iletimi olumlu etkilemesi (kolaylaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.34) (Şekil 4.44).

Tablo 4.34. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin VFA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Kuvars Oranı	VFA (%)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	64,53	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	58,37	0,3659	0,4270	0,1244	0,1868	0,2204	0,1094
%50	55,46	0,3079	0,5982	0,2241	0,1433	0,2305	0,1859
%75	54,29	0,3089	0,6144	0,30893	0,0644	0,2061	0,1906
%100	52,45	0,3028	0,6259	0,4466	0,0435	0,1465	0,2592



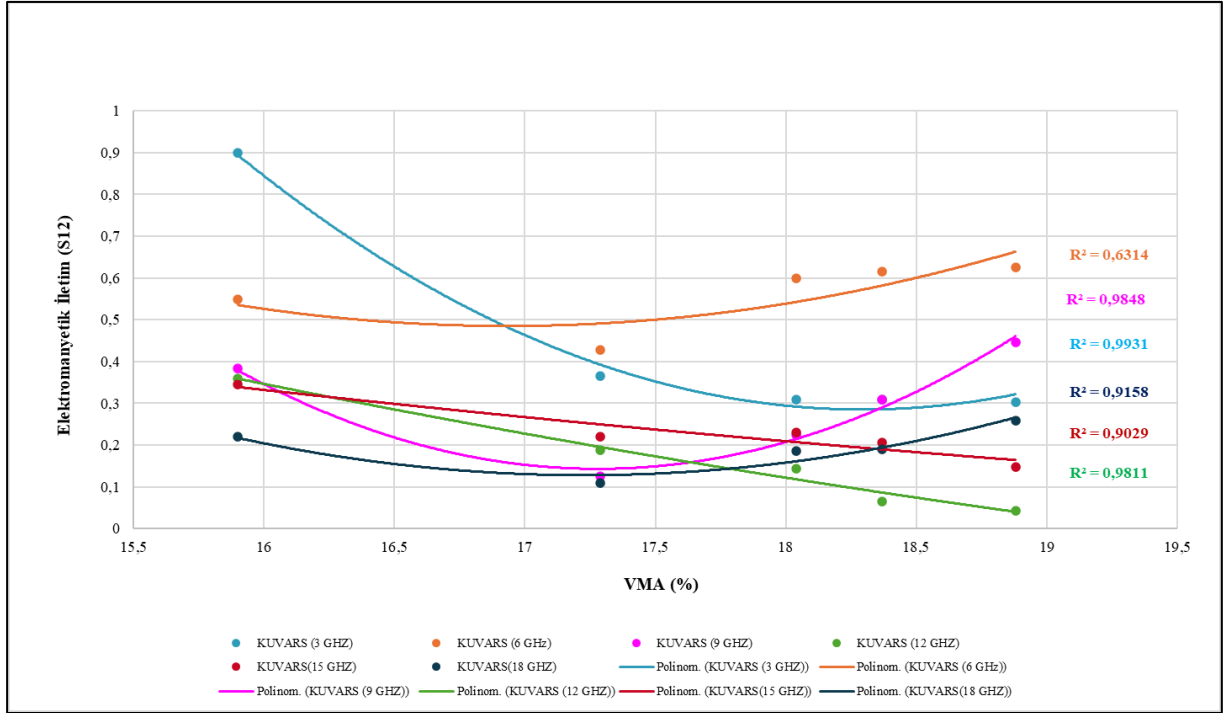
Şekil 4.44. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin VFA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

VMA ile elektromanyetik iletim

VMA (Voids in Mineral Aggregate) mineral agregalar arası boşluk oranı olarak tanımlanmaktadır. Yukarıdaki ilişkilerde olduğu gibi, burada da kuvars için elde edilen VMA ile elektromanyetik iletim eğrilerine bakıldığında, genel olarak, VMA arttıkça, 6, 9 ve 18 GHz için iletimin %17,29 VMA değerine kadar azaldığı, bu değerden sonra ise %18,88 VMA değerine kadar arttığı, 3, 15 ve 12 GHz için ise sürekli ve belirgin şekilde azaldığı görülmektedir. İlişki düzeylerine bakıldığında 6, 9 ve 18 GHz için “Orta-Çok Yüksek” ($R^2=0,63-0,98$), 3, 15 ve 12 GHz için ise “Çok Yüksek” ($R^2=0,90-0,99$) düzeyde olduğu görülmektedir. Dolayısıyla, her iki ilişki durumunun geçerli olabileceği değerlendirilmesi yapılmıştır. Yukarıda da belirtildiği gibi, çelişkili gibi görünen bu durum, çok sert yapıdaki Kuvars tanelerinin kenar zonları boyunca değişik derecede çatlaklı bir yapı kazanmış olması ve bu çatlaklı zonların farklı oranlarda asfaltın emilmesine neden olması sonucu asfalt betonunun farklı davranması ile açıklanabilir. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3-6 GHz arası) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşük çıkmaktadır. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile hem düşük hem de yüksek VMA değerlerinde belirgin olarak görülebilmektedir. VMA arttıkça elektromanyetik iletimin düşmesi ve düşük frekanslarda elektromanyetik iletimin daha yüksek olması, düşük frekanslarda akımın daha laminer (düzenli) olması ve artan VMA (düşen VFA, artan hava içeriği) ile boşlukların daha az asfalt ile dolması sonucu azalan binder film kalınlığı ve bunun sonucunda da olumsuz etkilenen yani azalan tane tutunmasının (yapışma) iletimi olumsuz etkilemesi (zorlaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.35) (Şekil 4.45).

Tablo 4.35. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin VMA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

		3 GHz	6 GHz	9 GHz	12 GHz	15 GHz	18 GHz
Kuvars Oranı	VMA (%)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)
%0	15,9	0,9001	0,5479	0,3829	0,36	0,3446	0,2204
%25	17,29	0,3659	0,4270	0,1244	0,1868	0,2204	0,1094
%50	18,04	0,3079	0,5982	0,2241	0,1433	0,2305	0,1859
%75	18,37	0,3089	0,6144	0,30893	0,0644	0,2061	0,1906
%100	18,88	0,3028	0,6259	0,4466	0,0435	0,1465	0,2592



Şekil 4.45. Kuvars içeren asfalt beton numunelerinin VMA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

4.6.5. Ferrokrom içeren asfalt betonlarının Marshall ile elektromanyetik iletim verilerinin değerlendirilmesi

Ferrokrom içeren numuneler için yapılan Marshall deneyinden ve elektromanyetik iletim ölçümünden elde edilen sonuçlar hatırlatılacak olursa;

Ferrokrom kullanılarak (%0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında) hazırlanan asfalt karışımlarda ise ferrokrom oranı arttıkça, MS, VMA, VFA ve özgül ağırlık değerlerinin arttığı, akma değerleri ve hava içeriğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Analizler sonucunda ferrokrom içeriği %50 olan asfalt karışımının binder tabakası tasarım limitlerini karşıladığı görülmüştür. Ayrıca ferrokrom agregasının mekanik ve fiziksel özelliklerinin asfalt beton üretiminde kullanılan agregaların şartname limitlerini sağladığı ortaya çıkmıştır.

Genel olarak frekans şiddeti arttıkça elektromanyetik iletim, tüm numuneler için düşme eğilimi göstermiştir. Ancak analiz edilen karışımların iletim büyüklükleri incelendiğinde %75 oranında ferrokrom içeren numune yaklaşık 3-16 GHz frekans aralığı boyunca diğer karışımlara göre en yüksek performansı göstermiştir. Yaklaşık 4-6,5 GHz frekans aralığında

elektromanyetik iletimin %100 olduğu maksimum değerini vermiştir. %100 oranında ferrokrom içeren karışım ise en iyi iletim performansı gösteren ikinci numune olmuştur ve yaklaşık 16-18 GHz frekans aralığında iletim büyüklüğü artarak en yüksek değerine ulaşmıştır (%50). Elektromanyetik iletim ile ilgili yapılan bazı çalışmalarda elektromanyetik dalgaların geçirgenliği; malzemelerin içerikleri, yoğunluğu, gözenekliliği, sıcaklık ve fiziksel oluşumlarına bağlı olduğu ifade edilmektedir (Olhoeft, 1981; Yalın, 2018).

Çalışmanın bu kısmında ise ferrokrom kullanılarak üretilen asfalt betonlarının Marshall deneyinden elde edilen verilerin elektromanyetik iletim miktarı ile ilişkileri açıklanarak yorumlanmıştır (Tablo 4.36.).

Tablo 4.36. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin Marshall deney sonuçları ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Ferrokrom Oranı	zgl Ağırlık (g/cm³)	Hava İçeriği (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kg)
%0	2,32	6,31	13,23	52,36	3,46	744
%25	2,38	6,31	28,9	78,19	3,44	733
%50	2,45	4,93	38,95	87,35	3,23	802
%75	2,52	4,28	46,28	90,76	2,66	741
%100	2,6	3,33	51,55	90,39	2,75	810
Ferrokrom Oranı	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	0,3666	0,7328	0,5122	0,4211	0,2932	0,1697
%25	0,4314	0,7356	0,5681	0,3557	0,1953	0,1792
%50	0,3978	0,7923	0,4886	0,3533	0,2291	0,0665
%75	0,5481	0,9256	0,6485	0,5005	0,3958	0,2829
%100	0,5374	0,8423	0,5641	0,4894	0,3421	0,3357

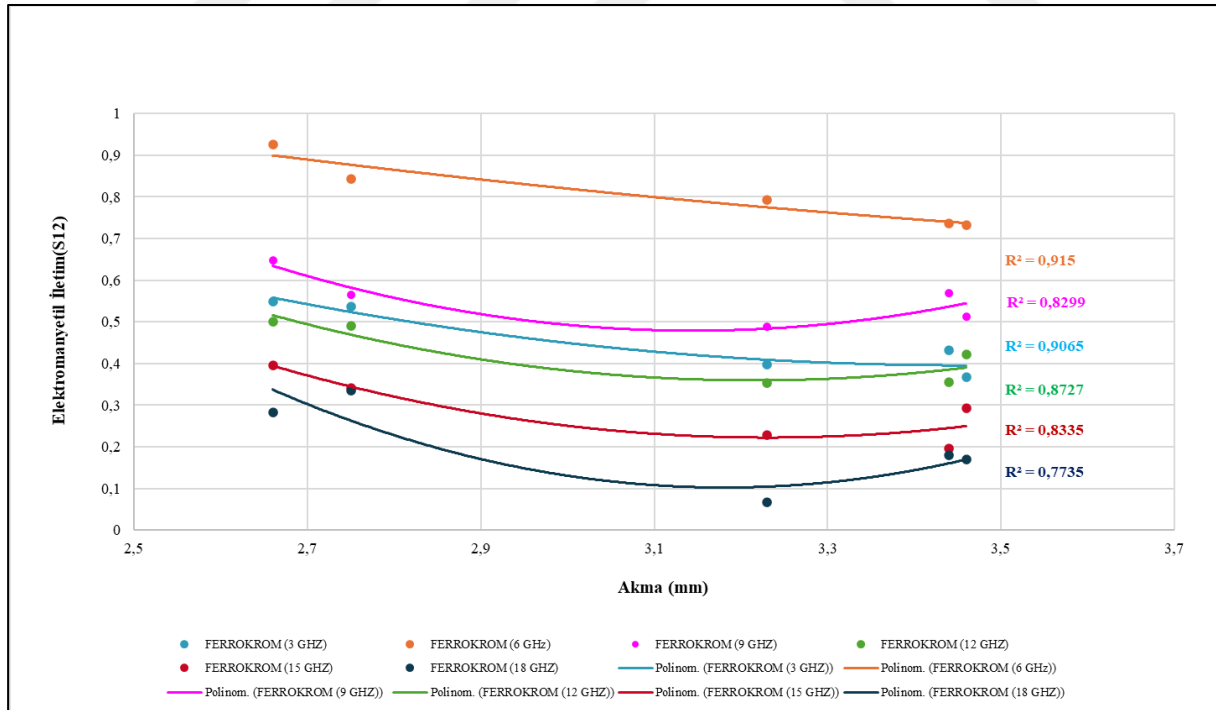
Akma ile elektromanyetik iletim

Ferrokrom için, akma ile elektromanyetik iletim arasında “Yüksek-ok Yüksek” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,77-0,91$). Akma arttıkça elektromanyetik iletim azalmaktadır. Ayrıca, düşük frekanslarda (rneğin 3-9 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek

frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile hem düşük hem de yüksek akma değerlerinde belirgindir. Akma arttıkça elektromanyetik iletim değerlerinin azalması ve düşük frekanslarda elektromanyetik iletimin daha yüksek olması, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan akma ile bozulan dokunun iletimi olumsuz etkilemesi ile açıklanabilir (Tablo 4.37) (Şekil 4.46).

Tablo 4.37. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin akma ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

		3 GHz	6 GHz	9 GHz	12 GHz	15 GHz	18 GHz
Ferrokrom Oranı	Akma (mm)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)
%0	3,46	0,3666	0,7328	0,5122	0,4211	0,2932	0,1697
%25	3,44	0,4314	0,7356	0,5681	0,3557	0,1953	0,1792
%50	3,23	0,3978	0,7923	0,4886	0,3533	0,2291	0,0665
%75	2,66	0,5481	0,9256	0,6485	0,5005	0,3958	0,2829
%100	2,75	0,5374	0,8423	0,5641	0,4894	0,3421	0,3357



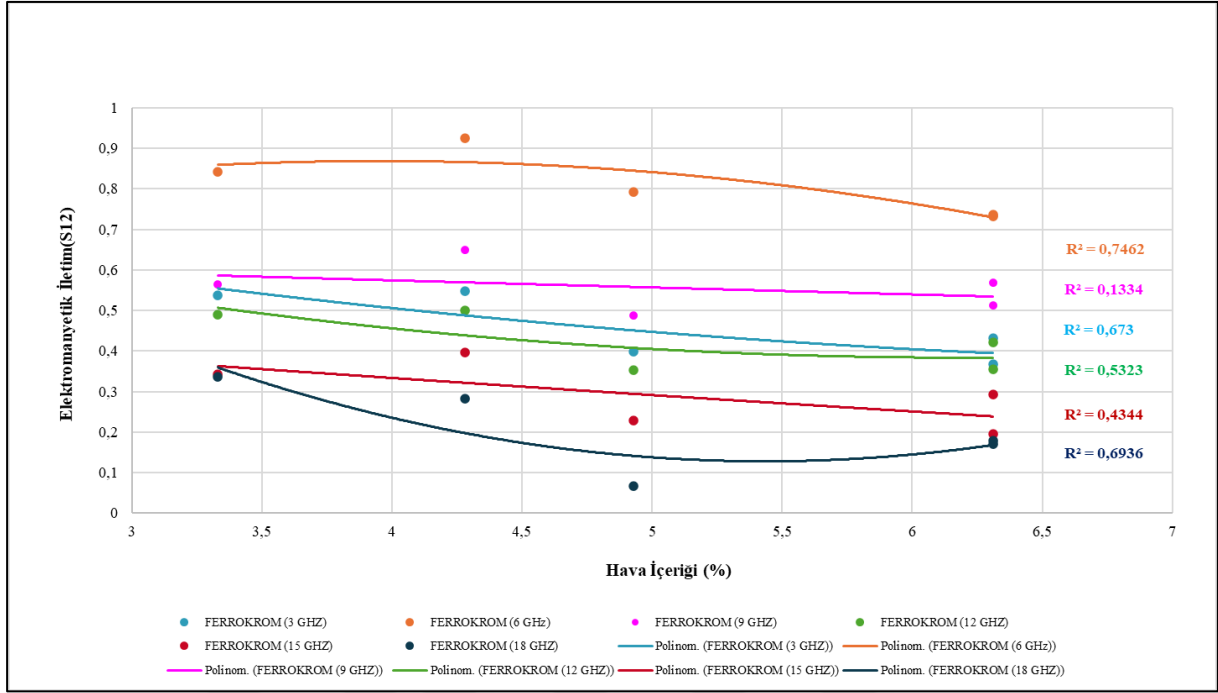
Şekil 4.46. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin akma ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Hava içeriği ile elektromanyetik iletim

Genel olarak, ferrokrom için, hava içeriği ile elektromanyetik iletim arasında “Orta-Yüksek” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,43-0,75$). Hava içeriği arttıkça elektromanyetik iletim azalmaktadır. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 6-9 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile hem düşük hem de yüksek hava içeriği değerlerinde belirgindir. Hava içeriği arttıkça elektromanyetik iletim değerlerinin azalması ve düşük frekanslarda elektromanyetik iletimin daha yüksek olması, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan hava içeriği ile azalan tane temas oranının iletimi olumsuz etkilemesi ile açıklanabilir (Tablo 4.38) (Şekil 4.47).

Tablo 4.38. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Ferrokrom Oranı	Hava İçeriği (%)	3 GHz	6 GHz	9 GHz	12 GHz	15 GHz	18 GHz
		Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)
%0	6,31	0,3666	0,7328	0,5122	0,4211	0,2932	0,1697
%25	6,31	0,4314	0,7356	0,5681	0,3557	0,1953	0,1792
%50	4,93	0,3978	0,7923	0,4886	0,3533	0,2291	0,0665
%75	4,28	0,5481	0,9256	0,6485	0,5005	0,3958	0,2829
%100	3,33	0,5374	0,8423	0,5641	0,4894	0,3421	0,3357



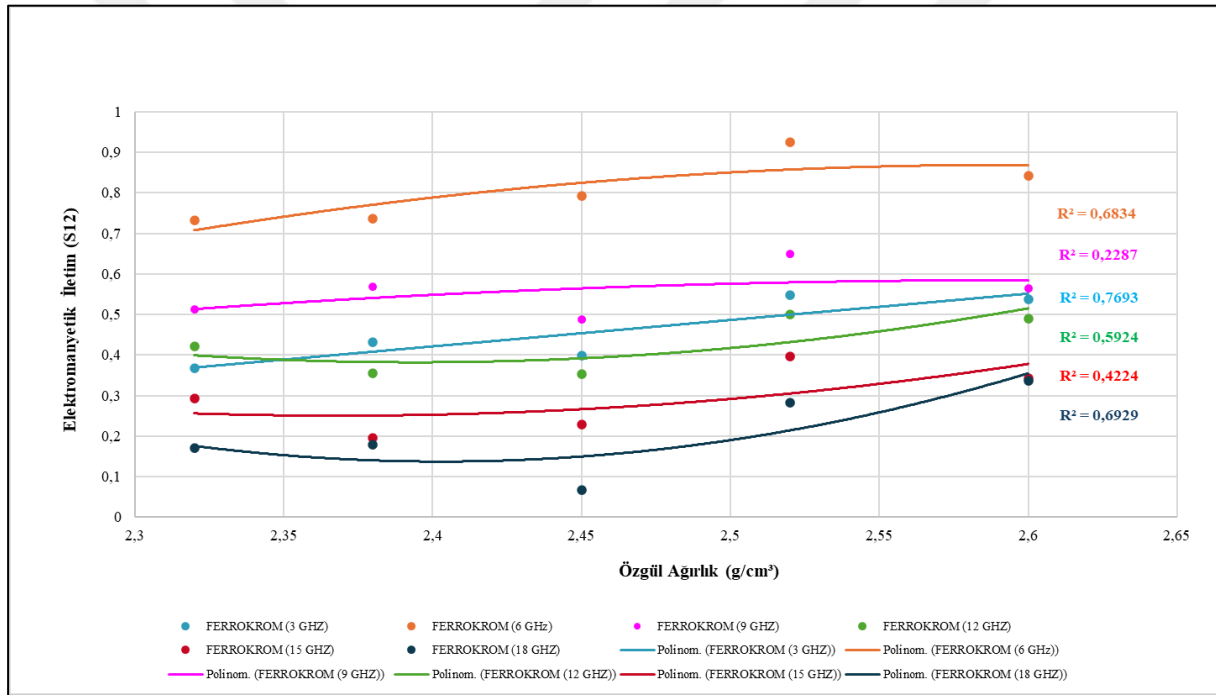
Şekil 4.47. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim

Özgül ağırlık arttıkça cismin yoğunluğu artmakta dolayısıyla içerisindeki katı tane bileşenlerin oranı artarken hava oranı azalmaktadır. Dolayısıyla, yukarıda hava içeriği için yapılan yorum özgül ağırlık içinde geçerlidir, ancak ters ilişki vardır. Genel olarak, ferrokrom için, özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim arasında “Orta-Yüksek” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,42-0,77$). Yani, özgül ağırlık arttıkça elektromanyetik iletim artmaktadır. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3-9 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile düşük özgül ağırlık (yani yüksek hava içeriği) değerlerinde daha belirgindir. Özgül ağırlık arttıkça elektromanyetik iletim değerlerinin artması ve düşük frekanslarda elektromanyetik iletimin daha yüksek olması, düşük frekanslarda akımın daha laminer (düzenli) olması ve artan özgül ağırlık (yani düşük hava içeriği) ile artan tane temas oranının iletimi olumlu etkilemesi (kolaylaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.39) (Şekil 4.48).

Tablo 4.39. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Ferrokrom Oranı	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	2,32	0,3666	0,7328	0,5122	0,4211	0,2932	0,1697
%25	2,38	0,4314	0,7356	0,5681	0,3557	0,1953	0,1792
%50	2,45	0,3978	0,7923	0,4886	0,3533	0,2291	0,0665
%75	2,52	0,5481	0,9256	0,6485	0,5005	0,3958	0,2829
%100	2,6	0,5374	0,8423	0,5641	0,4894	0,3421	0,3357



Şekil 4.48. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

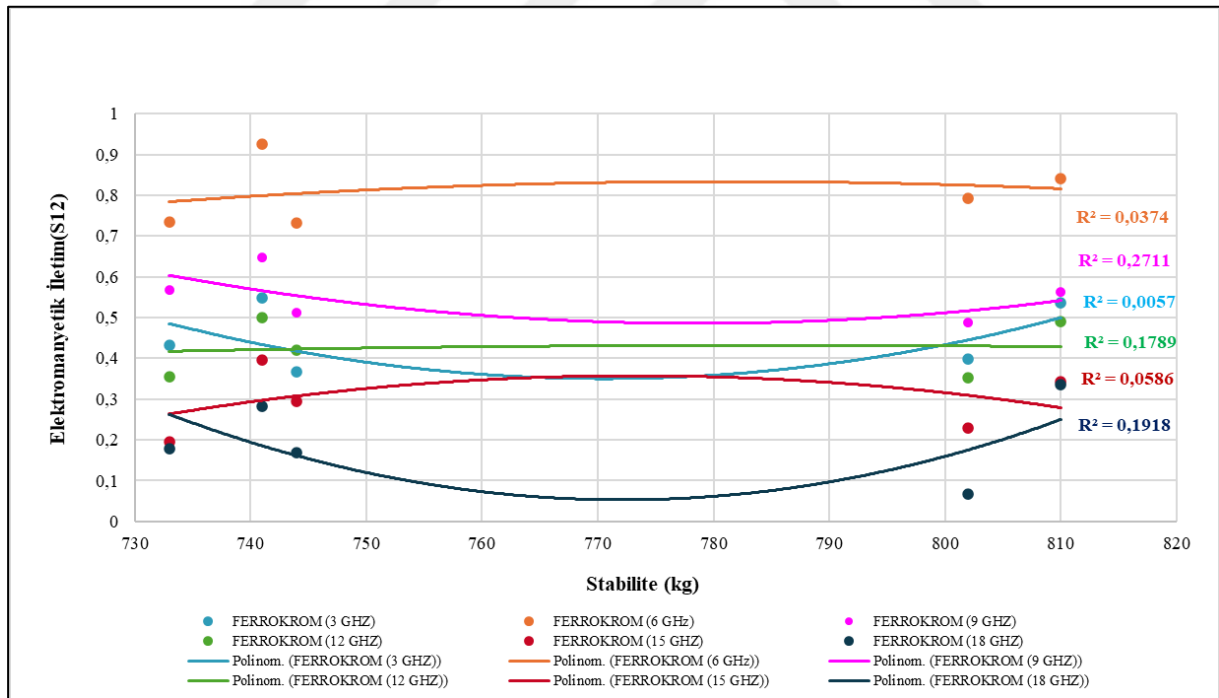
Stabilite ile elektromanyetik iletim

Genel olarak, ferrokrom için, stabilite ile elektromanyetik iletim arasında “Düşük-Çok Düşük” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,037-0,27$). Genel olarak stabilite arttıkça elektromanyetik iletim az da olsa artmaktadır. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 6-9 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile hem yüksek hem de düşük stabilite değerlerinde belirgin olarak

görülebilmektedir. Bu durum, düşük frekanslarda akımın daha laminer (düzenli) olması ve artan Stabilitate (yani yüksek özgül ağırlık, düşük hava içeriği) ile artan tane temas oranı, dolayısıyla artan tane kenetlenmesinin iletimi olumlu etkilemesi (kolaylaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.40 ve Şekil 4.49).

Tablo 4.40. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Ferrokrom Oranı	Stabilite (kg)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	744	0,3666	0,7328	0,5122	0,4211	0,2932	0,1697
%25	733	0,4314	0,7356	0,5681	0,3557	0,1953	0,1792
%50	802	0,3978	0,7923	0,4886	0,3533	0,2291	0,0665
%75	741	0,5481	0,9256	0,6485	0,5005	0,3958	0,2829
%100	810	0,5374	0,8423	0,5641	0,4894	0,3421	0,3357



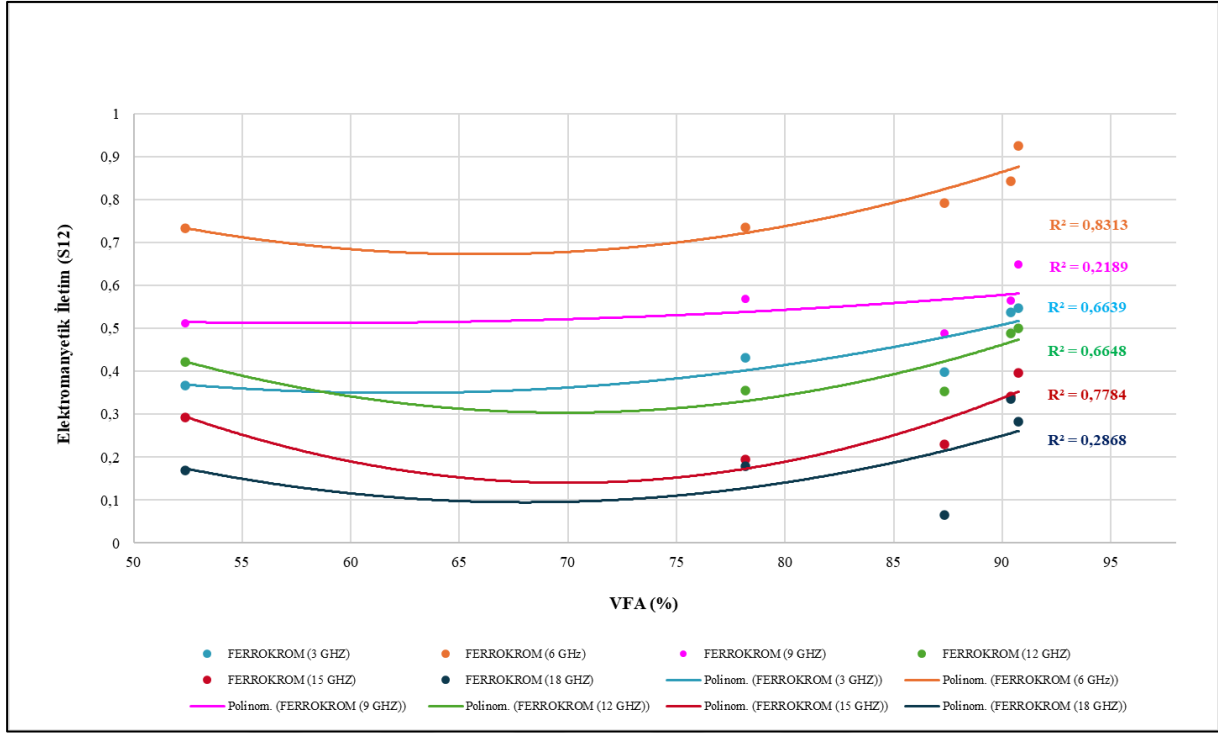
Şekil 4.49. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

VFA ile elektromanyetik iletim

VFA (Voids Filled with Asphalt) asfaltla dolu boşluk oranı olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak, ferrokrom için, VFA ile elektromanyetik iletim arasında “Orta-Yüksek” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,66-0,83$). Boşlukların dolması özgül ağırlığın artması anlamına gelmektedir. Dolayısıyla, burada da özgül ağırlık ilişkisine benzer şekilde, genel olarak VFA arttıkça elektromanyetik iletim artmaktadır. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3-9 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile hem yüksek hem de düşük VFA değerlerinde belirgin olarak görülebilmektedir. Bu durum, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan VFA yani boşlukların asfalt ile dolması (dolayısıyla özgül ağırlığın artarak, hava içeriğinin düşmesi) sonucu artan binder film kalınlığı ve bunun sonucunda da artan tane tutunmasının (yapışma) iletimi olumlu etkilemesi (kolaylaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.41 ve Şekil 4.50).

Tablo 4.41. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin VFA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Ferrokrom Oranı	VFA (%)	3 GHz	6 GHz	9 GHz	12 GHz	15 GHz	18 GHz
		Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)	Frekansta EM İletim (S12)
%0	52,36	0,3666	0,7328	0,5122	0,4211	0,2932	0,1697
%25	78,19	0,4314	0,7356	0,5681	0,3557	0,1953	0,1792
%50	87,35	0,3978	0,7923	0,4886	0,3533	0,2291	0,0665
%75	90,76	0,5481	0,9256	0,6485	0,5005	0,3958	0,2829
%100	90,39	0,5374	0,8423	0,5641	0,4894	0,3421	0,3357



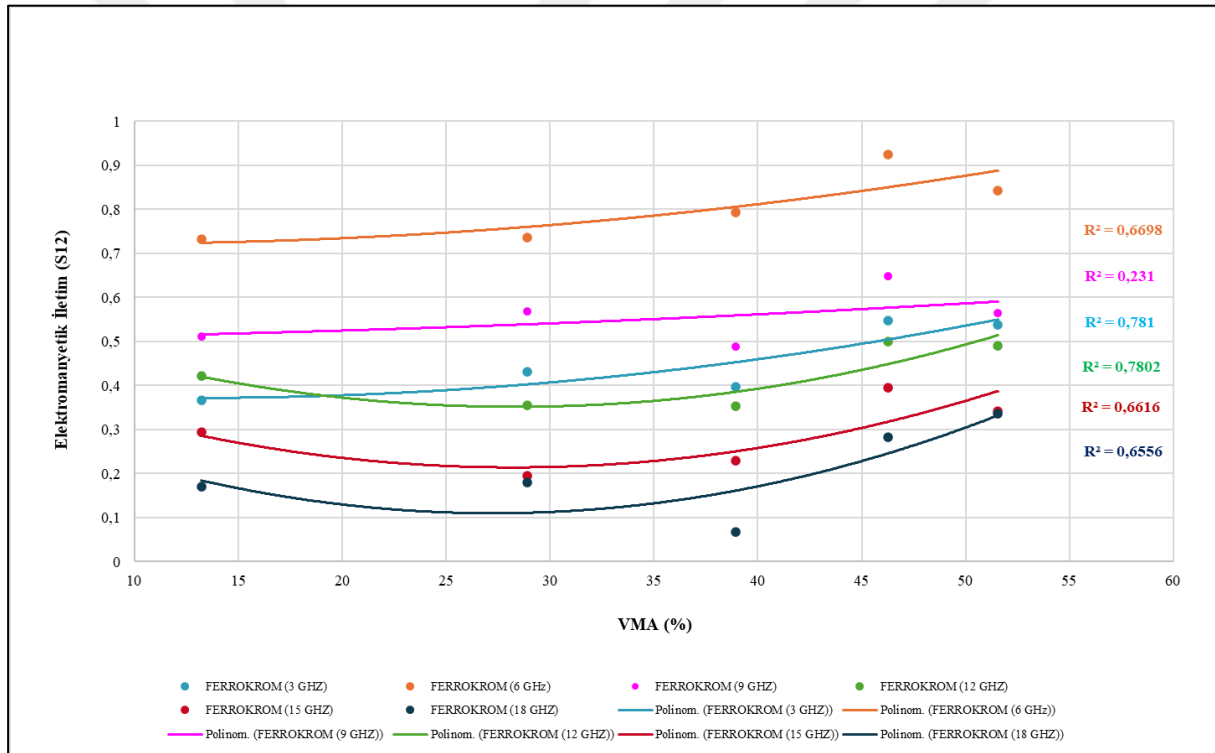
Şekil 4.50. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin VFA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

VMA ile elektromanyetik iletim

VMA (Voids in Mineral Aggregate) mineral agregalar arası boşluk oranı olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak, ferrokrom için, VMA ile elektromanyetik iletim arasında “Orta-Yüksek” düzeyde ilişki bulunmaktadır ($R^2=0,66-0,78$). Genelde, VMA arttıkça (yani VFA azaldıkça) elektromanyetik iletimin azalması beklenir. Ancak burada %30 VMA değerlerine kadar elektromanyetik iletim ihmal edilebilecek kadar küçük değişimler gösterirken, %30-40 arası düşmekte, ancak %40’tan sonra yükselmektedir. Bu durum, Mikromorfolojik Analiz bölümünde de görüldüğü gibi, vesiküler (boşluklu) yapıdaki ferrokrom taneleri arasındaki boşlukların asfalt ile doldurulabilmesine rağmen, ferrokrom tanelerinin iç kenar bölgelerinde yoğun olarak bulunan bağlantısız veya kısmen bağlantılı vesiküler boşlukların efektif bir şekilde tam olarak doldurulamaması, dolayısıyla da iletimin düzensizleşmesi ile açıklanabilir. Ayrıca, diğer katkı malzemelerinde olduğu gibi, burada da düşük frekanslarda (örneğin 6-9 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile düşük VMA değerlerinde daha belirgindir (Tablo 4.42. ve Şekil 4.51.).

Tablo 4.42. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin VMA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Ferrokrom Oranı	VMA (%)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	13,23	0,3666	0,7328	0,5122	0,4211	0,2932	0,1697
%25	28,9	0,4314	0,7356	0,5681	0,3557	0,1953	0,1792
%50	38,95	0,3978	0,7923	0,4886	0,3533	0,2291	0,0665
%75	46,28	0,5481	0,9256	0,6485	0,5005	0,3958	0,2829
%100	51,55	0,5374	0,8423	0,5641	0,4894	0,3421	0,3357



Şekil 4.51. Ferrokrom içeren asfalt beton numunelerinin VMA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

4.6.6. Çelik cürufu içeren asfalt betonlarının Marshall ile elektromanyetik iletim verilerinin değerlendirilmesi

Çelik cürufu içeren numuneler için yapılan Marshall deneyinden ve elektromanyetik iletim ölçümünden elde edilen sonuçlar hatırlatılacak olursa;

Çelik cürufu agregası (toplam agreganın %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında) kullanılarak hazırlanan asfalt karışımlarda cüruf oranı arttıkça, VMA, VFA, MS, hava içeriği ve özgül ağırlık değerlerinin arttığı, akma değerlerinin azaldığı ortaya çıkmıştır. Literatüre bakıldığında çelik cürufunun; sertlik, su emme, özgül ağırlık, gözeneklilik ve köşelilik gibi fiziksel ve mekanik yapısı sebebiyle asfalt karışımlarda yüksek oranlarda kullanılmaması önerilmektedir (%60 oranında). Tez çalışması kapsamında yapılan analizlerde ise çelik cürufu oranı %25 olan karışım en yüksek performansı göstermiş ve şartname limitlerinin sağlamıştır.

Genel olarak frekans şiddeti arttıkça elektromanyetik iletim, tüm numuneler için düşme eğilimi göstermiştir. Ancak %25 çelik cürufu içeren karışım yaklaşık 4 GHz frekans noktasında en yüksek iletim değerini göstermiştir (%100). Ayrıca %75 oranında cüruf içeren karışım da aynı frekans noktasında iletim değeri yaklaşık %95 çıkmıştır. Çelik cürufunun serbest MgO, CaO ve yüksek miktarda demir oksit gibi aktif minerallerden oluşması (Jiao ve diğ., 1988; Wang ve diğ., 2017; Barala ve diğ., 2022), özgül yüzey alanının (1,96 m²/g) kireç taşına (1,43 m²/g) (Li ve diğ., 2018; Wang ve diğ., 2023) göre yüksek olması sebebiyle karışımdaki çelik cürufu oranı arttıkça cürufun karışım içerisindeki dağılımı artmış ve asfalt betonunun elektromanyetik dalgaların karşı tarafa iletiminin azalmasına neden olabileceği sonucuna varılmıştır. Daha önceki yapılan çalışmalarda da çelik cürufunun elektromanyetik iletim ile ilgili benzer sonuçlar vermesi, elde edilen verileri destekler nitelikte olmuştur (Sun ve diğ., 2011; Hong ve diğ., 2020; Santillan ve diğ., 2022; Huang ve diğ., 2023).

Çalışmanın bu kısmında ise çelik cürufu kullanılarak üretilen asfalt betonlarının Marshall deneyinden elde edilen verilerin Elektromanyetik iletim miktarı ile ilişkileri açıklanarak yorumlanmıştır (Tablo 4.43).

Tablo 4.43. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin Marshall deney sonuçları ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

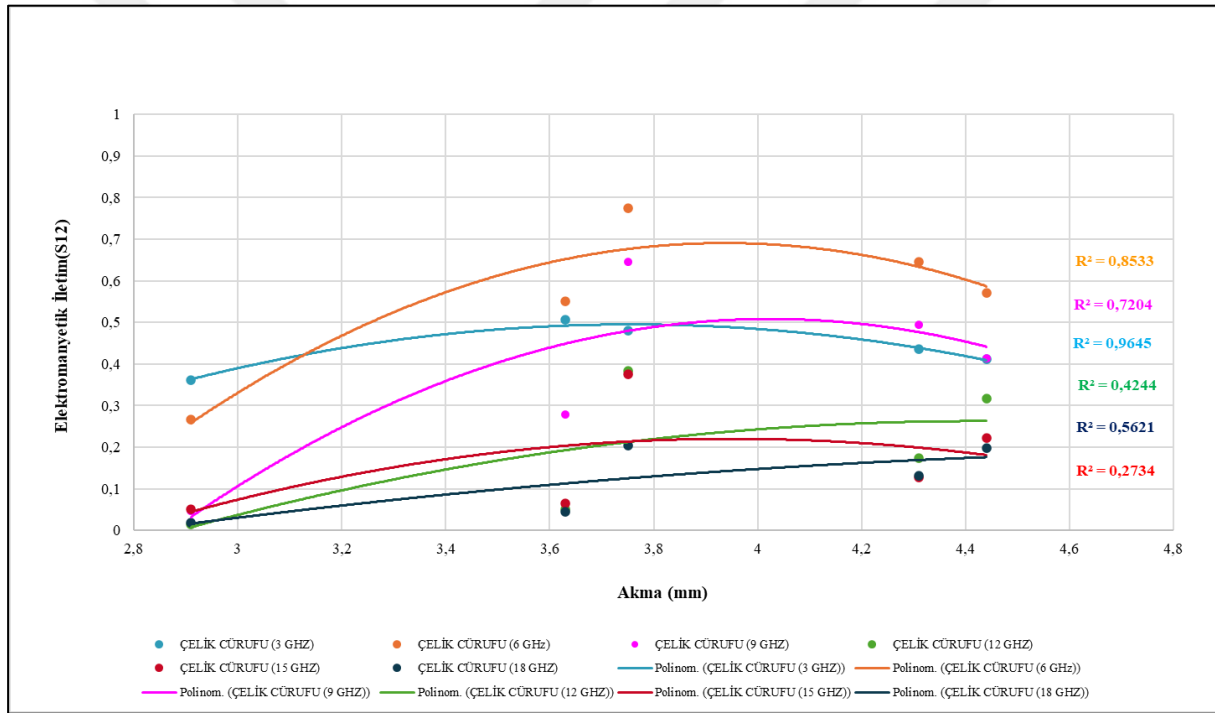
Çelik Cürufu Oranı	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Hava İçeriği (%)	VMA (%)	VFA (%)	Akma (mm)	Stabilite (kg)
%0	2,41	0,32	9,92	96,78	3,75	875
%25	2,46	3,82	26,45	85,6	4,31	816
%50	2,56	5,06	36,2	86,02	4,44	976
%75	2,62	7,71	44,05	82,55	3,63	998,5
%100	2,74	7,84	48,9	84,09	2,91	1156
Çelik Cürufu Oranı	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	0,4803	0,775	0,645	0,3825	0,3752	0,2045
%25	0,4365	0,6446	0,4946	0,1734	0,1278	0,1318
%50	0,4119	0,5706	0,4144	0,3161	0,2223	0,1979
%75	0,5073	0,5506	0,2786	0,0509	0,0648	0,0451
%100	0,3621	0,2667	0,0464	0,0135	0,0512	0,0192

Akma ile elektromanyetik iletim

Genel olarak akma arttıkça elektromanyetik iletim, çelik cürufu oranı %50 oranındaki içeriğine kadar akma değerlerinde 4,4 mm'ye kadar artış göstermiş sonrasında ise düşüş meydana gelmiştir. Bu duruma paralel olarak elektromanyetik iletim değerleri azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3 ve 6 GHz) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşük çıkmaktadır. İlişki düzeyi, düşük frekanslarda (örneğin 3 ve 6 GHz) “Yüksek-Çok Yüksek” ($R^2=0,72-0,96$), yüksek frekanslarda (örneğin 12 ve 18 GHz) “Düşük-Orta” ($R^2=0,27-0,56$) düzeydedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile hem düşük hem de yüksek akma değerlerinde belirgin olarak görülebilmektedir. Elektromanyetik iletimin 4,4 mm akma değerlerine kadar bir miktar artması, düşük frekanslarda akımın daha laminer (düzenli) olması ve henüz kısmen artmış olan akma ile dokunun iletimi olumsuz etkileyecek kadar bozulmamış, hatta Mikromorfolojik Analiz bölümünde de görüldüğü gibi, levhamsı yapıdaki çelik cürufu taneleri arasındaki bazı hava boşluklarının doldurulması sonucu iletimin olumlu etkilemesi (kolaylaşması), daha fazla akma ile ise dokunun bozulmasının ilerleyerek iletimi olumsuz etkilemesi ile açıklanabilir (Tablo 4.44 ve Şekil 4.52).

Tablo 4.44. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin akma ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Çelik Cürufu Oranı	Akma (mm)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	3,75	0,4803	0,775	0,645	0,3825	0,3752	0,2045
%25	4,31	0,4365	0,6446	0,4946	0,1734	0,1278	0,1318
%50	4,44	0,4119	0,5706	0,4144	0,3161	0,2223	0,1979
%75	3,63	0,5073	0,5506	0,2786	0,0509	0,0648	0,0451
%100	2,91	0,3621	0,2667	0,0464	0,0135	0,0512	0,0192



Şekil 4.52. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin akma ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

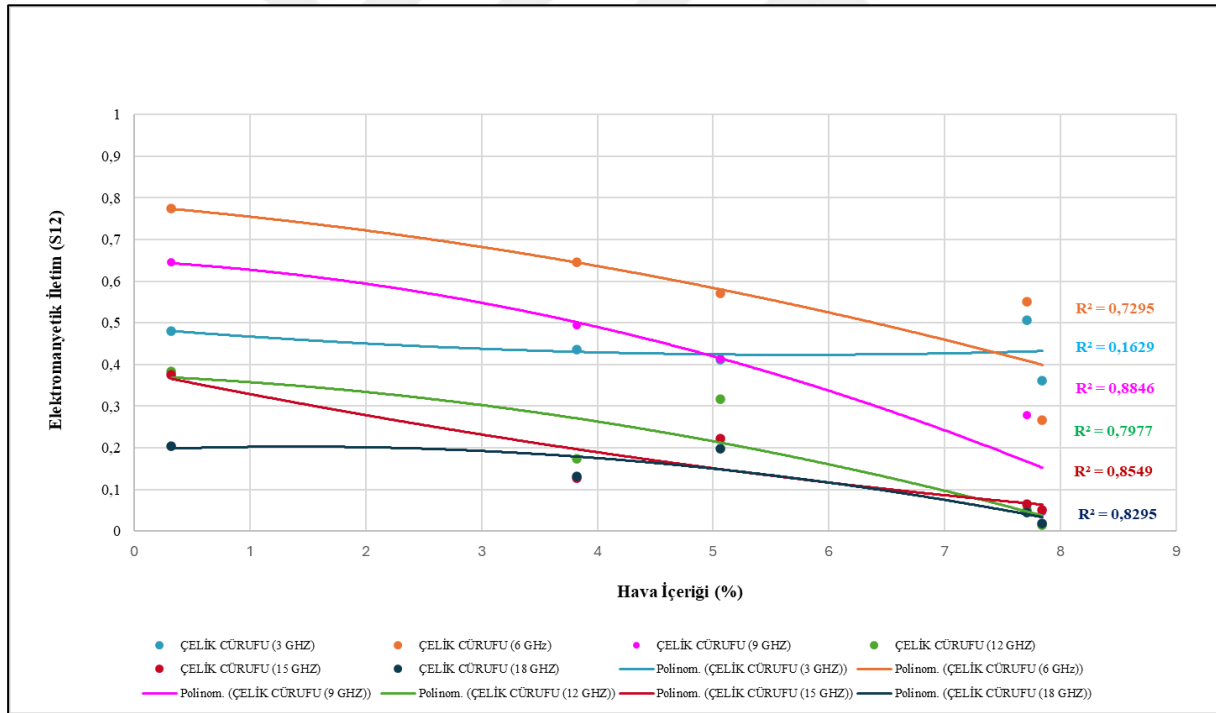
Hava içeriği ile elektromanyetik iletim

Genel olarak hava içeriği arttıkça elektromanyetik iletim azalmaktadır. İlişki seviyesi “Yüksek” ($R^2=0,72-0,88$) düzeydedir. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3-9 GHz arası) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu durum, yüksek düşme oranları ile hem düşük hem de yüksek akma değerlerinde belirgin olarak görülebilmektedir. Elektromanyetik iletimin azalması, düşük frekanslarda akımın daha

laminer (düzenli) olması ve artan hava içeriği ile azalan tane temas oranının iletimi olumsuz etkilemesi ile açıklanabilir (Tablo 4.45 ve Şekil 4.53).

Tablo 4.45. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Çelik Cürufu Oranı	Hava İçeriği (%)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	0,32	0,4803	0,775	0,645	0,3825	0,3752	0,2045
%25	3,82	0,4365	0,6446	0,4946	0,1734	0,1278	0,1318
%50	5,06	0,4119	0,5706	0,4144	0,3161	0,2223	0,1979
%75	7,71	0,5073	0,5506	0,2786	0,0509	0,0648	0,0451
%100	7,84	0,3621	0,2667	0,0464	0,0135	0,0512	0,0192



Şekil 4.53. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin hava içeriği ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

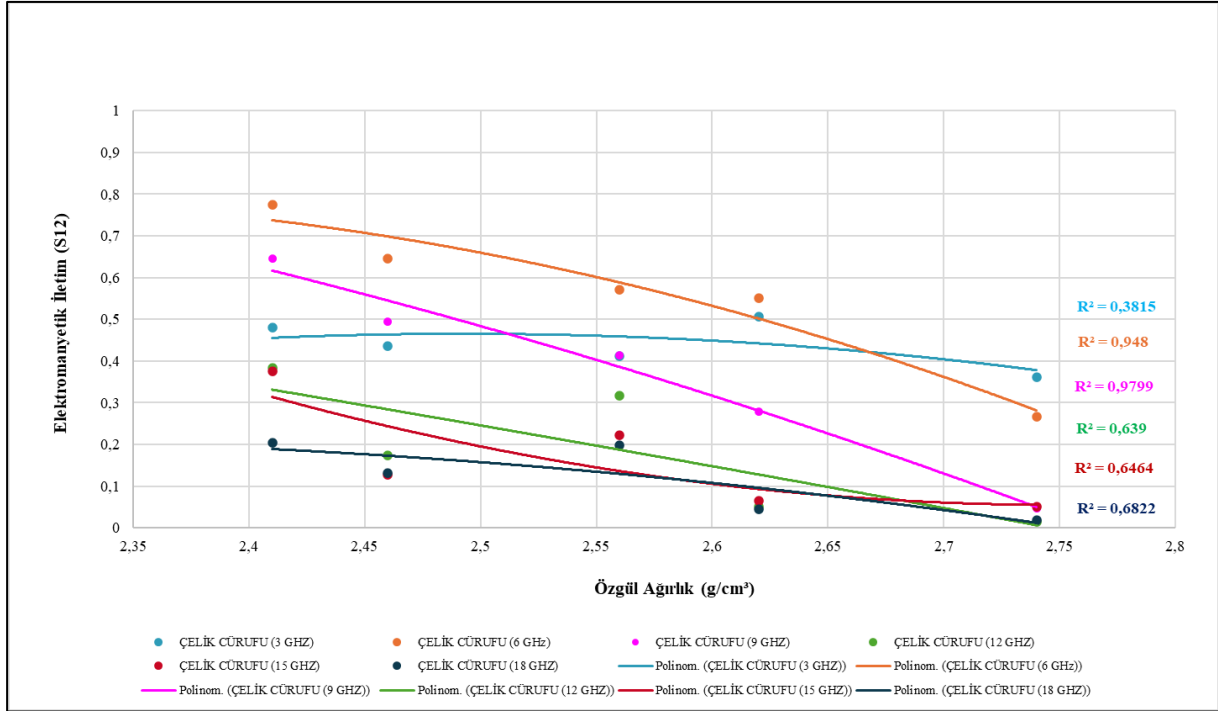
Özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim

Özgül ağırlık arttıkça cismin yoğunluğu artmakta dolayısıyla içerisindeki katı tane bileşenlerin oranı artarken hava oranı azalmaktadır. Dolayısıyla, özgül ağırlık arttıkça elektromanyetik

iletimin artması beklenmektedir. Ancak, her ne kadar düşük frekanslarda (örneğin 3 GHz) elektromanyetik iletim değerlerinde ihmal edilebilecek derecede bir düşüş görülse de ($R^2=0,38$), ilişkiler genel olarak değerlendirildiğinde, özgül ağırlık arttıkça elektromanyetik iletim azalmaktadır. İlişki düzeyi, düşük frekanslarda (örneğin 6 ve 9 GHz) “Çok Yüksek” ($R^2=0,94-0,98$), yüksek frekanslarda (örneğin 12 ve 18 GHz) “Orta” ($R^2=0,27-0,56$) düzeydedir. Bu durum, her ne kadar taneler arası hava içeriğinin azalması ile özgül ağırlığın artıyor olmasına rağmen, Mikromorfolojik Analiz bölümünde de görüldüğü gibi, çatal şeklinde levhamsı yapıdaki çelik cürufu taneleri arasındaki bazı hava boşluklarının tam olarak doldurulamaması, dolayısıyla da iletimin olumsuz etkilemesi (zorlaşması) ile açıklanabilir (Tablo 4.46 ve Şekil 4.54).

Tablo 4.46. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Çelik Cürufu Oranı	Özgül Ağırlık (g/cm ³)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	2,41	0,4803	0,775	0,645	0,3825	0,3752	0,2045
%25	2,46	0,4365	0,6446	0,4946	0,1734	0,1278	0,1318
%50	2,56	0,4119	0,5706	0,4144	0,3161	0,2223	0,1979
%75	2,62	0,5073	0,5506	0,2786	0,0509	0,0648	0,0451
%100	2,74	0,3621	0,2667	0,0464	0,0135	0,0512	0,0192



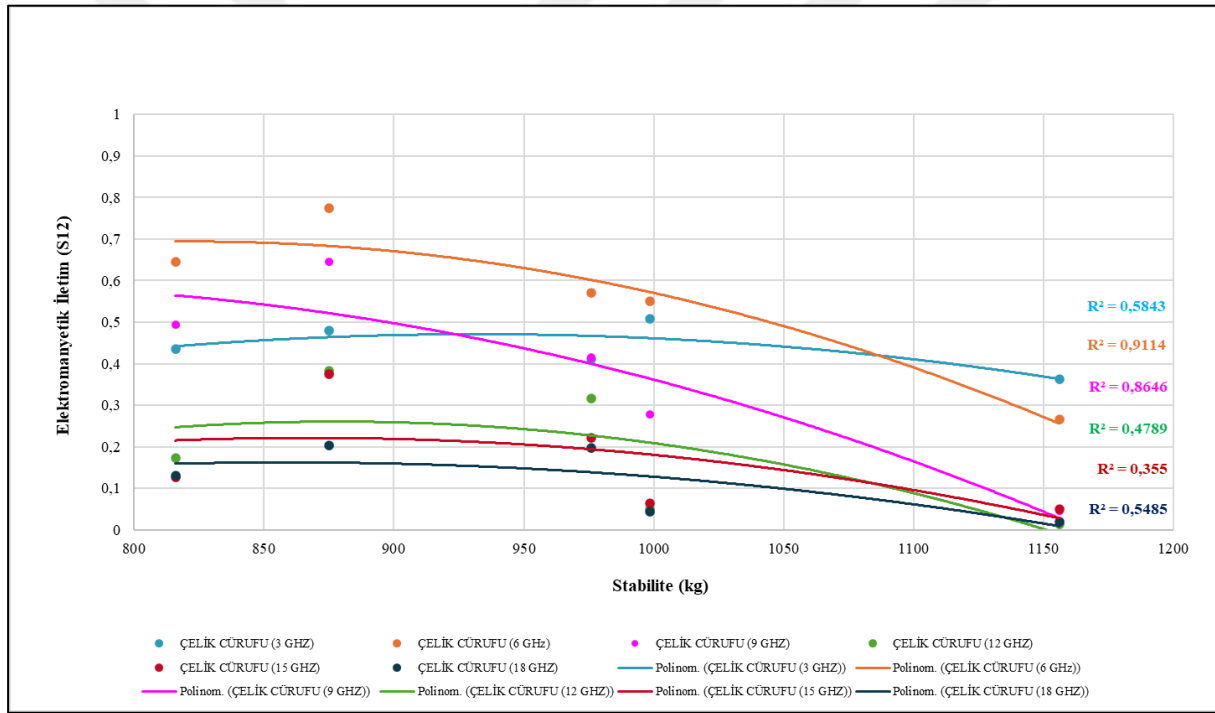
Şekil 4.54. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin özgül ağırlık ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Stabilite ile elektromanyetik iletim

Genel olarak yapılan değerlendirmelere bakıldığında stabilite arttıkça elektromanyetik iletimin artması beklenmektedir. Ancak, her ne kadar düşük frekanslarda (örneğin 3 GHz) elektromanyetik iletim değerlerinde, stabilitenin artmasıyla ihmal edilebilecek derecede bir düşüş gözükse de ilişkiler genel olarak değerlendirildiğinde, stabilite arttıkça elektromanyetik iletim azalmaktadır. İlişki düzeyi, düşük frekanslarda, (örneğin 3 GHz) “Orta” ($R^2=0,58$), 6 ve 9 GHz) “Yüksek-Çok Yüksek” ($R^2=0,86-0,91$), yüksek frekanslarda ise (örneğin 12 ve 18 GHz) “Düşük-Orta” ($R^2=0,36-0,55$) düzeydedir. Bu durum, her ne kadar taneler arası hava içeriğinin azalması, özgül ağırlığın artması ve stabilitenin artıyor olmasına rağmen, Mikromorfolojik Analiz bölümünde de görüldüğü gibi, çatal şeklinde levhamsı yapıdaki çelik cürufu taneleri arasındaki, küçükte olsa bazı hava boşluklarının tam olarak doldurulamaması, dolayısıyla da iletimin olumsuz etkilemesi (zorlaşması) ile açıklanabilir (Tablo 4.47 ve Şekil 4.55).

Tablo 4.47. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Çelik Cürufu Oranı	Stabilite (kg)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	875	0,4803	0,775	0,645	0,3825	0,3752	0,2045
%25	816	0,4365	0,6446	0,4946	0,1734	0,1278	0,1318
%50	976	0,4119	0,5706	0,4144	0,3161	0,2223	0,1979
%75	998,5	0,5073	0,5506	0,2786	0,0509	0,0648	0,0451
%100	1156	0,3621	0,2667	0,0464	0,0135	0,0512	0,0192



Şekil 4.55. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin stabilite ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

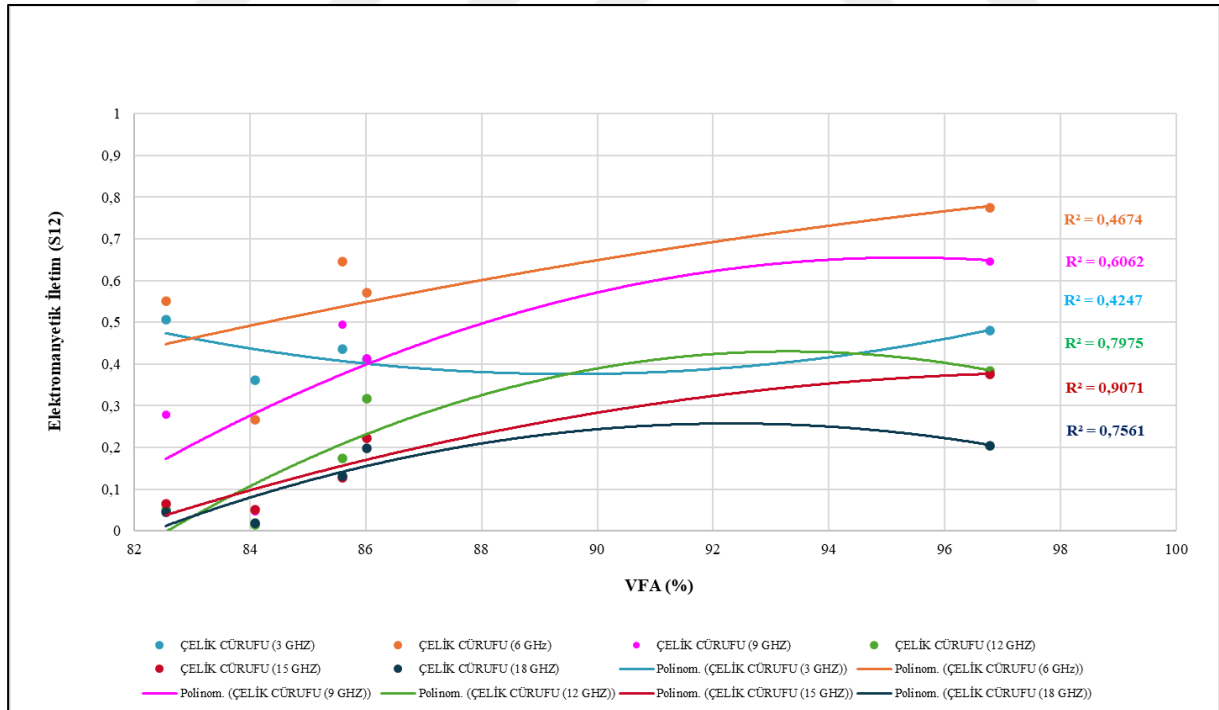
VFA ile elektromanyetik iletim

VFA (Voids Filled with Asphalt) asfaltla dolu boşluk oranı olarak tanımlanmaktadır. Genel olarak VFA arttıkça elektromanyetik iletim artmaktadır. İlişki düzeyi, düşük frekanslarda (örneğin 3-9 GHz) “Orta” ($R^2=0,42-0,61$), yüksek frekanslarda (örneğin 12-18 GHz) “Yüksek-Çok Yüksek” ($R^2=0,76-0,91$) düzeydedir. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3-9 GHz arası) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir.

Bu durum, yüksek düşme oranları ile hem düşük hem de yüksek VFA değerlerinde belirgin olarak görülebilmektedir. Bu durum, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan VFA yani boşlukların asfalt ile dolması sonucu artan binder film kalınlığı ve bunun sonucunda da artan tane tutunmasının (yapışma) iletimi olumlu etkilemesi (kolaylaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.48 ve Şekil 4.56).

Tablo 4.48. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin VFA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Çelik Cürufu Oranı	VFA (%)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	96,78	0,4803	0,775	0,645	0,3825	0,3752	0,2045
%25	85,6	0,4365	0,6446	0,4946	0,1734	0,1278	0,1318
%50	86,02	0,4119	0,5706	0,4144	0,3161	0,2223	0,1979
%75	82,55	0,5073	0,5506	0,2786	0,0509	0,0648	0,0451
%100	84,09	0,3621	0,2667	0,0464	0,0135	0,0512	0,0192



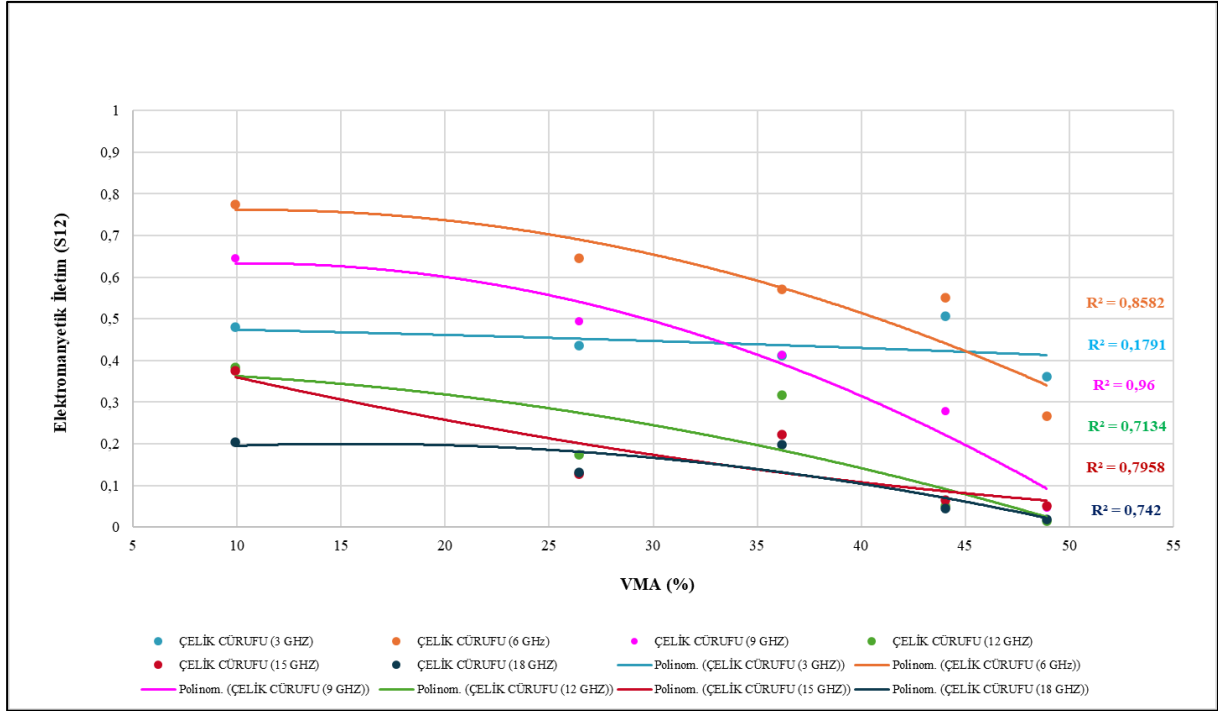
Şekil 4.56. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin VFA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

VMA ile elektromanyetik iletim

VMA (Voids in Mineral Aggregate) mineral agregalar arası boşluk oranı olarak tanımlanmaktadır. İlişki düzeyi, düşük frekanslarda (örneğin 6-9 GHz) “Yüksek-Çok Yüksek” ($R^2=0,86-0,96$), yüksek frekanslarda (örneğin 12-18 GHz) “Yüksek” ($R^2=0,71-0,80$) düzeydedir. Genel olarak VMA arttıkça elektromanyetik iletim azalmaktadır. Ayrıca, düşük frekanslarda (örneğin 3-9 GHz arası) elektromanyetik iletim daha yüksek olurken yüksek frekanslarda iletim değerleri düşmektedir. Bu ilişki, yüksek düşme oranları ile hem düşük hem de yüksek VMA değerlerinde belirgin olarak görülebilmektedir. Bu durum, düşük frekanslarda akımın daha laminar (düzenli) olması ve artan VMA (düşen VFA, artan hava içeriği) ile boşlukların daha az asfalt ile dolması sonucu azalan binder film kalınlığı ve bunun sonucunda da olumsuz etkilenen yani azalan tane tutunmasının (yapışma) iletimi olumsuz etkilemesi (zorlaştırması) ile açıklanabilir (Tablo 4.49 ve Şekil 4.57).

Tablo 4.49. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin VMA ve elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

Çelik Cürufu Oranı	VMA (%)	3 GHz Frekansta EM İletim (S12)	6 GHz Frekansta EM İletim (S12)	9 GHz Frekansta EM İletim (S12)	12 GHz Frekansta EM İletim (S12)	15 GHz Frekansta EM İletim (S12)	18 GHz Frekansta EM İletim (S12)
%0	9,92	0,4803	0,775	0,645	0,3825	0,3752	0,2045
%25	26,45	0,4365	0,6446	0,4946	0,1734	0,1278	0,1318
%50	36,2	0,4119	0,5706	0,4144	0,3161	0,2223	0,1979
%75	44,05	0,5073	0,5506	0,2786	0,0509	0,0648	0,0451
%100	48,9	0,3621	0,2667	0,0464	0,0135	0,0512	0,0192



Şekil 4.57. Çelik cürufu içeren asfalt beton numunelerinin VMA ile elektromanyetik iletim büyüklüğü sonuçları

İstatistiksel İlişki Düzeyleri (R^2) (Shober, 2018):

0,00-0,10 → Göz ardı edilebilir ilişki

0,10-0,39 →Düşük/zayıf/az ilişki

0,40-0,69 →Orta düzey ilişki

0,70-0,89 →Yüksek/güçlü/çok ilişki

0,90-1,00 → Çok yüksek düzeyde ilişki

5. SONUÇLAR

Yapılan doktora tez çalışmasında endüktif (kablosuz) elektrikli yol teknolojisinde kullanılmak üzere elektromanyetik dalgaların iletim özelliğini artırmak amacıyla asfalt karışım içerisine çeşitli oranlarda farklı katkı malzemeleri kullanılarak elde edilen karışımların mekanik, hacimsel ve elektromanyetik iletim özellikleri deneysel çalışmalarla araştırılmıştır. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

Mekanik ve Hacimsel Özellik Sonuçları;

- Binder tabakası için tespit edilen optimum bitüm yüzdesi % 5'tir.
- Grafit Tozu içeren numunelerin Marshall Stabilite analizi sonuçlarından elde edilen; özgül ağırlık, MS, akma, hava içeriği, VMA ve VFA değerleri incelendiğinde; MS, akma, VFA ve özgül ağırlık değerlerinde azalma, hava içeriği ve VMA değerlerinde ise artma meydana gelmiştir. Asfalt karışım içerisindeki grafit tozu miktarı arttıkça numunelerde efektif bağlayıcı miktarının azaldığı gözlemlenmiştir. Grafit tozunun özgül yüzeyinin geniş olması ve su emme kapasitesinin yüksek olması karışım içerisindeki efektif bağlayıcı miktarının azalmasına neden olduğu söylenebilir. Yapılan analizler sonucunda binder tabakası tasarımı için asfalt karışımlarda kullanılması gereken optimum grafit tozu oranı %25 (toplam karışımın %5 filler oranı içerisinde) olarak belirlenmiştir.
- Atık cam tozu içeren numunelerin özgül ağırlık, MS, akma, hava içeriği, VMA ve VFA değerleri incelendiğinde atık cam tozu oranı arttıkça, MS, VFA ve özgül ağırlık değerleri azalırken, hava içeriği, VMA ve akma değerlerinde artma meydana gelmiştir. Tüm değerler için bakıldığında ise %25 atık cam tozu içeren numune şartname limitleri içerisinde kalarak en yüksek performansı göstermiştir. Literatüre bakıldığında cam malzemesinin asfalt karışımlarda belirli bir oranda (toplam agrega ağırlığının en fazla %40 oranında) ve ince taneli olarak kullanılması önerilmektedir. Yapılan tez çalışmasında ise atık cam, toz formunda ve toplam karışımın %5 filler oranı içerisinde kullanılması karışımın mekanik ve hacimsel özelliklerini negatif yönde çok fazla etkilemediği söylenebilir. Elde edilen veriler sonucunda asfalt karışımlarda kullanılması gereken optimum atık cam tozu oranı %25 (toplam karışımın %5 filler oranı içerisinde) olarak belirlenmiştir.
- Toplam agreganın %5, %15 ve %25 oranında atık seramik agregası ile hazırlanan numunelerin Marshall stabilite sonuçlarına göre atık seramik içeriğinin artmasıyla; MS, VFA, özgül ağırlık ve akma değerleri azalırken, hava içeriği ve VMA değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Atık seramik agregasının yüksek su emme kapasitesi (%12) ve gözenekli yapısı sebebiyle karışım içerisindeki oranı sınırlandırılmıştır. Seramik ile ilgili yapılan farklı çalışmalarda da asfalt karışımlarda toplam agrega ağırlığının en fazla %30 oranında kullanılması önerilmiştir. Yapılan analizler sonucunda binder tabakası şartname limitlerini karşılayan ve karışımda kullanılması gereken optimum atık seramik oranı %5 olarak belirlenmiştir.

- Kuvars agregası toplam agreganın %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında asfalt karışımlarda geleneksel agrega ile yer değiştirerek kullanılmıştır. Hazırlanan asfalt beton numuneleri üzerinde Marshall stabilite analizleri yapılmış ve elde edilen grafikler incelendiğinde kuvars oranı arttıkça, VFA, özgül ağırlık ve akma değerleri azalırken, MS, hava içeriği ve VMA değerlerinin arttığı ortaya çıkmıştır. Kuvars agregasının sertliği yüksek bir malzeme olmasından dolayı karışımda yeterli dayanımı sağlamış ancak yüksek oranda kullanılması hava içeriğinin şartname limitlerini aştığından dolayı en fazla %20 oranında kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.
- Ferrokrom kullanılarak (%0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında) hazırlanan asfalt karışımlarda ise ferrokrom oranı arttıkça, MS, VMA, VFA ve özgül ağırlık değerlerinin arttığı, akma değerleri ve hava içeriğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Analizler sonucunda ferrokrom içeriği %50 olan asfalt karışımının binder tabakası tasarım limitlerini karşıladığı görülmüştür. Ayrıca ferrokrom agregasının mekanik ve fiziksel özelliklerinin asfalt beton üretiminde kullanılan agregaların şartname limitlerini sağladığı ortaya çıkmıştır.
- Çelik cürufu agregası (toplam agreganın %0, %25, %50, %75 ve %100 oranlarında) kullanılarak hazırlanan asfalt karışımlarda cüruf oranı arttıkça, VMA, VFA, MS, hava içeriği ve özgül ağırlık değerlerinin arttığı, akma değerlerinin azaldığı ortaya çıkmıştır. Literatüre bakıldığında çelik cürufunun; sertlik, su emme, özgül ağırlık, gözeneklilik ve köşelilik gibi fiziksel ve mekanik yapısı sebebiyle asfalt karışımlarda yüksek oranlarda kullanılmaması önerilmektedir (%60 oranında). Tez çalışması kapsamında yapılan analizlerde ise çelik cürufu oranı %25 olan karışım en yüksek performansı göstermiş ve şartname limitlerinin sağlamıştır.

Mikromorfolojik Analiz Sonuçları;

- Grafit tozu içeren asfalt beton numuneleri üzerinde yapılan Mikromorfolojik analiz sonucunda hava boşlukları, uzun grafit filler taneleri ile pürüzsüz kireç taşı agrega tane yüzeyleri boyunca kümelenme eğiliminde olup, asfalt betonunda zayıf hatlar oluşturmuştur. Binder film tabakası filler taneleri etrafında, 150-1300 µm kalınlığında non-absorbe (efektif bağlayıcı kalınlığı) binder bantları şeklinde gözlemlenmiştir. Karışım içerisindeki grafit tozu oranı arttıkça, stabilitede önemli sayılabilecek düşüşler gözlenmiştir. Ayrıca yüksek

miktarda asfalt absorbe edilerek taneler etrafında bağlayıcı film tabakası oluşturabilmek için kullanıma hazır asfalt miktarını azaltmıştır. Bu durum karışımın VMA değeri artarken VFA değerinin yaklaşık aynı kalmasına sebep olmuştur.

- Atık cam tozu içeren karışımlarda ise camın hidrofobik bir malzeme olmasından dolayı bağlayıcıyı emilimi gerçekleşmemiş ve bu durum sonucunda karışım içerisinde tam bir adezyon sağlanamamıştır. Bu durumun karışımın stabilitesinin azalmasına sebep olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca elde edilen görüntülerde atık cam tozu ve kireç taşı filler malzemelerinin iri taneli kireç taşı agregalarının etrafında toplandığı görülmüştür. Bu durumun karışım içerisindeki atık cam tozu oranı arttıkça, hava içeriği ve VMA değerlerinin artmasına neden olduğu yorumu yapılmıştır.
- Plakalı yapıya sahip olan atık seramik agregaların cilalı yüzeylerine sahip olan tanelerinde bağlayıcı emilimi gerçekleşmediğinden dolayı tam bir adezyon sağlayamadığı görülmüştür. Ancak cilalı olmayan kırık yüzeyli seramik agregalarda ise bağlayıcı emiliminin olduğu ve karışım içerisinde adezyonun bu kısımlardan dolayı sağlandığı anlaşılmıştır. Karışımlarda atık seramiğin agrega olarak kullanılması ve cilalı yüzeye sahip tanelerin olması sebebiyle bağlayıcı emilimi sağlıklı olarak gerçekleşemeyen kısımlarda tam bir adezyon sağlanamadığı gözlemlenmiştir. Bu durum sonucunda da asfalt karışımların stabilite değerlerinin azalmış olabileceği sonucuna varılmıştır. Diğer bir yandan seramik agregaların genel olarak su emme oranı (%12) yüksek bir malzeme olmasından dolayı cilalı olmayan kırık yüzeyleri tarafından fazla miktarda asfalt emilimi gerçekleşmiş ve bu da agregaların etrafında bağlayıcı film kalınlığının azalmasına neden olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum karışımın seramik oranı arttıkça VMA değerlerinin artması ve VFA değerlerinin de azalmasına neden olmuştur.
- Agregalar eklenen kuvars tane şekilleri genelde köşeli, yarı-köşeli şekilli olup, hemen hemen tamamı yüzeyleri boyunca, büyük olasılıkla yüksek sertliğe sahip olmalarından dolayı (MOHS sertlik cetvelinde 10 üzerinden 7) çatlaklı zonların oluştuğu gözlemlenmiştir. Söz konusu bu çatlaklı yüzeyler boyunca absorbe olmuş asfalt zonlarının yaygın olması dikkat çekmiştir (minumum 10 µm, maksimum 260 µm). Ayrıca, yukarıda bahsedilen çatlaklı zonların asfalt ile doldurulmadığı yerlerde, hava boşlukları, kuvars taneleri ile pürüzsüz kireç taşı agrega yüzeyleri boyunca kümelenme eğiliminde olup, asfalt betonunda

zayıf hatlar oluşturmıştır. Bu sebeple de kuvars oranı arttıkça, stabilitede küçük artışlar gözlenmekle beraber, daha yüksek miktarda asfalt tane yüzeyleri boyunca gelişmiş olan çatlaklı zonlarda absorbe edilmiş, bu da taneler etrafında bağlayıcı film tabakası oluşturabilmek için kullanıma hazır asfalt miktarını azaltmış, dolayısıyla da VMA değeri artmasına rağmen VFA değerinde düşüşler gözlenmiştir.

- Ferrokrom agregası içeren karışımlarda; binder film tabakası, filler taneleri etrafında, 280-720 μm kalınlığında non-absorbe(efektif bağlayıcı kalınlığı) binder bantları şeklinde görülmüştür. Her ne kadar filler bileşenleri arasında bazı taneler yuvarlak şekilli olsa da agrega olarak eklenen ferrokrom tane şekilleri genelde köşeli ve yarı-köşeli şekilli ve önemli bir kesimi levhamsı ve uzamış yapıda olup yüzeyler boyunca absorbe olmuş binder zonları oluşturmıştır. Boşlukların asfalt ile doldurulmadığı yerlerde, hava boşlukları, uzun ferrokrom taneleri ile pürüzsüz kireç taşı agrega tane yüzeyleri boyunca kümelenme eğiliminde olup, bu sebepten dolayı karışımda asfalt betonunda zayıf noktalar/hatlar oluşturmıştır. Ferrokrom oranı arttıkça, stabilitede küçük artışlar gözlenmekle birlikte daha yüksek miktarda asfalt emilimi gerçekleşmiştir. Bu durum taneler etrafında binder film tabakası oluşturabilmek için kullanıma hazır asfalt miktarını azaltmış ve VMA değeri artmasına rağmen VFA değeri özellikle ferrokrom oranı %50 oranına ulaştıktan sonra hemen hemen aynı kalmıştır.
- Çelik cürufu içeren karışımlarda bağlayıcı film tabakası filler taneleri etrafında, 200-700 μm kalınlığında non-absorbe(efektif bağlayıcı kalınlığı) binder bantları şeklinde ölçülmüştür. Asfalt, agrega taneleri arasında eşit olarak dağılım göstermemekte, filler taneleri ise bağlayıcı içerisinde gömülü veya çevrilmiş halde asfalt mastiği oluşturmıştır. Ayrıca, hava boşlukları, levhamsı ve uzun çelik cürufu ile pürüzsüz kireç taşı agrega tane yüzeyleri boyunca kümelenme eğiliminde olup, asfalt betonunda zayıf hatlar oluşturmıştır. Bunun sonucu olarak stabilite önce az miktarda yükselmiş, sonra %75 karışım oranına kadar aynı kalmış ve daha sonra da %100 oranda tekrar yükselme göstermiştir. Çelik cüruf oranı arttıkça, daha yüksek miktarda bağlayıcı absorbe edilmiş, bu durum taneler etrafında bağlayıcı film tabakası oluşturabilmek için kullanıma hazır asfalt miktarını azaltmış, dolayısıyla da VMA değeri artmasına rağmen VFA değeri %25 oranından sonra aynı kalmıştır.

Elektromanyetik İletim Sonuçları;

- Grafit tozu içeren numunelerin elektromanyetik iletim büyüklükleri incelendiğinde genel olarak frekans ve grafit içeriği arttığında azalma meydana gelmiştir. En düşük performansı %100 grafit tozu içeren karışım göstermiştir. Diğer karışım oranlarına sahip numuneler ise 3-8 GHz aralığında %50 üzerinde iletim büyüklüğü değerini göstermişlerdir. Grafit yoğunluğu arttıkça elektromanyetik iletimin azalması, dış etkilerin (basınç ve sıcaklık) artmasıyla grafit tozunun kendisini oluşturan bağlar kolayca kopmakta ve karışım içerisinde yüzey alanı genişlemektedir. Bunun sonucunda ise karışım metal bir levha gibi davranarak elektromanyetik dalgaların yansıtılmış olabileceği sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak %25 oranında grafit tozu içeren asfalt betonu numunesi, %90 iletim oranıyla 5,4 GHz frekans değerinde en verimli iletim performansını göstermiştir.
- Atık cam tozu içermeyen karışımın elektromanyetik iletim performansı, atık cam tozu içeren diğer karışımlardan genel olarak daha yüksek çıkmıştır. Elektromanyetik iletimde daha önceden de belirtildiği üzere elektromanyetik dalgaların iletim performansı dalgaların yansması ve/veya soğurulmasından kaynaklı kayıpların en aza indirgenmesi ile sağlanmaktadır. Atık cam tozu karışım içerisinde kalkanlama etkisi göstermiş ve elektromanyetik iletim katsayılarını düşürmüştür. Düşük frekans aralıklarında (5-5,5 GHz) atık cam tozu içeren ve içermeyen tüm numuneler yaklaşık %70 oranında olmak üzere en yüksek elektromanyetik iletim büyüklüğü göstermişlerdir.
- Atık seramik agregası içeren karışımlarda atık cam tozu içeren numuneler ile benzer bir performans göstermiştir. Bu durumun cam ve seramik malzemelerinin dielektrik katsayılarının benzer olması sebebiyle aynı performansı göstermiş olabileceği sonucuna varılmıştır.
- Kuvars agregası ile hazırlanan karışımlar genel olarak elektromanyetik iletimi düşük çıkmıştır. Ancak bazı frekans noktalarında iletim performansı kuvars içermeyen karışımın performansına yaklaşmıştır. 3-6 GHz frekans aralığında kuvars agregası içeren tüm numunelerin iletim performansları yaklaşık 5,5 GHz frekans değerinde en yüksek verimi göstermiştir (yaklaşık %70) Özellikle 6 GHz frekans değeri için %50, %75 ve %100 oranında kuvars içeren karışımlar (yaklaşık %65) hiç kuvars içermeyen karışımlardan

(yaklaşık %55) çok daha iyi performans göstermişlerdir. Ancak genel olarak bakıldığında 12 GHz frekans noktasına kadar %100 oranında kuvars içeren karışımın elektromanyetik iletim performansı diğer karışımlara göre yüksek çıkmıştır. Kuvars mineralinin piezoelektrik malzeme olmasından dolayı bu sonucuna varılmıştır.

- %25 çelik cürufu içeren karışım yaklaşık 4GHz frekans noktasında en yüksek iletim değerini göstermiştir (%100). Ayrıca %75 oranında cüruf içeren karışım da aynı frekans noktasında iletim değeri yaklaşık %95 çıkmıştır. Bu durumun çelik cürufunun serbest MgO, CaO ve yüksek miktarda demir oksit gibi aktif minerallerden oluşması, özgül yüzey alanının ($1,96 \text{ m}^2/\text{g}$) kireç taşına ($1,43 \text{ m}^2/\text{g}$) göre yüksek olması sebebiyle karışımdaki çelik cürufu oranı arttıkça cürufun karışım içerisindeki dağılımı artmış ve asfalt betonunun elektromanyetik dalgaların karşı tarafa iletiminin azalmasına neden olabileceği sonucuna varılmıştır. Daha önceki yapılan çalışmalarda da çelik cürufunun elektromanyetik iletim ile ilgili benzer sonuçlar vermesi, elde edilen verileri destekler nitelikte olmuştur.
- %75 oranında ferrokrom içeren numune 3-16 GHz frekans aralığı boyunca %100 iletim büyüklüğü değerini vererek diğer karışımlar içinde en yüksek performansı göstermiştir. Ayrıca %100 oranında ferrokrom içeren karışım da en iyi iletim performansı gösteren ikinci numune olmuştur ve yaklaşık 16-18 GHz frekans aralığında iletim büyüklüğü artarak en yüksek değerine ulaşmıştır (%50) ve yaklaşık 4-6,5 GHz frekans aralığında elektromanyetik iletimin %100 olduğu maksimum değerini vermiştir.
- Marshall analizi ve elektromanyetik iletim sonuçlarının korelasyonu sonucunda elde edilen verilere göre; farklı katkılarla üretilen asfalt betonlarının elektromanyetik geçirgenliklerini en çok etkileyen parametreler; özgül ağırlık ve hava içeriği olmuştur. Elde edilen grafiklere göre her bir asfalt karışımı için hava içeriğinin artması elektromanyetik iletimi olumsuz yönde etkilediği ancak özgül ağırlığın artması ise iletimi olumlu yönde etkilediği sonucuna varılmıştır. VFA ve VMA değerleri ise dolaylı olarak karışımın hava içeriğine ve özgül ağırlığına bağlı olmasından dolayı elektromanyetik iletimi etkileyen parametreler olarak değerlendirilmiştir.
- Elde edilen tüm sonuçlar değerlendirildiğinde asfalt karışımların hem mekanik ve fiziksel özelliklerin iyileştirilmesi hem de elektromanyetik iletimin arttırılmasında deneysel

çalışmada kullanılan katkılar içerisinde en yüksek performansı ferrokrom agregası göstermiştir.

6. ÖNERİLER

Doktora tez çalışması kapsamında asfalt karışımların elektromanyetik dalgaları iletim özelliğini arttırmak amacıyla belirlenen katkı malzemelerin karışımın fiziksel, mekanik, Mikromorfolojik ve elektromanyetik iletim performanslarına olan etkileri yapılan analizler sonucunda belirlenmiştir. Analizler sonucunda bundan sonra gerçekleştirilecek çalışmalar için şu öneriler yapılabilir;

- Teknolojinin ilerlemesiyle kullanımı artan elektrikli araçların performanslarını artırmak ve şarj sorununa çözüm olması amacıyla dinamik şarj yöntemine sahip yol kesitlerinde binder tabakasında katkı malzemesi olarak ferrokrom cürufunun %50-%75 oranında kullanılması; kaplamanın fiziksel ve mekanik özelliklerini iyileştirerek yolun bakım ve onarım maliyetinin düşmesine neden olacak ve böylece hizmet ömrünün uzun olmasını sağlayacaktır. Ayrıca bu konudan yola çıkılarak farklı malzemelerin araştırılması faydalı olacaktır.
- Atık cam ve seramik gibi malzemeler elektromanyetik kalkanlama özelliği sayesinde elektromanyetik dalgaların ve elektrik iletkenliğinin olumsuz etkilerinden korunmak amacıyla farklı alanlarda katkı malzemesi olarak kullanılabilir. Örneğin çatı kaplamalarda kullanılan ve bitüm içeren asfalt kiremitlerin üretiminde cam ve seramiğin katkı malzemesi olarak kullanılması, yıldırım çarpması gibi elektriksel doğa olaylarının kalkanlama özelliği sayesinde etkisinin azaltılmasına ve atık malzemelerin değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır.
- Yol inşaatında kullanılabilecek daha farklı sanayi atıklarının araştırılması, bertarafı zor olan atıklar için geniş bir kullanım alanı oluşturarak kaynakların korunmasında önemli faydalar sağlanabilir. Ayrıca atık malzemelerinin yol inşaatında değerlendirilmesiyle hem maliyet hem de çevre kirliliği azaltılmış olacaktır.

KAYNAKÇA

Ahmedzade, P., Alataş, T., Geçkil, T. (2007). The effect of carbon black on the mechanical properties of asphalt mixtures. *Journal of Engineering and Natural Sciences*, 25(2), 179-189.

Ahmedzade, P., Şengöz, B. (2009). Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete, *Journal of Hazardous Materials*, vol. 165, 1–3,300–305. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.09.105.

Akın, D., Kaşgöz, A., Durmuş, A., Öksüzömer, M.A., Deligöz, H. (2012). Polimer elektrolit membran (pem) yakıt hücrelerinde bipolar plaka olarak kullanım amaçlı iletken kompozitlerin hazırlanması, 10. Ulusal Kimya Mühendisliği Kongresi (UKMK-10), İstanbul, Türkiye, 3-6 Eylül.

Al-Khateeb, G.G. (2018). Conceptualizing the asphalt film thickness to investigate the SuperPave VMA criteria. *International Journal of Pavement Engineering*, 19(11), 957–965. <https://doi.org/10.1080/10298436.2016.1224414>.

Al-Khateeb, G., Sukkari, A., Zeiada, W., Ezzat, H. (2023). Microscopy-based approach for measuring asphalt film thickness and its impact on hot-mix asphalt performance. *Case Studies in Construction Materials* 18: e01711. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01711>.

Al-Saeedi, B.J.K., Al-Jameel, H.A.E. (2018). Sustainable Performance of Iraqi Asphalt Base Course Using Recycled Glass as Aggregate Replacement, *Journal of University of Babylon, Engineering Sciences*, Vol. (26), No. (5). <https://doi.org/10.29196/jub.v26i5.869>.

Ameri, M., Hesami, S., Goli, H., (2013). Laboratory evaluation of warm mix asphalt mixtures containing electric arc furnace (EAF) steel slag. *Construction and Building Materials*, 49, 611-617. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.034>.

Anderson, D.A., Bahia, H.U., Dongre, R. (1992). Rheological Properties of Mineral Filler-Asphalt Mastics and Its Importance to Pavement Performance. *Symposium on Effects of*

Aggregates and Mineral Fillers on Asphalt Mixture Performance, ASTM Special Technical Publication, 1147:131-153, San Diego, USA.

Androjić I., Marović, I. (2019). Influence of Compaction Energy on Volumetric Properties of Hot-Mix Asphalt with Waste Glass Content. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 31 (10): 04019241. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002887.

Arabani, M., Tahami, S. A., Taghipoor, M. (2017). Laboratory investigation of hot mix asphalt containing waste materials. *Road Mater. Pavement*, 18 (3): 713–729. <https://doi.org/10.1080/14680629.2016.1189349>.

Asi, M.I., Qasrawi, H.Y., Shalabi, F.I. (2007). Use of steel slag aggregate in asphalt concrete mixes, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 34 (8) 902–911. DOI: 10.1139/L07-025.

Asphalt Institute (1997). *Mix Design Methods for Asphalt*, 6th ed., MS-02. Asphalt Institute. Lexington, KY.

ASTM Standard C 127 (2001). Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM Standard C 128 (2023). Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM Standard C 131 (2020). Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM Standard C136 (2020). Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM Standard D5 (2020). Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM Standard D36/D36M (2020). Standard Test Method for Softening Point of Bitumen (Ring-and-Ball Apparatus). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM Standard D70-09e1 (2021). Standard Test Method for Specific Gravity and Density of Semi-Solid Asphalt Binder (Pycnometer Method). ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM Standard D92-05a (2018). Standard Test Method for Flash and Fire Points by Cleveland Open Cup Tester. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM Standard D113-07 (2018). Standard Test Method for Ductility of Bituminous Materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM Standard D4402-06 (2023). Standard Test Method for Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM Standard D4791 (2023). Standard Test Method for Flat Particles, Elongated Particles, or Flat and Elongated Particles in Coarse Aggregate. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM Standard D6927-22 (2022). Standard Test Method for Marshall Stability and Flow of Asphalt Mixtures. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

Azadmanjiri, J., Berndt, C. C., Wang, J., Kapoor, A., Srivastava, V.K., Wen, C. (2014). A review on hybrid nanolaminate materials synthesized by deposition techniques for energy storage applications, The Royal Society of Chemistry. DOI: 10.1039/c3ta14034b.

Barala, D., Mohanta, R., Sahoo, B., Dalai, R., Mallik, P.K. (2022). Dielectric properties of Steel Melting shop (SMS) slag. Materials Today: Proceedings ,49, 1905–1909.

Barišić, I., Dimter, S., Netinger, I. (2010). Possibilities of Application of Slag in Road Construction. Technical Gazette, 17 (4): 523-528.

Behnood, A., Ameri, M. (2012). Experimental investigation of stone matrix asphalt mixtures containing steel slag. *Scientia Iranica A*, 19 (5), 1214–1219. <https://doi.org/10.1016/j.scient.2012.07.007>.

Bilondi, M.P., Marandi, S.M., Ghasemi, F. (2016). Effect of Recycled Glass Powder on Asphalt Concrete Modification. *Structural Engineering and Mechanics*, 59(2), 373-385. <https://doi.org/10.12989/sem.2016.59.2.373>.

Boran, B., Batukan, B., Altunbaş, A., Tekin, S. A. (2021). Kuvars ve Turmalin Malzemelerinin Piezoelektrik Özelliklerinin Karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi Özel Sayı 24*, S. 479-483. DOI: 10.31590/ejosat.905232.

Brecher, A., Arthur, D. (2014). Review and Evaluation of Wireless Power Transfer (WPT) for Electric Transit Applications (Rapor No. 0060). U. S. Department of Transportation, Volpe National Transportation Systems Center. <https://doi.org/10.21949/1503536>.

Brewer, R. (1976). *Fabric and Mineral Analysis of Soils* Robert E. Krieger Publishing, Huntinton, NY.

Chan, C.C. (2013). The rise & fall of electric vehicles in 1828–1930: lessons learned, *Proceedings of the IEEE*, 101(1):206 – 212. DOI: 10.1109/JPROC.2012.2228370.

Chen, F., Balieu, R. (2020). A state-of-the-art review of intrinsic and enhanced electrical properties of asphalt materials: Theories, analyses and applications. *Materials & Design*, 195, Article 109067. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109067>.

Chen, M.Z., Lin, J.T., Wu, S.P., Liu, C.H. (2011). Utilization of recycled brick powder as alternative filler in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 25 (4) 1532–1536. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.08.005.

Chen, Y., Li, J., Li, T., Zhang, L., Meng, F. (2021). Recent advances in graphene-based films for electromagnetic interference shielding: Review and future prospects. *Carbon*, 180, 163–184. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2021.04.091>.

Chen, Y.J., Gao, P., Zhu, C.L., Wang, R.X., Wang, L.J., Cao, M.S. (2009). Synthesis, magnetic and electromagnetic wave absorption properties of porous Fe₃O₄/Fe/ SiO₂ core/shell nanorods. J. Appl. Phys. 106 (5). DOI: 10.1063/1.3204958.

Cogen, J. (2010). Report of the alternative fuel vehicle infrastructure of working group, Oregon State Reports, USA.

Cohen, S.B. (1968). Microwave band pass filters containing high Q dielectric resonators, IEEE Microwave Theory and Techniques MTT, 16, 218-227.

Conjeaud, M., George, C. M., Sorrentino, F.P. (1981). A new steel slag for cement manufacture: mineralogy and hydraulicity. Cement and Concrete Research, 11, 1, 85–102. DOI:10.1016/0008-8846(81)90012-0.

Coşkun, R.Z.F. (2023). Dünyada ve Türkiye’de Grafit. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı, sayfa 15.

Cui, X., Sun, S., Han, B., Yu, X., Ouyang, J., Zeng, S., Ou, J. (2017). Mechanical, thermal and electromagnetic properties of nanographite platelets modified cementitious composites. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 93, 49–58. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.11.017>.

Çetin, H., Gökoğlu, A. (2013). Soil structure changes during drained and undrained triaxial shear of a clayey soil. Soils and Foundations, 53(5):628–638. DOI: 10.1016/j.sandf.2013.08.002.

Çetin, H. Söylemez, M. (2004). Soil-particle and pore orientations during drained and undrained shear of cohesive sandy silt–clay soil. Can. Geotech. J., 41, 1127–1138. DOI:10.1139/T04-055.

Dai, Y., Sun, M., Liu, C., Li, Z. (2010). Electromagnetic wave absorbing characteristics of carbon black cement-based composites. Cement and Concrete Composites, 32(7), 508–513. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.03.009>.

Dan, H.C., Tan, J.W., Chen, J.Q. (2019). Temperature distribution of asphalt bridge deck pavement with groundwater circulation temperature control system under high- and low-temperature conditions. Road. Mater. Pavement. Des, 20 509–527. DOI: 10.1080/14680629.2017.1397048

Das, T.K., Prusty, S. (2013). Graphene-based polymer composites and their applications. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 52(4), 319–331. <https://doi.org/10.1080/03602559.2012.751410>.

Davison G. (2017, 7 Mayıs). From wireless to dynamic electric vehicle charging: The evolution of Qualcomm Halo [video] [Blog yazısı]. Erişim adresi: <https://www.qualcomm.com/news/onq/2017/05/wireless-dynamic-ev-charging-evolution-qualcomm-halo>.

Dhameja, S. (2001). Electric Vehicle Battery Systems. United States of America, Boston: Newnes Press.

Drees, L. R. (1994). Petrographic concepts; Optical microscopy, mineral identification, and micromorphological terms for description and interpretations. A lab manual prepared for Agro-606., Texas A&M University, College Station, TX.

Du, Y., Dai, M., Deng H., Deng, D., Wei, T., Kong, L. (2020). Laboratory investigation on thermal and road performances of asphalt mixture containing glass microsphere, Construction and Building Materials, 264 120710. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120710.

Düşmez, C. (2015). Elektriksel iletkenlik özelliği olan asfalt betonu geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon.

Electreon, 2023. Building the infrastructure to support mass EV adoption. Erişim adresi: <https://electreon.com/projects> . Erişim tarihi: 22.06.2023.

Electric Power Research Institute (EPRI) (2002). Comparing the benefits and impacts of hybrid electric vehicle options for compact sedan and sport utility vehicles. Final Report, USA.

Elseifi, M. A., Al-Qadi, I. L., Yang, S.-H., Carpenter, S. H. (2008). Validity of Asphalt Binder Film Thickness Concept in Hot-Mix Asphalt. Transportation Research Record, 2057(1), 37-45. <https://doi.org/10.3141/2057-05>.

European Environment Agency (2023, 9 Ocak). Major drop in EU's greenhouse gas emissions in 2019, official data confirms. Erişim adresi: <https://www.eea.europa.eu/highlights/major-drop-in-eus-greenhouse> . Erişim tarihi: 18.04.2023.

European Union Report On Critical Raw Materials For The EU (2014). Report of The Ad Hoc Working Group on Defining Critical Raw Materia. 1–41.

Ezer, O., Tongur, S. (2020). Making wireless ERS ready beyond demonstration projects. Proceedings of 4th Electric Road Systems Conference, Sweden.

Farrand, B., Emery, J., (1995). Recent improvements in the quality of steel slag aggregate Engineering, Materials Science, Transportation Research Record, Washington, DC.

Feng, D., Yi, J., Wang, D. (2013). Performance and Thermal Evaluation of Incorporating Waste Ceramic Aggregates in Wearing Layer of Asphalt Pavement. Journal of Materials in Civil Engineering, 25(7) 857-863. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000788.

Fernandes, F. M., Pais, J. C. (2017). Laboratory observation of cracks in road pavements with GPR. Construction and Building Materials, 154, 1130–1138. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.022>.

FitzPatrick, E.A. (1993). Soil Microscopy and Micromorphology. England, Chichester: Wiley.

Flynn, L. (1993). Glasphalt utilization dependent on availability. Road and Bridge, 31(2), 59–61.

Foley, A.M., Winning, I.J., Gallachoir, B.P.O. (2010). State of the art electric vehicle charging infrastructure. Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE, p.1-6, 1-3 Sept. Conference (VPPC), IEEE, p.1-6, Lille, France.

Gallego, J., del Val, M. A., Contreras, V., Páez, A. (2013). Heating asphalt mixtures with microwaves to promote self-healing. *Construction and Building Materials*, 42, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.12.007>.

García, Á., Schlangen, E., Van de Ven, M., Liu, Q. (2009). Electrical conductivity of asphalt mortar containing conductive fibers and fillers. *Construction and Building Materials*, 23, 3175–3181. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.06.014.

Geçyatan, E. (2015, 21 Eylül). Rolls-Royce CEO’su: Elektrikli otomobillere açığız [Blog yazısı]. Erişim adresi: <https://ajansotomobil.com/mobile/rolls-royce-ceosu-elektrikli-otomobillere-acigiz-haberi-42172.htm>. Erişim tarihi: 25.03.2022.

Geetha, S., Satheesh Kumar, K.K., Rao, C.R., Vijayan, M., Trivedi, D.C. (2009). EMI shielding: Methods and materials – A review. *Journal of Applied Polymer Science*, 112(4), 2073–2086. <https://doi.org/10.1002/app.29812>.

Geim, A.K. (2009). Graphene: status and prospects. *Science*, 324(5934), 1530–1534. <https://doi.org/10.1126/science.1158877>.

Guinoa, A.S., Ferreira, V.J., Lopez-Sabrin, A.M., Aranda-Uson, A., Lausín-González, C., Berganza-Conde, C., Ferreira, G. (2015). Utilization of Ladle Furnace slag from a steelwork for laboratory scale production Portland Cement. *Construction and Building Materials*, 94, 837–843. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.075.

Gurov, V. A. (2008). *Solid state electronics*, Moscow: Tekhnosfera, 19.

Gustavsson, M. G., Mottschall, M., Hacker, F., Jöhrens, J., Helms, H., Johnsson, F., Taljegård, M., Bernecker, T., Engwall, M., Almestrand Linné, P., Hasselgren, B., & Lindgren, M. (2021). Key messages on electric roads: Executive summary from the COLLERS Project. Swedish Transport Administration, TRV 2017/118854. Erişim adresi: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1540005&dswid=3695>. Erişim tarihi: 08.05.2022.

Gürer, C., Karaşahin, M. (2014). Sathi Kaplama Agregalarının Adezyon Özelliklerinin Araştırılması Electronic Journal of ConstructionTechnologies Vol: 10, No: 2, (1-11).

Gürer, C., Gürgöze, H. (2017). Investigation the characteristics of conductive asphalt concrete with carbonfibre. International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJIRSET), 6: 57-63.

Hainin, M. R., Yusoff, N. I., Fahmi, M., Sabri, M.F, Aziz, M. A. A., Hameed, M. A. S., Reshi, W. F. (2012). Steel Slag as an Aggregate Replacement in Malaysian Hot Mix Asphalt. International Scholarly Research Network, ISRN Civil Engineering, Article ID 459016. DOI:10.5402/2012/459016.

Harrop, P. J. (1972). Dielectrics. Newnes-Butterworth, October 1. ISBN-10: 0408703881 ISBN-13: 978-0408703888.

Hassn, A., Aboufoul, M., Wu, Y., Dawson, A., Garcia, A. (2016). Effect of air voids content on thermal properties of asphalt mixtures, Construction and Building Materials, 115 327–335. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.106>.

Hayes, J. G. (1998). Battery Charging Systems for Electric Vehicles, Electric Vehicles-A Technology Roadmap for the Future, pp. 4/1-4/8. <https://doi.org/10.1049/ic:19980359>.

Hislop, W. P., Coree, B. J. (2000). VMA as a design parameter in hot-mix asphalt. Mid-Continent Transportation Symposium 2000, Ames, Iowa, USA, 24–29.

Hong, S.H., Yuan, T.F., Choi, J.S., Yoon, Y.S. (2020). Effects of Steelmaking Slag and Moisture on Electrical Properties of Concrete. Materials, 13, 2675. DOI:10.3390/ma13122675.

Huang, B., Dong, Q., Burdette, E.G. (2009). Laboratory evaluation of incorporating waste ceramic materials into Portland cement and asphaltic concrete. Construction and Building Materials. 23 (12) 3451–3456. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.08.024.

Huang, S., Ye, Y., Liu, Y., Zheng, B., Luo, W. (2023). Evaluation of Steel Slag Optimal Replacement in Asphalt Mixture under Microwave Heating Based on 3D Polyhedral Aggregate Electromagnetic-Thermal Meso-Model. *Coatings*, 13, 517. <https://doi.org/10.3390/coatings13030517>.

Iacobescu, R.I., Koumpouri, D., Pontikes, Y., Saban, R., Angelopoulos, G.N. (2011). Volarisation of electric arc furnace steel slag as a raw material for low energy belite cements. *Journal of Hazardous Materials*, 196, 287-294. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.09.024>.

Issa, Y. (2016). Effect of adding crushed glass to asphalt mix. *Arch. Civ. Eng.*, 62 (2): 35–44. <https://doi.org/10.1515/ace-2015-0063>.

Jaselskis, E.J., Grigas, J., Brilingas, A. (2003). Dielectric Properties of Asphalt Pavement. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 15:427-434. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2003)15:5(427).

Jawahar, I.N., Mohanan, P., Sebastian, M.T. (2003). $A_5B_4O_{15}$ (A=Ba, Sr, Mg, Ca, Zn; B=Nb, Ta) microwave dielectric ceramics. *Materials Letters*, 57:4043–4048. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(03\)00262-3](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(03)00262-3).

Jiang, J., Li, Y., Zhang, Y., Bahia, H.U. (2022). Distribution of mortar film thickness and its relationship to mixture cracking resistance, *Int. J. Pavement Eng.*, 23 (3): 824–833. DOI: 10.1080/10298436.2020.1774767.

Jiao, Q., Themelis, N.J. (1988). Correlations of electrical conductivity to slag composition and temperature. *Metallurg. Mater. Trans. B* 19, 133–140.

Jony, H.H., Al-Rubaie, M., Jahad, I. (2011). The effect of using glass powder filler on hot asphalt concrete mixtures properties. *Engineering & Technology Journal*, Vol.29, No.1, pp. 44–57.

Joshi, A., Datar, S. (2015). Carbon nanostructure composite for electromagnetic interference shielding. *Pramana*, 84(6), 1099–1116. <https://doi.org/10.1007/s12043-015-1005-9>.

Kakimoto, A., Akihiro, E., Hirano, K., Nonaka, S., (1987). Precise measurement of dielectric properties at frequencies from 1 kHz to 100 MHz, Rev. Sci. Instrum. 58, 269–275.

Kalyoncu, R.S. (2003). Iron and Steel Slag, U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries. USA, Washington, pp. 92-93.

Kandhal, P.S., Hoffman, G.L. (1982). The use of steel slag as bituminous concrete fineaggregate, Research Project No. 79-26, Pennsylvania Department of Transportation, Final Report, November.

Kandhal, P.S., Chakraborty, S. (1996a). Effect of Asphalt Film Thickness on Short and Long Term Aging of Asphalt Paving Mixtures, Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology (NCAT), pp. 1–16 Report No. 96–01.

Kandhal, P.S., Chakraborty, S. (1996b). Effect of asphalt film thickness on short-and long-term aging of asphalt paving mixtures, Transp. Res. Rec., 1535 (1):83–90.

Kandhal, P.S., Foo, K.Y., Mallick, R.B. (1998). A Critical Review of VMA Requirements in Superpave, Auburn, AL, National Center for Asphalt Technology (NCAT), pp. 1–20 Report No. 98–01.

Kantarçeken, Y., Çizmecioğlu, Z. (2021). Smoky (Dumanlı) Kuvars Mineralinin Gemolojik Özellikleri, İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 20(40), 285-296.

Kara Ç., Karacasu M. (2015). Use of ceramic wastes in road pavement design. Proceedings of the world congress on new technologies. Barcelona, Spain, 226-6.

Kara, Ç., Karacasu, M. (2017). Investigation of waste ceramic tile additive in hot mix asphalt using fuzzy logic approach, Construction and Building Materials, 141, 598–607. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.025.

Karakteristikler ve Özellikleri. (t.y.). Erişim adresi <https://www.grafitelektrot.com/karakteristikler-ve-ozellikleri/>. Erişim tarihi: 05.07.2022.

Karayolları Genel Müdürlüğü (KTŞ), (2013). Devlet Karayolları Teknik Şartnamesi; Karayolları Genel Müdürlüğü: Türkiye, Ankara.

Karim, F., Hussain, J., Hafeez, I. (2021). Estimating the Asphalt Binder Film Thickness Using Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy. *Advances in Materials Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2021/8894970>.

Kaşgöz, A. (2017). Elektromanyetik Dalga Kalkanlama Özelliğine Sahip Polimer Kompozitlerin Geliştirilmesi ve Yapı-Performans İlişkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ekim, 2017, İstanbul.

Kausar, A. (2016). Electromagnetic interference shielding of polyaniline/Poloxalene/carbon black composite. *International Journal of Materials and Chemistry*, 6(1), 6–11. DOI: 10.5923/j.ijmc.20160601.02.

Kaya, O. (2021). Electric Roads: Their Design, Analysis and Potential Use for Turkey. The International Conference on Engineering, Natural and Applied Science, 24-26 November, 2021, Osmaniye, Turkey.

Kehagia, F. (2009). Skid Resistance Performance of Asphalt Wearing Courses with Electric Arc Furnace Slag Aggregates, *Waste Management & Research*, 27, pp. 288-294. DOI: 10.1177/0734242X08092025.

Kezunovic, M., Baldick, R., Damnjanovic, I., Pang, C., Kim, S., Tuttle, D., Peydaayesh, M. (2011). PHEVs as dynamically configurable dispersed energy storage, Final Project Report, Texas A&M University, August, USA.

Kneller, W.A., Gupta, J., Borkowski, M.L., Dollimore, D., (1994). Determination of original free lime content of weathered iron and steel slags by thermogravimetric analysis, *Transportation Research Record 1434*, National Research Council, USA, Washington, DC.

Kocabağ, D. (2002). Cam Kimyası, Özellikleri, Uygulaması. Birsen yayınevi, 1. Baskı, Ocak, İstanbul.

Kök, B. V., Yılmaz, M., & Erkuş, Y. (2017). Effects of graphite on mechanical properties of stone mastic asphalt pavement. *Journal of Civil Engineering and Management*, 23(8), 1013–1020. <https://doi.org/10.3846/13923730.2017.1374302>.

Kremer, F., Schönhals, A. (2003). *Broadband Dielectric Spectroscopy*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2003. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-56120-7>.

Kumar, S., Kumar, R., Koo, B.H., Choi, H., Kim, D.U., Lee, C.G. (2009). Structural and electrical properties of Mg₂TiO₄. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 117, 689-692. DOI: 10.2109/jcersj2.117.689.

Kurşun, İ., İpekoğlu, B. (1995). Türkiye kuvars kumu potansiyeline genel bir bakış. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu. 21-22 Nisan, İzmir.

Lachance-Tremblay, E., Vaillancourt, M., Perraton, D. (2016). Evaluation of the impact of recycled glass on asphalt mixture performances. *Road Mater. Pavement*, 17 (3): 600–618. <https://doi.org/10.1080/14680629.2015.1103778>.

Lai, W.W.L., Dérobert, X., Annan, P. (2018). A review of ground penetrating radar application in civil engineering: A 30-year journey from locating and testing to imaging and diagnosis. *Ndt & E International*, 96, 58–78. <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.04.002>.

Larminie J., Dicks A. (2000). *Fuel Cell Systems Explained*. England, London: John Wiley&Sons Ltd.

Larminie, J., Lowry, J. (2003). *Electric vehicle technology explained*. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, England.

Lee, S. Huh, J. Park, C. Choi, N. S. Cho, G. H., Rim, C. T. (2010). On-Line Electric Vehicle using inductive power transfer system. *Proceedings of the 2010 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*. DOI:10.1109/ECCE.2010.5618092. ISBN 978-1-4244-5286-6.

Li, C., Wu, S., Chen, Z., Tao, G., Xiao, Y., (2018). Enhanced heat release and self-healing properties of steel based asphalt materials under microwave irradiation. *Construction and Building Materials*, 193 32–41. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.10.193.

Li, P., Su, J., Ma, S., Dong, H. (2020). Effect of aggregate contact condition on skeleton stability in asphalt mixture. *International Journal Of Pavement Engineering*, 21(2):196–202. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1450503>.

Lind, B.B., Fallman, A.M., Larsson, L.B. (2001). Environmental impact of ferrochrome slag in road construction. *Waste Management*, 21, 255-264. DOI: 10.1016/S0956-053X(00)00098-2.

Liu, X., Wu, S., Ye, Q., Qiu, J., Li, B. (2008). Properties evaluation of asphalt-based composites with graphit and mine powders. *Construction and Building Materials*, 22, 121–126. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.10.004.

Liu, X., Wu, S. (2011). Study on the graphite and carbon fiber modified asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 25(4), 1807–1811. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.082>.

Lökçü, E. (2013). Spinel Mikrodalga Dielektrik Seramiklerinin Polimerik Jel Yöntemi ile Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Lv, X., Duan, Y., Chen, G. (2018). Electromagnetic wave absorption properties of cement-based composites filled with graphene nano-platelets and hollow glass microspheres. *Construction and Building Materials*, 162, 280–285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.047>.

Maharaj, C., White, D., Maharaj, R., Morin, C. (2017). Re-use of Steel Slag as an aggregate to asphaltic road pavement surface, *Cogent Engineering*, 4: 1416889. DOI: 10.1080/23311916.2017.1416889.

Maslehuddin, M., Sharif, M.A., Shameem, M., Ibrahim, M., Barry, M.S. (2003). Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregates. *Construction and Building Materials* 17(2):105-112. DOI: 10.1016/S0950-0618(02)00095-8.

McConnachie, I. (1974). Fabric changes in consolidated kaolin. *Geotechnique*, 24, 207–222. <https://doi.org/10.1680/geot.1974.24.2.207>.

Mendonça, W. M., Marques, G. L.O., Gomes, G. J.C. (2024). Geotechnical performance of isotropic and foliated quartzite waste as aggregate for road base and asphalt mixture. *Transportation Geotechnics*, 46, 101242. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101242>.

Micheli, D., Delfini, A., Santoni, F., Volpini, F., Marchetti, M. (2014). Measurement of electromagnetic field attenuation by building walls in the mobile phone and satellite navigation frequency bands. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, 698–702. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2014.2376811>.

Mitchell, J.K. (1993). *Fundamentals of Soil Behavior*. USA, New York: Wiley.

Montgomery, D.G., Wang, G. (1991). Instant-chilled steel slag aggregate in concrete-strength related properties. *Cement and Concrete Research* 22(5):755-760. DOI: 10.1016/0008-8846(92)90098-G.

Morrow, K., Karner, D., Francfort, J. (2008). Plug-in hybrid electric vehicle charging infrastructure review, Final Report, U.S. Department of Energy Vehicle Technologies Program – Advanced Vehicle Testing Activity, November 2008, USA.

Muniandy, R., Aburkaba, E., Mahdi, L., Ehsan, S. (2012). Effects of mineral filler particle size and type on permanent deformation of stone mastic asphalt mixtures, *GJ P&A Sci. Technol.*, 50–64.

Musavi, F., Edington, M., Eberle, W. (2012). Wireless power transfer: A survey of EV battery charging technologies. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, (pp.1804-

1810). United States of America: Raleigh, NC, September 15-20. DOI: 10.1109/ECCE.2012.6342593.

Neamen, D. A. (1997). Semiconductor Physics and Devices 2nd ed. Mc Graw-Hill, New York, 420-450, 517-523

Nicholls, J.C., Lay, J. (2002). Crushed glass in macadam for binder course and roadbase layers. Performance of bituminous and hydraulic materials in pavements. Swets & Zeitlinger, Lisse, pp 197-211. DOI: 10.4324/9780203743928-32.

Norambuena-Contreras, J., Garcia, A. (2016). Self-healing of asphalt mixture by microwave and induction heating. Materials & Design, 106, 404–414. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.05.095>.

Noureldin, A.E., Mc Daniel, D.S. (1990). Evaluation of steel slag asphalt surface mixtures, Transportation Research Board, 1269, s. 133-149. Paper No. 890673, Washington, DC.

O’Flaherty, O. (2002). The location, design, construction and maintenance of road pavements, Butterworth-Heinemann publications, Fourth edition, Highways. ISBN 9780750650908.

Olhoeft, G.R. (1981). Electrical Properties of Rocks. Physical Properties of Rock Sand Minerals, 257-330. Toronto, Ontario.

Öksüz, M., Esen, H., Yıldırım, H., Yücesoy, J.H., Mudur, M., Kaşgöz, A., Ayten, A.İ. (2012). Development of polymer composite having enhanced impact resistance intended for automotive industry, APME 2011, Türkiye, 5-8 Eylül.

Özbay, H., Közkurt, C., Dalcalı, A., Tektaş, M. (2020). Geleceğin ulaşım tercihi: Elektrikli araçlar. Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi Cilt:3, Sayı:1.

Özbey, B. (2020). Elektrikli Araçlar İçin Kablosuz Şarj Sistemi Tasarımı ve Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Öztürk, T. (2013). Asenkron motor ile sürülen elektrikli aracın modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi, Karabük.

Öztürk, M., Karaaslan, M., Akgöl, O., Sevim, U.K. (2020). Mechanical and electromagnetic performance of cement based composites containing different replacement levels of ground granulated blast furnace slag, fly ash, silica fume and rice husk ash. Cement and Concrete Research, 136, Article 106177. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106177>.

Pan, P., Wu, S., Xiao, Y., Wang, P., Liu, X. (2014). Influence of graphite on the thermal characteristics and anti-ageing properties of asphalt binder. Construction and Building Materials, 68, 220–22. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.069.

Panchal, C., Stegen, S., Lu, J. (2018). Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system. Engineering Science and Technology, 21, 922-937. doi: 10.1016/j.jestch.2018.06.015.

Popov, V.N. (2004). Carbon nanotubes: properties and application. Materials Science and Engineering: R: Reports, 43(3), 61–102. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2003.10.001>.

Porubiaková, A., Komačka, J. (2015). A comparison of dielectric constants of various asphalts calculated from time intervals and amplitudes. Procedia Engineering, 111, 660–665. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.07.129>.

Press, F., Siever, R. (1982). Earth, 3rd edn. W.H. Freeman and Company, USA, San Francisco, CA.

Priya Rani, B.R., Sebastian, M.T., (2008). The effect of glass addition on the dielectric properties of barium strontium titanate. J Mater Sci: Mater Electron, 19:39–44. DOI 10.1007/s10854-007-9224-6.

Research Institutes of Sweden, (RISE), (2021), Research & Innovation Platform for Electric Road Systems. E-Research Institutes of Sweden. Erişim adresi: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1534916/FULLTEXT02.pdf>. Erişim Tarihi: 07.09.2023.

Rondi, L., Bregoli, G., Sorlini, S., Cominoli, L., Collivignarelli, C., Plizzari, G. (2016). Concrete with EAF steel slag aggregate: A comprehensive technical and environmental characterization. *Composites Part B: Engineering*, 90, 195-202. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.12.022>.

Salem, Z. T. A., Khedawi, T. S., Baker, M. B., Abende, R. (2017). Effect of Waste Glass on Properties of Asphalt Concrete Mixtures, *Jordan Journal of Civil Engineering*, 11: 1.

SandhyaRani, M., Soundararajan, K., Nagabushan, R.K., (2013). Multi-phase clocking based high precision dielectric constant measurement for embedded applications. *Nirma University International Conference on Engineering (NUICONE)*, 28-30, November. DOI: [10.1109/NUICONE.2013.6780172](https://doi.org/10.1109/NUICONE.2013.6780172).

Santillan, N., Speranza, S., Torrents, J.M., Segura, I. (2022). Evaluation of conductive concrete made with steel slag aggregates. *Construction and Building Materials* 360, 129515. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129515>

Satılmış, O., Meşe, E. (2011). Elektrikli ve hibrit elektrikli araçlar için batarya şarj cihazları, *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu*, 2011, Elazığ, Türkiye, Cilt: 2, Sayı: 137-142.

Sayın, A.A., Yüksel, İ. (2011). Elektrikli Renault Fluence aracı, lityum-iyon bataryasının modellenmesi ve batarya yönetimi, *Mühendis ve Makine*, 52(616):75-82.

Senthamarai, R., Manoharan, P.D. (2005). Concrete with ceramic waste aggregate. *Cement and Concrete Composites*. 27 (9) 910–913. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.04.003>.

Serjun, V.Z., Mladenovic, A., Mirtic, B., Meden, A., Scancar, J., Milacic, R. (2015). Recycling of ladle slag in cement composites: Environmental impacts. *Waste Management*, 43, 376-385. DOI: [10.1016/j.wasman.2015.05.006](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.05.006).

Shen, D., Wu, C., Du, J. (2009). Laboratory investigation of basic oxygen furnace slag for substitution of aggregate in porous asphalt mixture. *Construction and Building Materials* 23(1):453-461. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.11.001.

Sheng, S. (2020, Şubat). Moving towards a sustainable transportation system for New Zealand. International Association for Energy Economics (IAEE) 2020. Erişim adresi: <https://www.iaee.org/documents/2020/Auckland/Sheng2020ppt.pdf>. Erişim tarihi: 22.01.2024.

Shober, P., Boer, C., Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesthesia and Analgesia*, 126(5), 1763-1768. <https://doi.org/10.1213/ANE.0000000000002864>

Silvestre, R., Medel, E., García, A., Navas, J. (2013). Using ceramic wastes from tile industry as a partial substitute of natural aggregates in hot mix asphalt binder courses. *Construction and Building Materials*, 45, 115–122. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.03.058.

Singh, A.P., Saxena, S., Govindan, A. (2014). Studies on the Dielectric Constant and Conductivity of $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$: PET and $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$: PVC ceramic Polymer Composites. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 3(12):871-874.

Smartroad Gotland (2020, 5 Mart) Electric truck ready for dynamic wireless charging on public roads in Sweden [Blog yazısı]. Erişim adresi: <https://www.smartroadgotland.com/post/electric-truck-ready-for-dynamic-wireless-charging-on-public-roads-in-sweden>. Erişim tarihi: 12.07.2024.

Smith, B.W., Rhodes, E.J. (1994). Charge movements in quartz and their relevance to optical dating. *Radiation Measurements*. 23(2-3), 329-333. [https://doi.org/10.1016/1350-4487\(94\)90060-4](https://doi.org/10.1016/1350-4487(94)90060-4).

Spahr, M.E., Gilardi, R., Bonacchi, D. (2017). Carbon black for electrically conductive polymer applications. In R. Rotheron (Ed.), *Fillers for Polymer Applications. Polymers and Polymeric Composites: A Reference Series*, 375. Springer Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28117-9_32.

Stempihar, J., Pourshams-Manzouri, T., Kaloush, K., Rodezno, M. (2012). Porous asphalt pavement temperature effects for urban heat Island analysis. Transportation Research Record, (2293), 123-130. <https://doi.org/10.3141/2293-15>.

Su, N., Chen, J.S. (2002). Engineering properties of asphalt concrete made with recycled glass. Resources, Conservation and Recycling, 35, 259– 274. DOI:10.1016/S0921-3449(02)00007-1.

Sukkari, A. (2022a). Measuring asphalt film thickness using microscopy to further enhance the performance of UAE roadways. MS Thesis, University of Sharjah, UAE.

Sukkari, A., Al-Khateeb, G., Ziada, W. Ezzat, H. (2022b). Estimating Asphalt film thickness in asphalt mixtures using microscopy to further enhance the performance of UAE roadways. A. Akhnoukh et al. (Eds.): International Road Federation World Meeting & Exhibition, Springer, Cham, pp. 87–96. https://doi.org/10.1007/978-3-030-79801-7_7.

Sun, X.G., Gao, M., Li, C., Wu, Y. (2011). Microwave absorption characteristics of carbon nanotubes. In Carbon Nanotubes-Synthesis, Characterization, Applications, (pp. 265–278). <https://doi.org/10.5772/16514>.

Sundelin, H., Tongur, S. (2020). Learnings from Smartroad Gotland: the world's first public wireless ERS for buses and trucks. Proceedings of the 4th Electric Road Systems Conference 2020, Sweden.

Şen, G., Boynueğri A.R, Uzunoğlu M. (2011). Elektrikli araçların şarj yöntemleri ve araçların şebekeyle bağlantısında karşılaşılan problemlere yönelik çözüm önerileri, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu FEEB 2011, Fırat Üniversitesi-Elazığ, 5-7 Ekim 2011.

Şenol, R. Üçgül, İ., Acar, M. (2006). Yakıt Pili Teknolojisindeki Gelişmeler ve Taşıtlara Uygulanabilirliğinin İncelenmesi. Mühendis ve Makine, 47(563), 37-50.

Tahmoorian, F., Samali, B., Yeaman, J., Crabb, R. (2018). The use of glass to optimize bitumen absorption of hot mix asphalt containing recycled construction aggregates. Materials 11 (7): 1053. <https://doi.org/10.3390/ma11071053>. DOI: 10.3390/ma11071053.

Tang, B., Wu, H., Liao, Y., Huang, D. (2015). Effect of glass powder instead of mineral powder on asphalt mixture. 5th international conference on civil engineering and transportation, ICCET.

Thompson, G.R., Turk, J. (1991). Modern physical geology. Saunders College Publishing, Philadelphia, Pennsylvania.

Tong, G.X., Wu, W.H, Guan, J.G., Qian, H.S, Yuan, J.H., Li, W. (2011). Synthesis and characterization of nanosized urchin-like $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ and Fe_3O_4 : microwave electromagnetic and absorbing properties, J. Alloy Compd. 509 (11) 4320–4326. DOI: 10.1016/J.JALLCOM.2011.01.058.

Trigos, L., Gallego, J., Escavy, J.I. (2020). Heating potential of aggregates in asphalt mixtures exposed to microwaves radiation. Construction and Building Materials, 230, Article 117035. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117035>.

Tsakiridis., P.E., Papadimitriou, G.D., Tsivilis, S., Koroneos, C. (2008). Utilization of steel slag for Portland cement clinker production. Journal of Hazardous Materials, 152, 2, 805-811. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.07.093>.

Tüfekçi, M., Demirbaş, A., Genç, H. (1997). Evaluation of steel furnace slags as cement additives. Cement and Concrete Research, 27, 11, 1713-1717. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00158-0](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00158-0).

U.S Department of Energy (DOE) (2008). Plug-in Hybrid Electric Vehicle Charging Infrastructure Review. Vehicle Technologies Program- Advance vehicle Testing Activity, Final Report, USA.

Udaya, B.V., Venkateswara, R. J. (2016). Influence of glass powder and quartzite rock dust as fillers in stone mastic asphalt. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). Doi:10.17577/IJERTV5IS110118.

Ulaşan ve Erişen Türkiye (2021). Erişim adresi <https://www.uab.gov.tr/uploads/pages/bakanlik-yayinlari/ulasan-ve-erisen-turkiye-2021.pdf>.

Erişim tarihi: 15.02.2023.

Uysal S. (2012b). Graphite In Turkey And Its Position In Europe. Industrial Minerals International Congress & Exhibition.

Uysal, S. (2012a). Kritik Hammaddeler: Grafit. Madencilik.

Uysal, S. (2012c). 2nd Graphite Conference/London Global Marketing Manager Syrah Resources Limited.

Ünlü, N., Karahan, Ş., Tür, O., Uçarol, H., Özsu, E., Yazar, A., Turhan, L., Akgün, F., Tırıs, M. (2003). Elektrikli Araçlar, TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü, Gebze.

Üstün, Ö., Tuncay, N. (2012). Otomotiv Sektör Kurulu Raporu, Elektrikli Araçlarda Geçmişten Geleceğe Bakış, MÜSİAD Araştırma Raporları: 77, İstanbul.

Van de Ven, M.F.C., Molenaar, A.A.A., Poot M.R. (2011). Asphalt mixtures with waste materials: possibilities and constraints. In: 10th Conference on asphalt pavements for southern Africa proceedings.

Vapur, H., Top, S., Teymen, A., Türkmenoğlu, M. (2013). Elazığ Ferrokrom Tesisi Cürufklarının Agrega Özelliklerinin Araştırılması. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 28 (1): s. 77-88.

Von Hippel, A. R. (1954). Dielectric Material Sand Applications. USA, New York: John Wiley and Sons.

Wang, H., Zhang, Y., Zhang, Y., Feng, S., Lu, G., Cao, L. (2019). Laboratory and numerical investigation of microwave heating properties of asphalt mixture. Materials, 12(1), Article 146. <https://doi.org/10.3390/ma12010146>.

Wang, L.N., Jia, X.L., Li, Y.F., Yang, F., Zhang, L.Q., Liu, L.P., (2014). Synthesis and microwave absorption property of flexible magnetic film based on graphene oxide/carbon nanotubes and Fe₃O₄ nanoparticles, *J. Mater. Chem. A* 2 (36) 14940–14946. DOI: 10.1039/C4TA02815E.

Wang, Q., Wang D., Zhuang, S. (2017). The soundness of steel slag with different free CaO and MgO contents. *Construction and Building Materials*, Volume 151, 1 October, Pages 138-146. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.077>.

Wang, R., Sha, T., Xiong, Y., Cai, Y., Yue, J., Wang, H. (2023). Potential contribution of steel slag fillers to asphalt mastic in terms of microwave heating efficiency, electromagnetic mechanisms and fatigue durability. *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 24, No. 1, 2240471. <https://doi.org/10.1080/10298436.2023.2240471>.

Wang, Z., Dai, Q., Guo, S. (2017). Laboratory performance evaluation of both flake graphite and exfoliated graphite nanoplatelet modified asphalt composites. *Construction and Building Materials*, 149, 515–524. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.100>.

Wang, Z., Dai, Q., Guo, S. (2018). Microwave-healing performance of modified asphalt mixtures with flake graphite and exfoliated graphite nanoplatelet. *Construction and Building Materials*, 187, 865–875. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.210>.

Weeds, R. D. (1994). *Geophysical Characterization of Sites*. Rotterdam: AA. Balkema, 69-79.

Wen, H., Wu, S., Bhusal, S. (2016). Performance evaluation of asphalt mixes containing steel slag aggregate as a measure to resist studded tire wear. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(5), 04015191. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001475.

Wu, J., Chung, D.D.L. (2002). Increasing the electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon fiber polymer-matrix composite by using activated carbon fibers. *Carbon*, 40(3), 445–447. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(01\)00133-6](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(01)00133-6).

Wu, S., Mo, L., Shui, Z., Xuan, D., Xue Y., Yang, W. (2002). An Improvement in Electrical Properties of Asphalt Concrete. *Journal of Wuhan University of Technology- Mater. Sci. Ed.*, 17, 4, 69–72. DOI: 10.1007/BF02838422.

Wu, S., Mo, L., Shui, Z., Chen, Z. (2005). Investigation of the conductivity of asphalt concrete containing conductive fillers. *Carbon*, 43(7), 1358–1363. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2004.12.033>.

Wu, S., Xue, Y., Ye, Q., Chen, Y. (2009). Utilization of steel slag aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Building and Environment* 42(7):2580-2585. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.06.008.

Wu, S., Pan, P., Chen, M., Zhang, Y. (2013). Analysis of Characteristics of Electrically Conductive Asphalt Concrete Prepared by Multiplex Conductive Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25:871-879. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000565.

Wu, S.P., Xue, Y.J., Ye, Q.S., Chen, Y.C. (2007). Utilization of steel slag as aggregates for stone mastic asphalt (SMA) mixtures. *Building and Environment* 42(7):2580-2585. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.06.008.

Xiaoming, L., Shaopeng, W. (2011). Study on the graphite and carbon fiber modified asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 25, 1807–1811. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.11.082.

Xie, S., Ji, Z., Zhu, L., Zhang, J., Cao, Y., Chen, J., Liu, R., Wang, J. (2020). Recent progress in electromagnetic wave absorption building materials. *Journal of Building Engineering*, 27, Article 100963. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100963>.

Yağcıtekin, B., Uzunoğlu, M., Karakaş, A. (2011). Elektrikli araçların şarjı ve dağıtım sistemi üzerine etkileri, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Sempozyumu FEEB 2011, Fırat Üniversitesi, Elazığ.

Yalın, B. (2018). Bitümlü Sıcak Karışım Üstyapı Tabaka Kalınlıklarının Zaman Domeninde Sonlu Farklar Yöntemi ile Elektromanyetik Benzetimi. Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya.

Yamauchi, M. (t.y.). Tesla Charging: The Complete Guide To Charging At Home, In Public and Autonomously [Blog yazısı]. Erişim adresi: <https://pluglesspower.com/learn/tesla-model-s-charging-home-public-autonomously/>. Erişim tarihi: 16.08.2024.

Yang, Y., Gupta, M.C., Dudley, K.L. (2007). Towards cost-efficient EMI shielding materials using carbon nanostructure-based nanocomposites. Nanotechnology, 18(34), Article 345701. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/18/34/345701>.

Yeoh, S.L., Yee, S.K., Ong, N.T.J., Dahlan, S.H., Sia, C.K. (2020). Shielding effectiveness measurement of cement-graphite block in between 3.8 GHz to 6 GHz. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics, 9(2), 716–721. <https://doi.org/10.11591/eei.v9i2.1848>.

Yıldırım, İ.Z., Prezzi M. (2011). Chemical, Mineralogical, and Morphological Properties of Steel Slag, Advances in Civil Engineering, 1687-8086. DOI: 10.1155/2011/463638.

Yıldırım, İ. Z. (2022). Türkiye’de Çıkan Endüstriyel Yan Ürünlerin Dolgu Özellikleri Üzerine DeneySEL Bir İnceleme. Teknik Dergi, 33(6), 12789-12815. <https://doi.org/10.18400/tekderg.847828>.

Yılmaz, A. (2002). Antalya Ferrookrom İşletmesinin Elektrik-Ark Fırını Cürufklarının ve Baca Tozu Atıklarının Asfalt Betonunda Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Akdeniz Üniversitesi, Antalya.

Yılmaz, A. (2008). Ferrookrom ve Silikoferrookrom Cürufkları ile Silis Dumanının Yol Üstyapısında Kullanımının İncelenmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

Yılmaz, A., Sütas, İ. (2015). Ferrookrom Cürufu Kullanılarak Hazırlanan Asfalt Betonu Numunelerinin Mühendislik Özellikleri. Akdeniz Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Antalya.

Yılmaz, A., Yıldız, A.H. (2015). Cüruf Atıklarının Yol İnşaatında Kullanılması Durumunda Çevresel Etkileri. Uluslararası Burdur Deprem ve Çevre Sempozyumu, s. 267-279 Burdur.

Yılmaz, A., Karaşahin, M. (2010). Mechanical properties of ferrochromium slag in granular layers of flexible pavements, *Materials and Structures* 43:309–317. DOI 10.1617/s11527-009-9490-2.

Yılmaz, M., Kök, B. V. (2008). Ferrokrom cürufu kullanımının bitümlü sıcak karışımların mekanik özelliklerine etkisi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 12-3 186-194.

Yılmaz, R. (2014). Elektromanyetik Kalkanlama Özelliği Olan Malzemeler. *Ejovoc (Electronic Journal of Vocational Colleges)*, 4(1), 136-150. <https://doi.org/10.17343/ejovoc.01577>.

Yihan, S., Quantao, L., Shaopeng, W., Fei, S. (2014). Microwave Heating of Steel Slag Asphalt Mixture Key Engineering Materials, Vol 599, pp 193-197. Trans Tech Publications, Switzerland. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.599.193.

Yüçetürk, G. (2010). Yapay Mermerde kullanılan kuvars ve kalsit minerallerinin fiziko-meknik özellikleri. *SDU International Journal of Technological Science*, 2(3), 72-80.

Zelic, J. (2005). Properties of Concrete Pavements Prepared with Ferrochromium Slag as Concrete Aggregate. *Cement and Concrete Research* 35, 2340 – 2349. DOI: 10.1016/j.cemconres.2004.11.019.

Zhang, J., Gong, C., Lu, L., Wang, S., Hou, P. (2015). Effect of MgO on the Composition and Properties of Belite-Barium Calcium Sulphoaluminate Cement in the Presence of Na₂O and K₂O. *Ceramics – Silikáty*, 59 (2): 135-144.

Zhang, Z.Q., Luo, Y.F., Huang, S.L., Zhang, K. (2019). Evaluation of temperature reduction and pavement performance of floating beads asphalt mixture, *Int. J. Pavement Eng.* 20 (3) 349–356. <https://doi.org/10.1080/10298436.2017.1293267>.

Zheng, M.L., Han, L.L., Wang, F., Mi, H.C., Li, Y.F., He, L.T. (2015). Comparison and analysis on heat reflective coating for asphalt pavement based on cooling effect and anti-skid performance. *Construction and Building Materials*, 93 1197–1205. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.04.043.

Zumrawi, M.M., Khalil, F.O. (2017). Experimental Study of Steel Slag Used as Aggregate in Asphalt Mixture, *American Journal of Construction and Building Materials*, 2 (1) 26–32. DOI: 10.11648/j.ajcbm.20170201.14.

