T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

MERMER VE ARDUVAZ TOZU KULLANILARAK ÜRETİLEN ÇEVRE DOSTU CAM LİFLİ BETONLARIN TAGUCHİ YÖNTEMİYLE OPTİMİZASYONU

YÜKSEK LİSANS

Elif HALAT KESGİN

HAZİRAN-2025
GÜMÜŞHANE

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

MERMER VE ARDUVAZ TOZU KULLANILARAK ÜRETİLEN ÇEVRE DOSTU CAM LİFLİ BETONLARIN TAGUCHİ YÖNTEMİYLE OPTİMİZASYONU

OPTIMIZATION OF ECO-FRIENDLY GLASS FIBER REINFORCED CONCRETES PRODUCED USING MARBLE AND SLATE POWDER BY TAGUCHI METHOD

YÜKSEK LİSANS

Elif HALAT KESGİN

HAZİRAN-2025
GÜMÜŞHANE

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

MERMER VE ARDUVAZ TOZU KULLANILARAK ÜRETİLEN ÇEVRE DOSTU CAM LİFLİ BETONLARIN TAGUCHİ YÖNTEMİYLE OPTİMİZASYONU

OPTIMIZATION OF ECO-FRIENDLY GLASS FIBER REINFORCED CONCRETES PRODUCED USING MARBLE AND SLATE POWDER BY TAGUCHI METHOD

YÜKSEK LİSANS

Elif HALAT KESGİN

Danışman: Prof. Dr. Özlem ÇAVDAR

HAZİRAN-2025
GÜMÜŞHANE

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlamış olduğum "**Mermer ve Arduvaz Tozu Kullanılarak Üretilen Çevre Dostu Cam Lifli Betonların Taguchi Yöntemiyle Optimizasyonu**" isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirtiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi'nin lisanslı kullanıcısı olduğu intihal yazılım programı ile Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlediği kıstaslara uygun olarak raporladığımı taahhüt ederim. Tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü arşivinde saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca gereğinin yapılmasını arz ederim.

18/06/2025

Elif HALAT KESGİN

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca desteğini ve yardımını hiçbir zaman eksik etmeyen, eğitimimi tamamlamamda her zaman beni motive ederek bilgi ve tecrübelerini aktaran danışman hocam Sayın **Prof. Dr. Özlem ÇAVDAR'a** saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmasında numunelerin üretimi sırasında kullandığım Karadeniz Hazır Beton Santralinde görev yapan Emre YILMAZ ve İbrahim ŞAHİN'e, deneylerin yapılmasında kullandığım Kaya Mühendislik Laboratuvarından Ali BİRİNCİ'ye, Turhan SİVRİKAYA'ya yardımlarından dolayı çok teşekkür ederim. Deneylerin yapılması sırasında kullandığım Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi İnşaat bölümü laboratuvarını kullanmamda bana çok yardımı bulunan Öğr. Gör. Mehmet Selçuk GÜNER hocama çok teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi manevi desteklerini eksik etmeyen, tez çalışmamı tamamlamamda bana büyük katkılar sağlayan anne, babama ve kardeşlerime çok teşekkür ederim.

Son olarak yüksek lisans eğitimim boyunca hep yanımda olan ve beni destekleyen sevgili eşim Kemal KESGİN'e ve canım kızım Zeynep KESGİN'e çok teşekkür ederim.

Elif HALAT KESGİN

GÜMÜŞHANE – 2025

ÖZET

Bu çalışmada, atık mermer tozu ve arduvaz tozunun çimento yerine belli oranlarda kullanılmasıyla üretilen betonda çimento oranının azaltılmasıyla hem ekonomik beton üretilmesi hem de atık malzemenin değerlendirilmesiyle çevre dostu beton üretimi hedeflenmiştir. Bu amaçla atık mermer tozu ve arduvaz tozu çimento yerine kütlece %5; %10; %15; %20 oranında kullanılmıştır. Ayrıca betonun çekme dayanımını artırmak için cam lifinin hacimce %0.25; %0.50; %0.75 ve %1.00 oranlarında değiştirilerek kullanılmasıyla üretilen çevre dostu betonun fiziksel ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bunun için üretilen taze betonda slump deneyi, hava muhtevası deneyleri yapılmıştır. Hazırlanan numuneler kür ortamında 7 ve 28 gün bekletilerek sertleşmiş beton elde edilmiştir. Elde edilen bu sertleşmiş beton üzerinde basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ultrases geçiş hızı, test çekici deneyleri yapılmıştır. Uygulanan deneyler sonucunda taze ve sertleşmiş betonun dayanım ve dayanıklılık özellikleri incelenmiştir. 28 gün boyunca magnezyum sülfat çözeltisi içerisinde bekletilen numuneler üzerinde ise basınç dayanım deneyi ve test çekici deneyi yapılmış ve sülfata maruz bırakılmamış numunelerle karşılaştırılmıştır. Bu çalışmada birçok farklı deney noktası içerisinden optimum oranlara sahip numuneleri belirlemek amacıyla, bilim çevreleri ve literatür tarafından doğruluğu kabul edilen ve istatiksel yöntemlerden Taguchi metodu kullanılmıştır. Birçok ara yüz program tarafından da kullanılan bu yöntem için Minitab İstatistik Yazılımı programı çalışmada kullanılmıştır. Çalışmada üretilen numunelerin morfolojik yapılarını belirlemek için mikroyapı (SEM, XRD) analizleri de gerçekleştirilmiştir.

Bu deneyler sonucunda genel itibariyle beton karışımında mermer tozunun %5'e kadar kullanımı, arduvaz tozunun %10'a kadar kullanımı ve cam elyafında %0.5'e kadar kullanımının sonuçlara olumlu olarak yansıdığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Atık arduvaz tozu, Atık mermer tozu, Cam lif, Dayanım ve Dayanıklılık özellikleri, İstatistiksel Yöntem

SUMMARY

In this study, the goal was to produce an environmentally friendly and cost-effective concrete by partially replacing cement with waste marble powder and slate powder. These materials were incorporated into the concrete mix at replacement levels of 5%, 10%, 15%, and 20% by mass. Additionally, to enhance the tensile strength of the concrete, glass fiber was added at varying volume fractions of 0.25%, 0.50%, 0.75%, and 1.00%.

To evaluate the fresh properties of the concrete, slump and air content tests were performed. The prepared specimens were cured for 7 and 28 days to assess their hardened characteristics. After curing, the hardened concrete samples underwent compressive strength testing, splitting tensile strength testing, ultrasonic pulse velocity (UPV) analysis, and rebound hammer tests.

Furthermore, some specimens were immersed in a magnesium sulfate solution for 28 days to assess their resistance to sulfate attack. These samples were then tested for compressive strength and rebound hammer values and compared to the control specimens not exposed to the sulfate solution.

To identify the optimal material combinations among the various test parameters, the Taguchi method a widely recognized and statistically reliable approach was employed, using Minitab statistical software. Microstructural analysis techniques such as Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray Diffraction (XRD) were also utilized to examine the morphology of the produced concrete samples.

Based on the results, it was observed that incorporating marble powder up to 5%, slate powder up to 10%, and glass fiber up to 0.5% had a generally positive impact on the mechanical and durability performance of the concrete.

Keywords: Waste slate dust, Waste marble dust, Glass fiber, Strength and Durability properties, Statistical Method

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY III
BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI IV
TEŞEKKÜR V
ÖZET VI
SUMMARY VII
İÇİNDEKİLER VIII
TABLOLAR DİZİNİ XI
ŞEKİLLER DİZİNİ XIII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ XV
1. GENEL BİLGİLER 1
1.1. Giriş 1
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı 3
1.3. Mermer Hakkında Genel Bilgiler 5
1.3.1. Mermerin Tanımı ve Mermerin Oluşumu 5
1.3.2. Mermerlerin Özellikleri 5
1.3.3. Mermer Atıklarının Oluşumu 6
1.3.4. Mermer Atıklarının Betonda Kullanımı ve Değerlendirilmesi 7
1.3.5. Türkiye'de Mermer Rezervi 8
1.4. Arduvaz Hakkında Genel Bilgiler 9
1.4.1. Arduvazın Tanımı ve Arduvazın Oluşumu 9
1.4.2. Arduvazın Mekanik ve Fiziksel Özellikleri 9
1.4.3. Arduvazın (Kayrak Taşlarının) Kullanım Alanları 10
1.5. Lifli Betonlar 11
1.5.1. Lifli Betonların Taze ve Sertleşmiş Beton Özellikleri 12
1.5.2. Lifli Betonların Basınç Dayanımları 12
1.5.3. Lifli Betonların Eğilme Dayanımları 12
1.5.4. Lifli Betonların Çekme Dayanımları 13
1.5.5. Cam Elyaflar 13
1.5.6. Cam Elyaf Katkılı Betonların Özellikleri 14
1.5.7. Cam Elyaflı Betonların Kullanım Alanları 15
1.6. Çevre Dostu Beton 16
1.7. Beton Numunelerine Sülfat Etkisi 17

1.7.1. Magnezyum Sülfat Etki Mekanizması 18
1.8. Literatür Araştırması 19
2. MALZEME VE YÖNTEM 30
2.1. Malzemeler 30
2.1.1. Çimento 30
2.1.2. Agrega 30
2.1.3. Kimyasal Katkılar 31
2.1.4. Mermer Tozu 32
2.1.5. Arduvaz Tozu 33
2.1.6. Cam Elyaf 33
2.1.7. Karışım Suyu 34
2.1.8. Hava 34
2.2. Yöntem 34
2.2.1. Taguchi Yöntemi 34
2.2.2. Beton Karışım Hesapları 37
2.2.3. Beton Numunelerinin Hazırlanması 40
2.3. Taze Beton Deneyleri 42
2.3.1. Slump (Çökme) Deneyi 42
2.3.2. Hava Muhtevası Tayini Deneyi 43
2.4. Sertleşmiş Beton Deneyleri 44
2.4.1. Basınç Dayanımı Deneyi 44
2.4.2. Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi 45
2.4.3. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi 46
2.4.4. Geri Sıçrama (Test Çekici) Deneyi 47
2.5. Sülfat Direnci Deneyi 47
2.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi 47
2.7. XRD Analizi 48
3. BULGULAR 49
3.1. Taze Beton Deney Sonuçları 49
3.1.1. Slump (Çökme) Deneyi Sonuçları 49
3.1.2. Hava Muhtevası Deney Sonuçları 53
3.2. 7 Günlük Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları 57
3.2.1. 7 Günlük Basınç Dayanım Deneyi Sonuçları 57
3.2.2. 7 Günlük Yarmada Çekme Dayanım Deney Sonuçları 62
3.2.3. 7 Günlük Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları 66

3.2.4. 7 Günlük Test Çekici (Schmidt) Deneyi Sonuçları 71
3.3. 28 Günlük Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları 75
3.3.1. 28 Günlük Basınç Dayanım Deneyi Sonuçları 75
3.3.2. 28 Günlük Yarmada Çekme Dayanım Deneyi Sonuçları 80
3.3.3. 28 Günlük Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları 84
3.3.4. 28 Günlük Test Çekici (Schmidt) Deneyi Sonuçları 89
3.4. Sülfat Deney Sonuçları 93
3.4.1. Basınç Dayanımı Sonuçları 93
3.4.2. Test Çekici Sonuçları 94
3.5. SEM Analizi 95
3.6. XRD Analizi 99
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 101
KAYNAKÇA 105
ÖZGEÇMİŞ 115

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo 1. TS 3340'a göre sülfat (SO_4^{-2}) iyonlarının zararlı etkinlik dereceleri (Dikme, 2010). 18
Tablo 2. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri 30
Tablo 3. Agrega Özellikleri 31
Tablo 4. Süperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri 32
Tablo 5. Kullanılan mermer tozunun özellikleri 32
Tablo 6. Kullanılan arduvaz tozunun özellikleri 33
Tablo 7. Cam Elyaf Özellikleri 33
Tablo 8. Deney parametreleri ve seviyeleri 36
Tablo 9. L16 ortogonal dizini 36
Tablo 11. L16 ortogonal dizisindeki serilerin $1m^3$ için karışım miktarları 39
Tablo 12. Slump (Çökme) deneyi S/N oranları 49
Tablo 13. S/N oranları için yanıt tablosu 51
Tablo 14. Ortalamalar için yanıt tablosu 51
Tablo 15. Slump deneyi varyans analiz sonuçları 52
Tablo 16. Slump tahmini analizi ve doğrulama deney sonuçları 52
Tablo 17. Hava Muhtevası deneyi ortalama etki değerleri 54
Tablo 18. S/N oranları için yanıt tablosu 55
Tablo 19. Ortalamalar için yanıt tablosu 55
Tablo 20. Hava Muhtevası deneyi varyans analiz sonuçları 56
Tablo 21. Hava muhtevası deneyi tahmini analizi ve doğrulama deney sonuçları 56
Tablo 22. Basınç dayanımı S/N oranları 58
Tablo 23. S/N oranları için yanıt tablosu 59
Tablo 24. Ortalamalar için yanıt tablosu 60
Tablo 25. Basınç dayanımı varyans analiz sonuçları 60
Tablo 26. Basınç dayanımı analizi ve doğrulama deney sonuçları 61
Tablo 27. Yarmada çekme dayanımı S/N oranları 62
Tablo 28. S/N oranları için yanıt tablosu 64
Tablo 29. Ortalamalar için yanıt tablosu 64
Tablo 30. Yarmada çekme dayanımı varyans analiz sonuçları 65
Tablo 31. Yarmada çekme dayanımı tahmini analizi ve doğrulama deney sonuçları 65
Tablo 33. S/N oranları için yanıt tablosu 68

Tablo 34. Ortalamalar için yanıt tablosu 69
Tablo 35. Ultrases geçiş hızı deneyi varyans analiz sonuçları 69
Tablo 36. Ultrases geçiş hızı tahmini analizi ve doğrulama deney sonuçları 70
Tablo 37. Test çekici deneyi S/N oranları 71
Tablo 38. S/N oranları için yanıt tablosu 73
Tablo 39. Ortalamalar için yanıt tablosu 73
Tablo 40. Test çekici deneyi varyans analiz sonuçları 74
Tablo 41. Test çekici tahmini analizi ve doğrulama deney sonuçları 74
Tablo 42. Basınç dayanımı S/N oranları 76
Tablo 43. S/N oranları için yanıt tablosu 77
Tablo 44. Ortalamalar için yanıt tablosu 78
Tablo 45. Basınç dayanımı varyans analiz sonuçları 78
Tablo 46. Basınç dayanımı analizi ve doğrulama deney sonuçları 79
Tablo 47. Yarmada çekme dayanımı S/N oranları 80
Tablo 48. S/N oranları için yanıt tablosu 82
Tablo 49. Ortalamalar için yanıt tablosu 82
Tablo 50. Yarmada çekme dayanımı varyans analiz sonuçları 83
Tablo 51. Yarmada çekme dayanımı tahmini analizi ve doğrulama deney sonuçları 83
Tablo 52. Ultrases Geçiş Hızı deneyi S/N oranları 85
Tablo 53. S/N oranları için yanıt tablosu 86
Tablo 54. Ortalamalar için yanıt tablosu 87
Tablo 55. Ultrases geçiş hızı deneyi varyans analiz sonuçları 87
Tablo 56. Ultrases geçiş hızı tahmini analizi ve doğrulama deney sonuçları 88
Tablo 58. S/N oranları için yanıt tablosu 91
Tablo 59. Ortalamalar için yanıt tablosu 91
Tablo 60. Test çekici deneyi varyans analiz sonuçları 92
Tablo 61. Test çekici tahmini analizi ve doğrulama deney sonuçları 92
Tablo 62. Sülfat çözeltisinde bekletilen numuneler ile sülfata maruz bırakılmamış numunelerin basınç dayanımları 94
Tablo 63. Sülfat çözeltisinde bekletilen numuneler ile sülfata maruz bırakılmamış numunelerin basınç dayanımları 94

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. İnce (a) ve İri Agrega (b) 31
Şekil 2. Mermer Tozu 32
Şekil 3. Arduvaz tozu 33
Şekil 4. Cam Elyaf 34
Şekil 7. Harcın kalıplara doldurulması (a), kalıpların isimlendirilmesi (b) 41
Şekil 8. Kalıptan çıkarılan beton numuneleri 41
Şekil 9. Numunelerin kür havuzunda bekletilmesi 42
Şekil 10. Slump (Çökme) deneyi 43
Şekil 11. Hava Muhtevası deneyi 44
Şekil 12. Basınç dayanım deney makinası 45
Şekil 13. Yarmada çekme dayanımı deney makinası 46
Şekil 14. Ultrases geçiş hızı deneyi 47
Şekil 15. Parametre seviyelerine göre slump deneyi S/N oranları 50
Şekil 16. Parametre seviyelerine göre slump deneyi ortalama etki grafiği 50
Şekil 17. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği 53
Şekil 18. Parametre seviyelerine göre hava muhtevası deneyi S/N oranları 54
Şekil 19. Parametre seviyelerine göre hava muhtevası deneyi ortalama etki grafiği 55
Şekil 20. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği 57
Şekil 21. Parametre seviyelerine göre basınç dayanımında S/N oranları 58
Şekil 22. Parametre seviyelerine göre basınç dayanımı ortalama etki grafiği 59
Şekil 22. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği 61
Şekil 23. Parametre seviyelerine göre yarmada çekme dayanımı S/N oranları 63
Şekil 24. Parametre seviyelerine göre yarmada çekme dayanımı ortalama etki grafiği 63
Şekil 25. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği 66
Şekil 26. Parametre seviyelerine göre ultrases geçiş hızı S/N oranları 67
Şekil 27. Parametre seviyelerine göre ultrases geçiş hızı ortalama etki grafiği 68
Şekil 28. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği 70
Şekil 29. Parametre seviyelerine göre test çekici deneyi S/N oranları 72
Şekil 30. Parametre seviyelerine göre test çekici deneyi ortalama etki grafiği 72
Şekil 31. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği 75
Şekil 32. Parametre seviyelerine göre basınç dayanımında S/N oranları 76
Şekil 33. Parametre seviyelerine göre basınç dayanımı ortalama etki grafiği 77

Şekil 34. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği 79
Şekil 35. Parametre seviyelerine göre yarmada çekme dayanımı S/N oranları 81
Şekil 36. Parametre seviyelerine göre yarmada çekme dayanımı ortalama etki grafiği. 81
Şekil 37. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği 84
Şekil 38. Parametre seviyelerine göre ultrases geçiş hızı S/N oranları..... 85
Şekil 39. Parametre seviyelerine göre ultrases geçiş hızı ortalama etki grafiği 86
Şekil 40. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği 88
Şekil 42. Parametre seviyelerine göre test çekici deneyi ortalama etki grafiği..... 90
Şekil 43. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği 93
Şekil 45. Referans numunesi sem görüntüsü..... 95
Şekil 46. Referans Numunesi sem görüntüsü..... 96
Şekil 47. C0.25-MT10-AT10 numunesi SEM görüntüsü 96
Şekil 48. C0.25-MT10-AT10 numunesi SEM görüntüsü 97
Şekil 49. CE1-MT15-AT10 numunesi SEM görüntüsü..... 98
Şekil 50. CE1-MT15-AT10 numunesi SEM görüntüsü..... 98
Şekil 51. Referans numunesi XRD analizi..... 99
Şekil 52. CE0.25-MT10-AT10 numunesi XRD analizi..... 100
Şekil 53. CE1-MT15-AT10 numunesi XRD analizi 100

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ACI : Amerikan Beton Enstitüsü
°C : Santigrat derece
Al_2O_3 : Alüminyum oksit
ANOVA : Tek yönlü varyans analizi
ASTM : Amerikan Test ve Malzeme Derneği
AT : Arduvaz tozu
C_3A : Trikalsiyum alüminat
C_3S : Trikalsiyum silikat
$CaCO_3$: Kalsiyum karbonat
CaO : Kalsiyum oksit
CE : Cam elyaf
CEM : Cement
cm : Santimetre
CO_2 : Karbondioksit
C-S-H : Kalsiyum silika hidrat
DF : Serbestlik derecesi
Dmax : Maksimum tane çapı
DPT : Devlet Planlama Teşkilatı
F : En büyük yük
Fe_2O : Demir oksit
gr : Gram
kg : Kilogram
m : Metre
m^3 : Metreküp
MgO : Magnezyum oksit
$MgSO_4$: Magnezyum sülfat
mm : Milimetre
MPa : Megapaskal
MS : Ortalama kare
MT : Mermer tozu
Na_2O : Sodyum oksit
R-Sq : Düzeltilmiş R-kare

S/Ç : Su/Çimento

S/N : Sinyal/Gürültü

s^2 : Varyans

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu

SiO_2 : Silisyum dioksit

Si-Sb : Antimon

SO_3^{-2} : Kükürt trioksit

SS : Kareler toplamı

TS : Türk Standartları

Y : Performans karakteristiği

XRD : X-Işını Kırınımı

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Günümüzde hızlı sanayileşmeyle birlikte malzeme ve enerji tasarrufu büyük önem arz etmektedir. Beton üretiminde atık malzemelerin kullanılarak çevre dostu beton üretilmesiyle hem malzeme tasarrufu sağlanmakta hem de çevre kirliliğinin önüne geçilmektedir. Atık malzemelerin çimento yerine ikame edilmesiyle birlikte çimento oranının azaltılması da karbon salınımını azaltmakta ve enerji tasarrufu sağlamaktadır. Ayrıca beton üretiminde lif kullanılmasıyla betonun gevreklik özelliği azaltılmaktadır.

Beton; agrega, çimento, su ve gerektiğinde katkı maddelerinin (kimyasal, mineral vb.) belli şartlar ve oranlarda karıştırılmasıyla elde edilen, ilk başta şekil verilebilen plastik formda olup, zamanla çimento ve suyun kimyasal reaksiyona girerek (hidratasyon) sertleşmesiyle mukavemet kazanan, harç fazı ve agregadan oluşan kompozit bir yapı malzemesidir (Çavdar, 2008).

Beton her zaman yapı malzemesi dünyasında geçerliliğini sürdürmüş ve çağımızda da en çok kullanılan yapı malzemesidir. Dayanım ve dayanıklılık özellikleri, kolay işlenebilirliği, şantiyede ve şantiye dışı alanlarda (beton tesislerinde) ileri teknoloji gerektirmeden, ekonomik olarak üretilebilmesi nedeniyle vazgeçilmez bir yapı malzemesi haline gelmiştir (Polat ve Özel, 2012).

Beton sektörünün gelişme tarihi 1850'li yıllara dayanmaktadır. 19.yüzyılın başlarında betonarme yapıların kullanımı önem kazanmıştır. Bu sektörün önem kazanmasının nedenleri arasında, üretiminde kullanılan malzemelerin kolay ve ucuz temin edilmesi, kıvamının plastik olması nedeniyle istenilen kalıba yerleştirilebilir olması, estetik amaçlı kullanılabilmesi, bakımının basit, maliyetinin düşük olması gösterilebilir. Beton dayanıklılığı, kolay işlenebilirliği, ekonomikliği nedeniyle konutlar, eğitim binaları, hastane binaları, barajlar, köprüler, yollar, alt yapı tesisleri gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Akman, 1987).

Betonun dayanım ve dayanıklılığını, beton karışım hesabının doğru yapılması, betonu oluşturan malzemelerin doğru seçilmesi, döküm sırasında sıkıştırma işleminin iyi yapılması, uygun hava şartlarında beton dökümünün yapılması ve kürleme işleminin düzenli bir şekilde yapılması gibi faktörler etkilemektedir (Bekem vd., 2009).

Betonun fiziksel ve kimyasal özeliklerinin iyileştirilmesi için kimyasal, mineral ve fiber katkı maddeleri kullanılmaktadır. Beton katkı sektöründeki gelişmeler, beton

bileşenlerinde farklı karışım oranlarına imkân vermekte ve böylece betonun taze ve sertleşmiş özeliklerini kontrol etme olanağını sağlamaktadır (Özel, 2007).

Taze ve sertleşmiş betonda farklı özellikler bulunmaktadır. Taze betonda kolay işlenebilme, ayrışmaya uğramadan kolayca taşınabilme, pompalanabilir olması, kolayca kalıba yerleştirilmesi, sertleşmiş betonun da ise basınç, çekme, eğilme ve kayma etkisi oluşturacak yüklerin etkisi altında betonun şekil değiştirmeye ve kırılmaya karşı mukavemetinin iyi olması istenmektedir (Postacıoğlu, 1987).

Beton üretiminde, hem maliyeti azaltmak hem de yüksek dayanım elde etmek için birçok çalışma gerçekleştirilmektedir. Çağımızda hızlı sanayileşmeyle birlikte malzeme ve enerji tasarrufu da önem kazanmaktadır. Bununla birlikte atık olarak doğaya bırakılan ve doğanın daha çok kirlenmesine neden olan birçok yan ürün meydana gelmektedir. Bu ürünlerin malzeme özellikleri bakımından inşaat sektöründe değerlendirilebileceği yapılan çalışmalar sonucunda belirlenmiştir (Karahan, 2006).

Mevcut teknolojinin gelişmesiyle birlikte çimento teknolojisi de gelişmektedir. Bu gelişmeler genellikle yeni standart dışı çimento karışımlarının araştırılması ve geliştirilmesi ve bunların standardizasyonu alanındadır. Bir taraftan basınç dayanımı yüksek, kimyasal etkilere dayanıklı, korozyona dayanıklı, yoğunluğu düşük standart üstü çimentolar üretilmeye çalışılırken, öbür taraftan çevreyi kirleten birçok sanayi atığının katkı maddesi olarak kullanılmasını amaçlayan, fakat daha ucuza mal olan standart altı çimentoların üretilmesi üzerinde çalışılmaktadır (Ergi vd., 2007).

Çeşitli endüstriyel atıkların çimento üretiminde kullanılması, üretim maliyetlerinin düşürülmesi, malzemenin çeşitli özelliklerinin iyileştirilmesi ve hammadde kaynaklarından tasarruf sağlanması gibi amaçlara hizmet etmektedir. Bu malzemelerin çoğunluğu puzolanik özeliğe sahip olmaktadır. Bu amaçla kullanılan endüstriyel atıklardan en önemlileri silisyum metalinin veya ferro-silisyum alaşımlarının üretiminden ortaya çıkan silis dumanı, mermer fabrikalarında kesme işlemi esnasında açığa çıkan atık mermer tozu ve uçucu küller vb. malzemelerdir (Ergi vd., 2007).

Yapılan çalışmalarda mermer atıklarının değerlendirilmesi ile ilgili birçok çalışma bulunduğu görülmektedir. Çalışmalar incelendiğinde çoğunluğunun mermer toz atıklarının değerlendirilmesi ile ilgili olduğu görülmektedir (Uğur ve Gündüz, 1995). Mermer toz atıklarının değerlendirilmesi, mermer işletmecilerine ve ülke ekonomisine katkı sağlamanın yanında bu atıkların çevreyi kirletmesinin önlenmesi açısından da büyük önem arz etmektedir (Yıldız ve Eskikaya, 1995).

Betonun dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin iyileştirilmesinde kimyasal ve minaral katkılarının yanı sıra liflerde kullanılmaktadır. Lifler, betonun dayanımının

artırılması amacıyla taze beton içerisine değişik oranlarda katılan cam elyaf, polipropilen, plastik ve çelik gibi malzemelerden farklı özellik ve boyutlarda üretilmektedir. Beton içerisinde kullanılacak lifin tipi, uzunluğu, çapı, geometrik yapısı ve çekme gerilme dayanımı önemlidir. Lifli betonlarda karışıma giren parametrelerden beton özelliklerini etkileyen en önemli faktör lifin narinlik oranı ve lif miktarıdır. Ayrıca katılan liflerin karışım içerisinde homojen olarak dağılması ve betonun yerleştirilmesi sırasında bu dağılımın korunması betonun dayanımının iyileştirilmesi üzerinde doğrudan etkilidir. Günümüzde betonda en yaygın kullanılan lifler cam elyaf, çelik, polipropilendir (Karahan, 2006).

Lifler, betonda meydana gelen ani çatlakların önlenmesinde, betonun sünek davranış göstermesinde, oluşan deformasyonlarda betonun yük taşıma kapasitesinin artmasında ve betonun enerji yutma kapasitesini artırmaktadır. Kullanılan bağlayıcı miktarının artmasıyla artan lif-matris aderansı göçme davranışını etkilemekte ve lif sıyrılma davranışından çok daha az enerji yutan lif kopması olayının gerçekleşmesine sebep olmaktadır (Bornemann ve Schmidt, 2002).

Günümüzde yaygın olarak kullanılan çeşit türlerde lifler bulunmaktadır. Beton karışımına liflerin ilave edilmesiyle Lif takviyeli betonlar elde edilmektedir. Cam lif takviyeli beton (CLTB), lif takviyeli betonlarından biridir. Cam lif ilaveli beton agrega, çimento ve düzensiz dağılmış liflerin suyla birlikte karıştırılmasıyla elde edilen bir malzemedir.

Geleneksel deney tasarımında, bir etken değiştirilirken diğer tüm etkenlerin sabit tutulması gerekir. Deney tasarımında mertebeler ve etkenler arttıkça deney sayısında da artış olacaktır. Deney sayısının çok fazla olmasından dolayı böyle bir tasarımın yapılması mümkün olmayacaktır. Ayrıca etkenler arasında iç etkileşim bulunması durumunda geleneksel deney tasarımına göre bulunan ideal koşullarla, gerçek ideal koşullar aynı olmayabilir. Bir deney tasarımı yöntemi olan Taguchi yöntemi, sistematik tasarımların iyileştirilmesi amacıyla kullanılan bir yöntemdir (Bayrak, 2007).

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tez çalışmasında, mermer ocaklarında mermer kesimi sırasında açığa çıkan atık mermer tozu ve yapılarda iç ve dış kaplamalarda kullanılan arduvaz tozunun çimentoyla %5; %10; %15 ve %20 oranında yer değiştirilmesi suretiyle ve betonun gevreklik özelliğini gidermek için cam lifi hacimce %0.25; %0.50; %0.75 ve %1.00 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmasıyla çevre dostu beton üretilmesi hedeflenmiştir. Bu çalışmada doğada kirliliğe yol açan atık mermer tozu ve arduvaz tozunun çimento yerine

kullanımıyla hem beton karışımdaki çimento miktarının azaltılması dolayısıyla daha ekonomik bir beton üretiminin sağlanması hem de atık malzemelerin değerlendirilip çevre kirliliğinin önlenmesi amaçlanmıştır. Ayrıca beton karışımına cam elyaf eklenerek üretilecek beton numunelerinin basınç, çekme dayanımı ve sünekliğinin artırılması hedeflenmiştir.

Çalışma kapsamında atık mermer tozu ve arduvaz tozu çimento yerine belli oranlarda kullanılması ve ayrıca karışıma cam elyafın eklenerek daha dayanıklı, çevre dostu ve ekonomik bir beton üretimi yapılmıştır. Bu kapsamda Trabzon ili mermer ocağından mermer kesimi sırasında açığa çıkan atık mermer tozu ve Trabzon ili taş ocağından atık arduvaz tozu temin edilerek laboratuvar ortamında bu malzemelerin fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Camelsan Sanayi A.Ş. tarafından üretilen kırpılmış 12 mm'lik cam lif kullanılmıştır. Trabzon ili çimento fabrikasından temin edilen çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri belirlenmiştir. Karışımda karma suyu olarak Trabzon ili şebeke suyu kullanılmıştır. Katkı maddesi olarak Sika ViskoCrete-4087 Hi-Tech süperakışkanlaştırıcı beton katkı maddesi kullanılmıştır. Bütün malzemelerin tip ve özellikleri belirlendikten sonra TS 802'ye göre karışım hesapları yapılmış ve kullanılacak malzemelerin karışımdaki miktarları belirlenmiştir. Taguchi yöntemi kullanılarak L16(4^3) ortogonal dizini belirlenmiştir. Belirlenen bu ortogonal dizine göre atık mermer tozu ve atık arduvaz tozu çimento yerine %5; %10; %15; %20 oranında, cam lifi ise hacimce %0.25; %0.50; %0.75 ve %1.00 oranında ilave edilerek çevre dostu lifli betonlar üretilmiştir. Hazırlanan taze beton karışımı üzerinde taze beton deneylerinden çökme (slump) ve hava muhtevası deneyleri yapılmıştır. Üretilen çevre dostu beton numuneler 150x150x150 mm^3 boyutlarındaki küp kalıplara yerleştirilmiştir. Hazırlanan numuneler 24 saat oda sıcaklığında bekletildikten sonra kalıplardan sökülerek kirece doygun ve sıcaklık derecesi (20°C ±2°C) olan ortamda kür havuzuna yerleştirilmiştir. Kür ortamında 7 gün bekleyen küp numuneler üzerinde sertleşmiş beton deneylerinden basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve test çekici deneyleri yapılmıştır.

Aynı şekilde kür ortamında 28 gün bekleyen küp numuneler üzerinde de sertleşmiş beton deneylerinden basınç, yarmada çekme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve test çekici deneyleri yapılmıştır. 150x150x150 mm'lik 3 adet küp numune 28 gün boyunca magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisi içerisinde bekletilen numuneler üzerinde basınç dayanım deneyi ve test çekici deneyi yapılmış ve sülfata maruz bırakılmamış numunelerle karşılaştırılmıştır.

1.3. Mermer Hakkında Genel Bilgiler

1.3.1. Mermerin Tanımı ve Mermerin Oluşumu

Bilimsel anlamda mermer, kalker ($CaCO_3$) ve dolomitik kalkerlerin ($CaMg(CO_3)_2$) sıcaklık ve basınç etkisi altında metamorfizmaya uğrayarak kristalleşmesi sonucu oluşan kayaçlardır. Birleşimlerinde %90-98 oranında $CaCO_3$ (kalsiyum karbonat) ve düşük miktarda $MgCO_3$ (magnezyum karbonat) bulunmaktadır. Aynı zamanda içerisinde az miktarlarda silika, silis, demir oksit, feldspat, mika, fluorin ve organik maddelerde yer almaktadır. Renkleri genellikle beyaz ve gridir. Fakat içerisinde bulunan yabancı maddeler nedeniyle kırmızı, sarı, mavimtırak ve siyah gibi renkleri de bulunmaktadır (Şentürk vd., 1995).

Endüstriyel tanımda mermer, kesilip cilalandığında parlayabilen, blok halinde kesilebilen, dayanıklı ve estetik görünümlü bir kayaç türüdür (DPT, 2001).

Ticari tanımda mermer, geniş bir alanı kapsar. İstenilen ebatlarda şekil verilerek kesilip parlatılabilen ve işlenebilen, malzeme özellikleri kaplama taşı standartlarına uyan her çeşit taş mermer olarak adlandırılmaktadır. Metamorfik (mermer, gnays, kuvarsit), tortul (kumtaşı, kalker, traverten), magmatik (andezit, bazalt, granit, siyanit) kayaçlarda mermer olarak tanımlanır (Bilensoy, 2010).

1.3.2. Mermerlerin Özellikleri

Mermerlerin fiziksel ve kimyasal özellikleri renk, cilalanabilme, saydamlık, sertlik damarlı yapı, dayanım, çözünme ve gözeneklilik olarak sıralanmaktadır. Bu özelliklere ait bazı bilgiler aşağıda verilmektedir. (Şimşek, 2019).

Renk, mermer içeriğinde yer alan minerallere göre değişiklik göstermektedir. Beyaz renkli mermerlerin saflık derecesi yüksektir. Mermerin renkli olması içerisinde farklı cinste mineraller bulundurduğunu işaret etmektedir (Şimşek, 2019).

Cilalanabilme mermer için önemli bir niteliktir. Her doğal taşın, belli oranda cila tutma kapasite vardır. Cila tutma kapasitesi yüksek olan mermerler, sektörde en çok tercih edilen mermer türüdür (Şimşek, 2019).

Saydamlık, mermerin ışık iletkenlik özelliğini göstermektedir. Saydamlık ve gözenekliliği artan mermerlerde mineral boyutu büyüdüğünden dekoratif amaçlı kullanılmaktadırlar (Şimşek, 2019).

Sertlik, mermerin içerisinde bulundurduğu silikatlara bağlıdır. Mermerin sertliği içerisindeki silikat yüzdesiyle doğrudan orantılı olmaktadır. Sert mermerlerin

cilalanabilme özelliğinin yüksek olması sebebiyle inşaat sektöründe daha çok tercih edilmektedirler (Şimşek, 2019).

Mermerin damarlı yapıda olması ana kaya yapısına göre değişen bir özellik olmakta ve mermerin dayanımını düşürmektedir. Mermerin yapısındaki kırık ve çatlaklar, mermerin en dayanıksız kısımlarıdır. Atmosferik olaylara maruz kalacak alanlarda kullanılan mermerler damarlı yapıda olmamalıdır (Şimşek, 2019).

Mermerin dayanımı mermerin içerdiği kalsit miktarına ($Ca(CO_3)$), mermerin içerdiği kristal boyutuna, yabancı madde oranına ve gözenekliliğine bağlı olarak değişmektedir (Şimşek, 2019).

Mermer katıksız kalsiyum karbonat bileşiminde olduğunda beyaz ve yarı saydam şekildedir. Renkleri genel olarak beyaz ve grimsi olmaktadır. Fakat içerisinde bulunan yabancı maddelerden dolayı mavimtırak, kırmızı, sarı, pembe, siyah renkleri de bulunmaktadır (Şentürk vd., 1996).

Kimyasal malzemelerin bir araya gelmesi sonucu makro oranda kalsiyum karbonat, magnezyum karbonatın yanı sıra silisyum dioksit, farklı metal oksitleriyle silikat mineralleri bulunmaktadır. Bileşimlerde %90-98 oranında $CaCO_3$ ve az miktarda $MgCO_3$ (magnezyum karbonat) yer almaktadır. $CaCO_3$ kristallerinden oluşan mermerlerde esas mineral kalsittir (Gücek, 2011).

1.3.3. Mermer Atıklarının Oluşumu

Mermer dünyanın yüzey tabakasına yakın olan yüzey bölgelerde bulunan bir maden türüdür. Ocaklarda birçok farklı yöntemle 15-20 tonluk bütün halde çıkarılan mermerler parçalanmak üzere atölye ve fabrikalara taşınırlar.

Mermer tozu, en küçük boyutlu mermer atıkları olup mermer işletmelerinde blokların ve plakaların kesilmesiyle ortaya çıkan ve büyük bir kısmı l mm'nin altında olan mermer tanecikleri olarak ifade edilmektedir. Kesme işleminin suyla yapılması sebebiyle mermer atıkları doğrudan suya karışır ve fosfojips şeklinde çöktürme havuzlarından veya kek olarak arıtma tesislerinde saklanır (Gürer ve Akbulut, 2005).

Mermerin ocaklarda ve işleme tesislerinde işlenmesi sırasında oldukça fazla miktarda mermer atığı meydana gelmektedir. Bu atıklar parça halinde mermer kırığı, toz halinde mermer tozu ve mermerin suyla kesimi sırasında mermer tozunun suyla birleşmesiyle oluşan mermer çamuru şeklinde ortaya çıkar (Bilgin ve Koç, 2013).

Mermer atıkları, oluştukları yere göre fabrika atıkları ve ocak atıkları olarak nitelendirilirler. Boyutlarına göre ise paledyenler, molozlar, kapaklar ve tozlar olarak nitelendirilirler (Filiz vd., 2010).

Ocakta ana kütleden kesilerek alınan ve çok büyük ebatlarda olan blokların yontulması sırasında "kapak" adı verilen parçalar meydana gelmektedir. Aynı zamanda mermer ocağında meydana gelen faylar, arızalar ve benzeri bozulmalardan ötürü blok üretimi yapılırken bulunan ve blok elde edilemeyen büyük boyuttaki ocak paşası adı verilen molozlar ortaya çıkmaktadır (Yıldız ve Eskikaya, 1995).

Mermerlerin parçalarına ayırma işleminde soğutma olarak su kullanıldığından ve toz önleyici olarak sulu parçalama yöntemi yapıldığından mermeri parçalama işlemi sırasında ortaya çıkan mikro boyutlu parçacıklar nemli olarak depolanmakta ve doğrudan üretim yerleri dışında bulunan sahalara gelişigüzel bırakılmaktadır (Alyamaç vd., 2009).

Mermer işletmelerinin büyüklüğü ve yoğunluğuna göre çamur ve parça mermer atıkları ortaya çıkmaktadır. Mermer atıklarının tarım arazilerine boşaltılması çevre, sağlık ve doğal görünümü bozucu etkiye sebep olmaktadır. Bu atık miktarları %75 oranını bulmaktadır. Mermer ocaklarında ve üretim tesislerinde kesim sırasında meydana çıkan atıklar rastgele bir şekilde çevreye bırakılmakta ve ciddi çevre sorunlarına yol açmaktadır (Yıldız, 2008). Bu atık ürünlerin geri kazanılabilir mekanizmalarla tekrar kullanılması hem çevresel açıdan hem de ekonomik açıdan kazançlar sağlamaktadır (Beycioğlu vd., 2008).

1.3.4. Mermer Atıklarının Betonda Kullanımı ve Değerlendirilmesi

Mermer atıkları canlı veya cansız varlıkların oluşturduğu habitatlara birçok zarar vermektedir. Bu atıklar toprağın gözenekliliğini düşürdüğünden dolayı malzemenin katma değerini azaltmaktadır. Mermer toz atıkları havada uçuşur ve havanın kirlenmesine yol açar. İnsan sağlığını olumsuz yönde etkiler ve nehirlerin kirlenmesine, suyun kalitesinin düşmesine sebep olmaktadır. Mermer atıklarının çevreye olan zararlarından dolayı birçok çalışma yapılmış ve bu atıkların inşaat sektöründe değerlendirilmesi sağlanmıştır (Çitoğlu ve Bayraktar, 2018).

Kaynakların sınırlı olduğu, tüketimin hızla arttığı bir dünyada atık yönetimi büyük bir önem kazanmaktadır. Ülkemizde inşaat sektöründe geri dönüşüm miktarı diğer gelişmiş ülkelere oranla daha azdır. İnşaat sektörü hammadde ihtiyacının en çok olduğu ve bu nedenle atık miktarının en fazla olduğu sektörlerden biridir. Özellikle mermer sanayisinde ocaklarda blok çıkarılması esnasında yaklaşık %40-60 arası bir mermer atığı meydana gelmektedir (Gürer ve Akbulut, 2005).

Mermer atıkları beton içerisinde birçok amaçla kullanılmaktadır. Mermer işleme tesislerinde ve mermer ocaklarında meydana gelen mermer atıklarının beton içerisinde değerlendirilmesiyle insan sağlığı ve çevreye olan zararlı etkileri önemli ölçüde

azaltılmaktadır (Ceylan ve Mança, 2013). Çevreye bırakılan mermer atıklarının beton içerisinde kullanılması doğal kaynaklarının daha az tüketilmesini sağlamaktadır. Böylece ülke ekonomisine büyük katkı yapmaktadır (Alyamaç, 2009).

Mermer tozu beton üretiminde ince agrega olarak kum veya çimento ile yer değiştirilmek suretiyle kullanılabilir. Kendiliğinden yerleşen beton üretiminde katkı malzemesi olarak çimento veya agrega ile yer değiştirilerek kullanılabilir. Polimer beton üretiminde maliyetleri düşürmek için kullanılabilir (Demirel vd., 2018).

1.3.5. Türkiye'de Mermer Rezervi

Mermerin tarihi insanoğlunun tarihi kadar eskilere dayanmaktadır. İnsanlar tarih boyunca mermeri birçok amaçla kullanmışlardır. Günümüzde de mermer birçok farklı amaçla kullanılmaktadır (Çitoğlu ve Bayraktar, 2018).

Türkiye, dünya mermer sektöründe yüksek rezerv miktarıyla doğal taş rezervinin yaklaşık olarak %40'ına sahip bir ülkedir. Bu rezervin yanlızca %2'lik kısmının Türkiye tarafından kullanıldığı bilinmektedir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2019).

Ülkemiz zengin doğal taş rezervlerine sahiptir. Türkiye'de masif niteliği taşıyan metamorfik temeller içinde büyük ya da küçük yayılımlı mermer yatakları bulunmaktadır (DPT, 2001).

Ülkemizde 80'den fazla değişik yapıda ve 120'nin üzerinde değişik renk ve desende mermer rezervi olduğu bilinmektedir. Bu mermerler dünya pazarında yüksek kalitesiyle oldukça ilgi çeken mermer türleridir (Çetin, 2003).

Ülkemizde mermer yatakları genellikle Paleozoik yaşlı masiflerin yer aldığı alanlarda bulunmaktadır. Bu alanlar genellikle ülkenin batısında yer almakla birlikte doğusunda da bulunmaktadır. Menteşe masifi, Istıranca masifi, Menderes masifi, Kazdağ masifi, Kırşehir masifi, Ilgaz masifi ve Bitlis masifi bu alanlardan en önemli olanlarıdır (Çetin, 2003).

Ülkemizde mermer rezervinin en fazla olduğu bölgeler Marmara, Batı Anadolu, Güney Anadolu ve Orta ve Kuzey Anadolu bölümüdür. Özellikle İzmir, Uşak, Afyon, Muğla, Balıkesir, Bursa, Kırşehir, Çankırı, Çorum, Niğde, Kayseri, Artvin, Bitlis, Erzincan, Sivas, Tokat, Denizli, Kütahya, Eskişehir, Diyarbakır, Elazığ, Çanakkale, Konya, Bilecik ve Manisa illerinde zengin mermer yatakları bulunmaktadır (Soykan ve Mutluer, 1996).

1.4. Arduvaz Hakkında Genel Bilgiler

1.4.1. Arduvazın Tanımı ve Arduvazın Oluşumu

Arduvaz (kayrak taşları), sığ denizlerde çökelmiş tortul kayaçlar olarak ya da çökelen bu tortul kayaçların metamorfizmaya uğraması sonucu yeniden kristalleşmesi sonucu oluşan kayaçlardır (Eren, 2006). Kayrak taşlarının sarı, siyah, gri, kırmızı, kahverengi, beyaz, yeşil gibi renkleri bulunmaktadır.

Arduvaz (kayrak taşları) genellikle kil yataklarının diajenez sonucu şistleşmesi sonucu oluşan ince tabakalı kayaçlardır. Şistleşme tabakalaşmaya paralel olup kayacın ince tabakalar halinde dilimlenmesini sağlar. Kayrak taşları kalsit kökenli oluşumlar olmasına karşın genellikle koyu gri olanlar belli miktarda kuvars, muskovit ve filit içermelerinin yanı sıra biyotit, hematit ve klorit gibi minerallerde içermektedirler (Aytekin, 2007).

Arduvaz, çekiçle vurulduğunda ince kağıt levhalara ayrılan metamorfik kayaçlardır. Bu özelliği sayesinde çatı kaplamasında ve karatahta yapımında kullanılmaktadır. Arduvaz taşı killi toprakların basınç altında mikaya dönüşmesiyle oluşur.

Arduvaz taşı Almanya'da 500 yıldır çatı kaplamasında kullanılmaktadır. Arduvaz taşının yıllardır çatı kaplaması olarak kullanılmasının nedenleri; uzun ömürlü, kolay uygulanabilir, solmayan renklere ve ince kesitte işlenebilmeye sahip doğal bir taş olması sıralanır. Arduvaz taşının, nemin giderilmesi, yapısal hareketi azaltma, enerji tasarrufu, dayanıklılık, sürdürülebilirlik gibi avantajları bulunmaktadır (URL-1).

1.4.2. Arduvazın Mekanik ve Fiziksel Özellikleri

Sert olan kayrak taşları su geçirmez ve atmosfer koşullarına dayanıklı yapıdadır. Kayrak taşları geçirdikleri metamorfizma sonucu dilimli yapıya sahip olurlar ve bu yapıları sayesinde düzgün tabakalar halinde ayrılırlar. Gözenekli bir yapıya sahip değildirler. Aşınma ve atmosferik etkilere karşı dayanıklı olup eğilme ve büzülme göstermezler (Çelik, 2003). Tepsi şeklinde geniş yüzey alanına sahip bu taşların aynı zamanda ısı yalıtımları yüksektir. Oldukça sert, homojen yapıda, yüksek sıcaklığa karşı dayanıklı ve su geçirmez bir özelliktedirler (Taşlıgil ve Şahin, 2016).

Arduvaz taşı organik madde bakımdan zengin olup gri ve koyu gri renklerde olabilmektedir. Eğer kayrak ince karbonat kaya, ilksel kaya tabakalarının ardalanmasını içeriyorsa mavimsi renkte olabilmektedir. Günlenmeye maruz bırakılmışsa kızılımsı renkte olmaktadır (Işık, 2019).

Arduvaz (kayrak taşları), mika grubu minerallerinden, serizit ve muskovit, kil grubu minerallerinden paragonit, kaolinit ve klorit, yan mineraller olarak oksitler, kalsit, belli miktarlarda kuvars ve feldspar içermektedir. Çok az miktar da ferro magnezyen mineralleri içerir. Kayrak taşları asitlere ve kirlenmeye karşı dayanıklıdır (Aytekin, 2007).

Doğal taş sınıfında yer alan arduvaz (kayrak taşı), çevre dostu ve uzun ömürlü bir malzemedir. Renk çeşitliliği ve dokusu sayesinde her mekana uyum sağlar. Arduvaz taşının farklı kalınlıklarda üretilmesi çeşitli projelerde kullanılmasına olanak verir. İster duvar kaplama ister yer döşemesi gibi birçok alanda kullanım sağlar (URL-2).

Arduvaz taşı doğada kendiliğinden oluşan bir kayaç türüdür. Yüksek sıcaklık ve basınç altında katmanlı bir yapıya dönüşür. Bu doğal süreç arduvaz taşının hem sağlam hem de estetik bir yapıya sahip olmasını sağlar. Doğal dokusu mekanlara otantik bir hava katar. Damar damar ayrılabilen yapısı sayesinde işlenmesi kolaydır. Üretimi sırasında kimyasal işlemler kullanılmaz. Bu özellikleri sayesinde arduvaz taşı çevre dostu projeler için tercih edilen bir kayaç türüdür (URL-2).

Arduvaz taşı doğal renk ve çeşitliliğiyle dikkat çeker. Kırmızı, yeşil, gri, kahverengi gibi farklı renk tonlarında bulunabilir. Bu geniş renk çeşitliliğiyle dekorasyon projelerinde sınırsız tasarım olanağı sağlar. Doğal dokusu mekana şıklık ve zarafet katar. Arduvaz taşının yüzeyi düz veya pürüzlü olabilir (URL-2).

Arduvaz taşı fiziksel dayanıklılığıyla öne çıkan bir kayaçtır. Sert yapısı sayesinde hava koşullarına karşı dirençlidir. Yağmur, don ve aşırı sıcaklık gibi etkilere uzun süre dayanır (URL-2).

1.4.3. Arduvazın (Kayrak Taşlarının) Kullanım Alanları

Kayrak taşının da içerisinde yer aldığı doğal yapı taşı endüstrisi, dünyada 50'den fazla ülkeyi ilgilendiren önemli ve geniş kapsamlı bir yayılım alanına sahiptir. Asya ve Avrupa bu endüstrinin öncülüğünü yapmaktadır (Işık, 2019).

Arduvaz taşının ihraç potansiyeli yüksek ve pazar payı geniş olduğundan tarihi yapılarda, kemerlerde, çatı ve duvar kaplamalarında, döşemelerde ve peyzaj uygulamalarında kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra mineral yünü elde etmede kullanılmaktadır. Ocaktan çıkarılmış haliyle kullanılabildiği gibi makinelerde kesilip parlatılarak da kullanılabilir (Aytekin, 2007).

Kayrak taşı, yapı ve dekoratif amaçlı geniş kullanım alanına sahiptir. Eski Yunanlılar ve Romalılar yapılarında kayrak taşı kullanımına ağırlık vermişlerdir. Kayrak taşının estetik bir görünüm oluşturması, düşük aşınma ve hava koşullarından etkilenme

oranının düşük olması niteliklerine sahip olması nedeniyle duvar kaplama ve döşeme malzemesi olarak kullanılmaktadır (Işık, 2019).

Kayrak taşları, çevre düzenlemesinde, peyzaj mimarisinde, bina duvarlarının kaplamasında, yer döşemelerinde kullanılmaktadır. Arduvaz veya sleyt olarak bilinen kayrak taşları farklı renk ve desenlerde olmalarının yanı sıra kullanım alanlara çok geniştir. En çok yapı sektörü ve dekoratif amaçlı çevre düzenlemesinde kullanılırlar. Geçirgen olmaması sayesinde çatı kaplama malzemesi ve duvar yapımında kullanılmasının yanında çok iyi ses ve ısı yalıtımı sağlamasından dolayı yurt içi ve yurt dışı kullanım alanı oldukça fazladır. Ayrıca kayrak taşı tozları dolgu malzemesi, çimento katkı maddesi, agrega olarak da kullanılmaktadır (Aytekin, 2007).

Arduvaz atıkları bazı endüstri alanlarında dolgu ve katkı malzemesi olarak kullanılmaktadır. Genleşen sleytler hafif yapı malzemesi olarak kullanılırken pul ve toz sleyt hem asfalt malzemesi hem de lastik-plastik ve ilaç endüstrisinde dolgu malzemesi olarak kullanılmaktadır (DPT, 2001).

Kayrak taşı (arduvaz), atmosferik etkilere karşı dayanıklı olması ve estetik bir görünüme sahip olması nedeniyle bina cephelerinde, döşemelerde, pencere kenarları ve eşiklerde kaplama malzemesi olarak kullanılmaktadır (Aytekin, 2007).

1.5. Lifli Betonlar

Beton özelliklerini iyileştirmek amacıyla taze beton içerisine çeşitli metotlarla farklı miktarlarda katılan, belirli boy/çap oranına sahip polimerik, metalik mineral veya tabii yapıdaki malzemeler lif olarak adlandırılır. Lifler plastik, çelik, cam gibi farklı malzemelerden farklı tip ve boyutlarda üretilmektedir (Ünal, 1994; Ersoy, 2003). ACI (Amerikan Beton Enstitüsü) komitesi 544 (1997) bir lifi tanımlayan en iyi nümerik parametrenin lif boyunun eş değer lif çapına bölünmesiyle elde edilen "boy/çap" oranı olduğunu kabul eder. Bu orana kısaca "narinlik oranı" da denilmektedir. Eşdeğer lif çapı ise; alanı lifin kesit alanına eşit bir dairenin çapı olarak tanımlanmaktadır. Lifi tanımlayan diğer etken ise lifin geometrik yapısı ve çekme gerilmesidir (TSE, 1992, TS 10513).

Liflerle güçlendirilmiş beton karışımları köprüler, tüneller, endüstriyel yapılar, borular, hidrolik yapılar, güvenlik odaları, patlamaya karşı dirençli yapılarda, ince kaplamalarda ve beton silindir gibi farklı yapıları kapsayan alanlarda uygulanmaktadır (Topçu ve Boğa, 2004).

Lifli betonlarda, lif çeşitlerinin hepsinde sağlanması gereken en önemli özellik liflerin beton karışımı içerisinde homojen olarak dağılmasının sağlanmasıdır. Homojen olarak dağılan lifler, beton içerisinde meydana gelen çatlakları önlemekte ve çatlakların

beton içerisinde ilerlemesini engelleyerek betonu daha dayanıklı duruma getirmektedir (Altun vd., 2004).

Beton içerisinde bulunan lifler, büzülme çatlağı oluşumunu azaltarak yüzey aşınma direncini artırmaktadır. Beton içerisinde oluşacak kılcal çatlakları ve rötre oluşumunu engelleyerek su geçirimsizliğini artırır. Donma ve çözülme dayanımını artırır ve kılcal çatlak gelişmesini önler. Betonda lif kullanımı betona daha sünek bir davranış kazandırır (Kozak, 2003).

Beton içerisinde homojen olarak dağılan kısa kesilmiş lifler, çatlak oluşumunu geciktirerek çatlak ilerlemesini ve yayılımını önler (Yazıcı, 2006).

1.5.1. Lifli Betonların Taze ve Sertleşmiş Beton Özellikleri

Taze ve sertleşmiş beton özellikleri bakımından lifli betonlar normal betonlardan farklı özellikler gösterirler. İşlenebilirlik yönünden zayıf olan lifli betonların karışımına akışkanlaştırıcıların %3'ünden daha fazla ilave edilmesi durumunda işlenebilirlik artar (Durmaz, 2007).

Lifli betonlar sertleştiğinde de normal betonlardan farklı özellikler gösterirler. Bu farklı özellikler aşağıdaki başlıklarda incelenmiştir.

1.5.2. Lifli Betonların Basınç Dayanımları

Liflerle güçlendirilmiş betonlar üzerinde yapılan çalışmalarda, betonların basınç dayanımlarında %25'lik bir artışın meydana geldiği bazı durumlarda ise bu düzeyde bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun nedeni beton içerisinde gelişigüzel dağılmış liflerin yönelimidir. Beton içerisinde dağılan liflerin yükleme düzlemine dik olması betonun basınç dayanımına herhangi bir katkı sağlamamaktadır. Ancak yükleme düzlemine paralel olması durumunda lifler betonun basınç dayanımını artırmaktadır (Gül ve Düzgün, 2005).

1.5.3. Lifli Betonların Eğilme Dayanımları

Liflerle güçlendirilmiş betonların eğilme dayanımı normal betonlardan fazladır. Çimento hamurunun çatlamasıyla birlikte liflerin yükleri taşıması ve dağıtması nedeniyle maksimum eğilme yükünde artış gözlenir (Gül ve Düzgün, 2005).

1.5.4. Lifli Betonların Çekme Dayanımları

Liflerle güçlendirilmiş betonların çekme dayanımlarının iyileştiği görülmüştür. Lif ilaveli betonların çekme dayanımlarını etkileyen en önemli kriterler narinlik oranı, lif miktarı ve lif-matris arasındaki aderanstır (Gül ve Düzgün, 2005).

1.5.5. Cam Elyaflar

Cam elyaflar, camların elektrikli fırınlarda, 1200-1500 derecede eritilmesi ve ergimiş halde bulunan camların platin alaşımlı bir potanın altındaki deliklerden geçirilerek bir soğuma alanında soğutulması sonucu üretilen liflerdir. Daha sonra lifler üzerine kaplama yapılarak demetler halinde makaralara sarılıp depolanırlar (Şahin, 2000).

Cam elyaf; alüminyum, magnezyum, silis kumu, asit borik ve kireçtaşının harmanlanmasıyla elde edilir. Roma ve Mısır döneminden kalma ve günümüze kadar ulaşan, gemi gövdelerinde kullanılan halat biçiminde camdan oluşan süslerden cam elyafın kullanıldığı anlaşılmaktadır. 18. yüzyıldan itibaren kullanılmaya başlayan cam elyaflar 20. yüzyılın başlarında ABD'de Harford ve Stafford, Almanya'da Hager Kardeşler tarafından seri üretime başlanmış ve cam elyaf üretimi hızla yaygınlaşmıştır (URL-3).

Cam elyaf; sertlik, korozyona dayanıklılık ve diğer malzemelerle fazla etkileşime girmeme gibi tipik cam özelliklerine sahiptir. Ayrıca esnek, hafif ve düşük maliyetli bir malzeme olması sebebiyle endüstriyel uygulamalarda çok fazla kullanılan lif çeşididir. Bütün cam elyafların elastisite modülleri benzer olmasına rağmen, farklı dayanım değerlerine sahip ve çevresel faktörlere karşı dirençleri de birbirinden farklıdır. Cam elyaflardan E tipi lifler, yüksek çekme dayanımı ve kimyasal direncin olmadığı alanlarda uygulanırlar. Bu tip camlar, düşük maliyetli, yüksek korozyon dayanımı ve mekanik özelliklerinin iyi olması nedeniyle yapısal takviyelerde kullanılırlar. S tipi ve S-2 tipi camlar en yüksek dayanıma sahip olmalarına karşın E tipi camlara göre daha pahalı olduklarından uygulama alanları daha kısıtlıdır. C tipi camlar yüksek korozyon gerektiren alanlarda, D tipi camlar elektrik akımına karşı direncin yüksek olması sebebiyle seramik sigorta gibi elektriğe dirençli malzemelerin imalatında, A tipi ise yüksek alkalin gerektiren durumlarda kullanılmaktadır (Barbero, 1999).

Cam liflerin mekanik dayanımları mikro çatlaklar ve yüzeylerinde bulunan kusurlara bağlıdır. Üretilecek elyaf kalitesinin yüksek olması isteniyorsa, hammaddenin saflığı, homojenliği, lif çekiminin uygulama sıcaklığı ve koruyucu kaplamanın hızlı uygulanması gibi etkenlere dikkat edilmesi gerekmektedir (Aslan, 2020).

Cam liflerin ekonomik olması fazla kullanılmalarının başlıca nedenidir. Cam liflerin üretim biçimleri lif kırpıntıları veya sürekli lifler şeklindedir. Cam liflerin 4 ana çeşidi bulunmaktadır (Bahadır, 2007). Bunlar;

1) Sürekli yapılı fitil şeklinde olanlar; Bir veya daha fazla miktarda sarılmış bobin şeklindedir.
2) Kırpılmış demet halinde cam lif; Genel olarak boyları 3 ile 5 mm arasında olmakla beraber kullanılacağı yere göre değişiklik gösterir.
3) Cam keçe biçiminde cam lif; Fitillerden veya sürekli liflerden kesilmiş liflerdir.
4) Cam dokuma lifler; Cam fitilleri ve iplikleri kullanılarak üretilirler.

1.5.6. Cam Elyaf Katkılı Betonların Özellikleri

Beton yapı uygulamalarında geniş kullanım alanına sahip bir malzemedir. Bu geniş kullanım alanından dolayı betonun özelliklerini iyileştirmek amacıyla birçok çalışma yapılmıştır. Betona ilave edilen çeşitli türdeki liflerle elde edilen "Lif Takviyeli Beton" bu çalışmalardan biridir. Lif takviyeli beton; çimento, agrega ve düzensiz dağılmış liflerin suyla karıştırılması ile elde edilen bir yapı malzemedir. "Cam takviyeli beton" ise cam lif, çimento, agrega ve su karışımından meydana gelen bir malzemedir. Cam lif ilavesi betonda erken dönemde oluşacak mikro çatlakları engelleyerek betonun çekme dayanımını ve tokluğunu artırmaktadır (Kurt, 2006).

Cam lifin, betonun mekanik özelliklerine etkisi beton karışımda bulunan lif oranına, boşluk oranına, su/çimento oranına, lif dayanımına ve lif uzunluğuna bağlıdır. Burada önemli olan diğer bir etken lif narinlik oranıdır. Bu oran lif boyunun, lif çapına oranı olarak tanımlanır (Soroushian ve Bayasi, 2001).

Cam ve polipropilen lifler, rötre çatlaklarının oluşumunu ve içsel gerilmeleri önlemek için kullanılmaktadır. Cam elyaflar, düşük miktarda kullanıldığında (1 kg/m3 altında) beton içerisine dağılan lifler erken dönemde oluşan iç gerilmelerden dolayı meydana gelen çatlakları ve geçirgenliği azaltırken, uzun dönemde ise betonun atmosfer etkilerine ve dış aşındırıcı kuvvetlere karşı direncini artırır. Ayrıca cam elyaflar taze betonda terlemeyi ve tane ayrışmasının azaltılmasına olumlu yönde etki etmektedir. Cam elyafın yüksek oranda kullanılması durumunda (1-20 kg/m3 arasında) ise; karıştırma ve pompalama esnasında betonun işlenebilirliğini olumlu yönde etkilemekte, betonun eğilme dayanımını artırmakta ve darbelere karşı direnç sağlamaktadır (Ekincioğlu, 2002).

Beton içerisinde kullanılan lif oranı optimum bir değerin üzerine çıkmamalıdır. Lif oranının fazla olması halinde yerleştirme ve karıştırma sorunları meydana gelir ve lifler

beton içerisinde topaklanır. Beton karışımında iri taneli agrega kullanılmamalı, lif narinlik oranı optimum değerde olmalı, lifler karışıma kuru olarak ilave edilmeli ve liflerin homojen dağılması sağlanmalıdır (Özyurt, 2000).

Cam elyafın betonda kullanılmasının avantajları;

- Yüksek sıcaklığa karşı kararlılığı ve düşük sıcaklık çatlama direnci
- Yorulma engelleyici performansa sahip olması
- Beton yollarda kullanıldığında yolun ömrünü uzatması
- Aşınmaya karşı direnci olması
- Elektrik yalıtıma sahip olması (Majumdar ve Ryder, 1968).

1.5.7. Cam Elyaflı Betonların Kullanım Alanları

Cam elyaf 1930'lu yıllarda Amerika'da geliştirilmeye başlamıştır. Kullanımının avantajlı olmasından dolayı hemen hemen her sektörde kullanılmaktadır. Cam elyaf mekanik ve kimyasal dayanıklılık yönünden yüksek değerlere sahip bir malzemedir. Fiber glass, hafif ve taşınabilir olması, su geçirmemesi gibi üstün özellikleri sebebiyle her sektörde kullanıma uygun olan bir malzemedir ve kullanım alanı her geçen gün genişletmektedir.

Cam elyaf, korozyona oldukça dayanıklıdır. Sıcaktan veya soğuktan etkilenmez, sıvı geçirgenliği yoktur, şekli bozulmaz ve darbelere dirençli bir malzemedir. Fiber glass özellikleri sayesinde kolay şekil alan, küflenmez veya paslanmaz, çevreci bir malzemedir (URL-4).

Cam elyaf oldukça ince ve dayanıklı bir yapıya sahip olduğundan birçok sektörde kullanılmaktadır. En çok tercih edilen sektörler havacılık, otomotiv ve inşaat sektörüdür. Cam elyafın kullanımı diğer liflere göre daha uygun olması nedeniyle özellikle yapı sektöründe kullanılmaktadır. Yalıtıma sağladığı avantajlardan dolayı cam elyafın kullanımı inşaat sektöründe yaygındır. Duvar kaplamaları, havuzlar, duş kabinler, küvet, banyo gibi alanlarda kullanılmaktadır. Ayrıca cam elyafın kullanımı geri dönüşüm avantajı sağlaması sebebiyle tercih edilen bir yapı malzemesidir (URL-4).

Cam elyaf takviyeli betonların hafif olması ve üretim kolaylığı sağlaması nedeniyle çok çeşitli tasarımlarda kullanılmaktadır. İşlenebilirliği yüksek olan cam elyaf takviyeli betonlar tarihi restorasyon çalışmalarında kullanılmaktadır. Cam elyaflar sağladığı üstün özellikler nedeniyle cephe kaplama panelleri, kanallar, su depoları, geçici ve kalıcı kalıplar, sandwich panel üretimi, ses bariyerleri, bölme duvarları, oluk, pencere ve kapı gibi birçok alanda kullanılmaktadır (URL-5).

1.6. Çevre Dostu Beton

Enerji üretiminde kullanılan doğal kaynaklardan işlem sırasında oluşan endüstri atıklarının çevreye olan zararlı etkilerinin azaltılması amacıyla beton karışımında kullanılmasıyla üretilen beton çevre dostu beton olarak tanımlanmaktadır. Bu tür betonlara aynı zamanda yeşil beton da denilmektedir. Yeşil beton olarak tanımlanmasının nedeni renginin yeşil olmasında kaynaklı olmayıp, atık malzemelerinin kullanılmasıyla çevreye olan olumsuz etkisinin ortadan kaldırılmasından kaynaklanmaktadır (Eren, 2019; Çavdar vd. 2025).

Yeşil beton, en az bir bileşeni atık malzemelerden oluşan, çevreye zarar vermeyen yüksek performanslı bir beton türüdür. Yeşil beton geri dönüştürülmüş cam, uçucu kül ve yüksek fırın cürufu gibi çeşitli sürdürülebilir malzemelerden oluşmaktadır (URL-6).

Yeşil beton kullanımı inşaat projelerinin karbon ayak izini azaltmaya ve onları daha sürdürülebilir hale getirmeye yardımcı olmaktadır. Bu malzeme dayanıklılığı yüksek ve hava koşullarına karşı dirençlidir. Yeşil beton geleneksel betondan daha hafif olduğundan çatılara ve ağır yüklerin yerleştirilmesinin veya taşınmasının zor olduğu yerlere yerleştirmeyi kolaylaştırır (URL-6).

Çevre dostu beton karışımında kullanılan atık malzemeler, dayanıklı ve ekonomik beton üretilmesi açısından da katkı sağlamaktadır. Atık malzemeler beton karışımda beton bileşenlerinden agrega veya çimento yerine ikame edilerek kullanılabilmektedir (Hameed vd., 2009).

Dünya çapında yapılan bir araştırmaya göre yaklaşık yıllık 10 milyar metre küp beton üretilmektedir. Çimento betonun ana bileşenlerinden biri olduğundan betonun dayanım kazanması beton içerisinde kullanılan çimentonun yeterli özelliklere sahip olması gerekmektedir. Fakat bunun yanında üretilen betonun ekonomik ve çevreci olarak üretilmesi de hedeflenmektedir (Blaszczynski vd., 2015).

Beton dünyada en çok üretilen yapı malzemesi olduğundan, betonun içerisindeki çimento miktarı ve çimento üretilirken meydana çıkan karbondioksit salınımı azaltılırsa, çevre dostu beton üretmek için mutlaka çimento kullanımının dikkate alınması gerektiği ortaya çıkmaktadır (Baikerikar, 2014).

Geleneksel betonun ekonomik ve çevresel dezavantajlarından ve çevre dostu betonun sahip olduğu avantajlardan dolayı, çevre dostu beton geleneksel beton yerine daha fazla tercih edilmektedir. Çevre dostu betona olan ilginin artmasında, doğal kaynakların hızla tükenmesi ve toplumların sera gazını düşürmedeki isteği etkili olmaktadır. Çevre dostu beton hem çevresel hem de teknik yönden birçok fayda sağlamakla birlikte ekonomik olması yönünden de geleneksel betona göre daha üstündür.

Beton içerisinde kullanılan her türlü atık malzeme betona farklı özellikler katmaktadır. Kullanılan bu atık malzemeler taze betonun sertleşmiş ve durabilite özellikleri üzerinde önemli değişikliklere neden olmaktadır (Imbabi vd., 2012).

Son yıllarda nüfusun hızla artışıyla birlikte insanların ihtiyaçları da artmaktadır. Artan ihtiyaçları karşılamak için doğal kaynakların kullanımına gerek duyulmaktadır. Böylece doğal kaynakların kullanımında açığa çıkan atıklar çevreyi kirletmektedir. Bu sebeple bu çalışmaların asıl amacı insan sağlığının korunması, doğal kaynakların tüketiminin azaltılması ve çevre kirliliğinin önlenmesidir (Marinković vd., 2010).

1.7. Beton Numunelerine Sülfat Etkisi

Betonarme yapıların uzun süreli dayanıklılığını olumsuz etkileyen en önemli çevresel etkenlerden biri sülfat etkisidir. Sülfat etkisi betonda genişlemeye, dayanımın düşmesine ve kütle kaybına sebep olmaktadır (Al-Akhras, 2006).

Betonun dayanıklılığına etki eden ve bozulmasına sebep olan kimyasal etkiler içerisinde sülfat etkisi, deniz suyu etkisi, asidik etki, karbonatlaşma etkisi gösterilebilir. Sülfatların betonda oluşturduğu etkiye sülfat etkisi denilmektedir. Sülfat saldırısı iç ve dış olmak üzere iki çeşittir. Dış sülfat saldırısı yer altı suyunun içinde bulunan sülfatın emilerek betona dışarıdan girmesi sonucunda meydana gelirken, iç sülfat saldırısı ise beton karışımının oluşturulması esnasında çözünebilir malzemelerin etkisiyle oluşur (Çavdar, 2008).

Çimentonun yapısında yer alan ana bileşenlerden C_3A ve C_4AF çimentonun sülfata karşı göstermiş olduğu performansı etkileyen en önemli iki bileşendir. Çünkü sülfat hücumu sırasında meydana gelen sertleşmiş çimento ve betonun yapısında genleşmelere neden olan etrenjit ve monosülfoalüminatların oluşumunda bu ana bileşenler doğrudan etki göstermektedir. Çimentonun yapısında bulunan C_3A miktarı, beton taze haldeyken oluşacak monosülfoalüminat miktarını belirlemekte, monosülfoalüminatlar ise sertleşmiş betonda zararlı genleşmelere neden olan etrenjiti oluşturmaktadır (Şahmaran vd., 2002).

Betonla sülfatlı çözeltiler arasında meydana gelen reaksiyon ürünlerinin miktarı ve özelliği, farklı sülfat karışımlarına, sülfata bağlı katyonlara, bunların birbirlerine oranına ve miktarına bağlıdır. Sülfatlı çözeltilerdeki sülfat iyonları, çimentonun hidratasyon ürünü olan CH ile tepkimeye girerek jips (CSH_2) meydana getirir. Açığa çıkan jipsin betondaki hacim artışına ve yumuşamaya olan etkisi sınırlıdır ve her zaman zararlı etki göstermez. Fakat tepkime sonucu oluşan jips çimentodaki C_3A ve bunun hidratasyon ürünü olan $C_3A\ H_6$, C_4AH_{13}, $C_4ASH_{12\text{-}18}$ ile Candlot tuzu meydana gelir. Candlot tuzu

doğal bir mineral olan etrenjit'e çok benzer, içerdiği 32 molekül kristal suyu da büyük hacim artışına neden olur (Canpolat ve Yılmaz, 2002).

Sülfat iyonları topraktan ya da zemin suyundan beton içine sızabilir. Çalılık dışında, bitki ve ağaç yetişmeyen, yüzeyinde beyaz lekeler bulunduran, tuz birikintileri görülen çorak topraklarda sülfat etkisinden şüphe edilir. Bu tip zeminlerde yapılacak inşaatlarda, zemin etüdünün yanında yeraltı suyundan ve topraktan çeşitli örnekler alınarak betona zarar verebilecek maddelerin olup olmadığı incelenmelidir (Dikme, 2010).

TS 3340 "Zararlı kimyasal etkileri olan su, zemin ve gazların etkisinde kalacak betonlar için yapım kuralları" standardına göre ise sülfat (SO_4^{-2}) iyonlarının zararlı etkinlik dereceleri Tablo 1'de gösterilmiştir (Dikme, 2010).

Tablo 1. TS 3340'a göre sülfat (SO_4^{-2}) iyonlarının zararlı etkinlik dereceleri (Dikme, 2010).

Etkinlik Derecesi	Suda SO_4^{-2} (mg/lt)	Suda SO_4^{-2} (mg/kg)
Zayıf	200-600	2000-5000
Kuvvetli	600-3000	>5000
Çok kuvvetli	>3000	-

1.7.1. Magnezyum Sülfat Etki Mekanizması

Beton içerisine giren magnezyum sülfat kalsiyum hidroksitle tepkimeye girerek alçıtaşı ve brusiti meydana getirir (Alişer, 2013). Brusitin kimyasal formülü aşağıda Eşitlik 1'de gösterilmiştir.

$$MgSO_4 + Ca(OH)_2 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4.2H_2O + Mg(OH)_2 \quad \text{(Eşitlik 1)}$$

Yukarıda Eşitlik 1'de verilen reaksiyon sonucu brusit oluşmaktadır. Brusitin çözünürlüğü çok düşüktür. Brusitin oluşumu yüksek oranda kalsiyum hidroksit tüketimi sağladığından çözeltinin pH'ını düşürmektedir. Ayrıca taze harçlarda yukarıdaki eşiklikte meydana gelen alçıtaşı ($CaSO_4.2H_2O$) kalsiyum alüminat ile tepkimeye girerek etrenjiti ($3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.32H_2O$) oluşturur. Meydana gelen etrenjit taze harçta oluştuğundan dolayı zararsızdır. Sadece taze harcın hacminin artmasına yol açmaktadır. Magnezyum sülfat çözeltili harçlarda sertleşme olduktan sonra meydana gelen alçıtaşı oluşumunun artması betonda şişmeye sebep olan ilk zararlı etkiyi oluşturur. Magnezyum sülfat çözeltili harçlarda sertleşme olduktan sonra etrenjit oluşumu biter. Çünkü brusit oluşumu ve çözeltinin pH seviyesinin düşmesi hem etrenjit hem de C-S-H'ın dengesinin bozulmasına neden olur (Alişer, 2013).

Magnezyum sülfatın C-S-H jeliyle tepkimeye girmesi sonucu silika jeli oluşur. Bu jelin bağlayıcılık özelliği ve dayanımı C-S-H jeline göre oldukça düşüktür. Çimento pastasında alçıtaşı ve brusitin yoğunluğunda artış olurken, C-S-H jeli ise kirecini kaybeder ve bağlayıcılık özelliği azalır. Brusitin yoğunluğunun artmasıyla birlikte silika jeliyle tepkimeye girerek bağlayıcı ve dayanım özelliği olmayan M-S-H dönüşür (Alişer, 2013). Bu reaksiyona ait formül Eşitlik 2'de verilmiştir.

$$Mg(OH)_2 + SiO_2.H_2O \rightarrow M\text{-}S\text{-}H \qquad \text{(Eşitlik 2)}$$

Sonuç olarak meydana gelen M-S-H bileşeni sertleşmiş çimento pastasının yumuşamasına ve bozulmasına sebep olur.

1.8. Literatür Araştırması

Yapılan literatür incelemesinde atık mermer tozunun beton üretiminde agrega veya çimento yerine belli oranlarda kullanılmasıyla ilgili birçok çalışma yapıldığı görülmektedir. Ancak arduvaz taşının kullanımıyla ilgili çok fazla çalışma yer almamaktadır. Yapılan literatür incelemesinde konuyla ilgili yapılan çalışmalara aşağıda yer verilmiştir. Bu çalışmalar;

Aruntaş vd. (2007), atık mermer tozunun kendiliğinden yerleşen beton üretiminde kullanımını araştırmışlardır. Atık mermer tozu çimento ile kütlece %5, %10, %15, %20 ve %25 oranlarında yer değiştirilerek kullanılmıştır. Küp numunelere 3, 7 ve 28 günün sonunda basınç dayanımı deneyi yapılmıştır. En yüksek basınç dayanımının atık mermer tozunun %20 oranında kullanıldığı numunelerde olduğu görülmüştür.

Barluenga ve Hernández-Olivares (2010), taş ocağı atıklarından zemin tesviye tabakası olarak kullanılan arduvaz tozunu çimento yerine kütlece %75 oranında kullanarak beton numuneleri üretmişlerdir. Bu numuneler üzerinde Vicat iğne testi ve Taramalı Elektron Mikroskobu ve Enerji Dağılım Spektroskopisi analizi (SEM/EDAX) yapılmıştır. Elde edilen taze ve sertleşmiş beton numunelerinin fiziksel ve mekanik özellikleri belirlenmiştir. Sonuç olarak arduvaz tozunun çimentoyla birlikte bağlayıcı görevi gördüğünü, arduvaz atıklarının çimento içerisinde kullanılarak kendiliğinden yayılan bir harç özelliği kazandığını belirlemişlerdir.

Shelke vd., (2012), yaptıkları çalışmada çimentonun mermer tozuyla %0; %8; %12 ve %16 ve SF %0; %8 oranlarında ikamesinin 7 ve 28. günlerde normal betonun basınç dayanımı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak, mermer tozu ilavesinin tüm karışımlarda basınç dayanımını düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. Bu nedenle, 28 günde,

ilgili kontrol karışımlarına göre %8; %12 ve %16 mermer tozu içeren karışımlar, küp numuneler için yaklaşık %1; %25 ve %29, silindirik numuneler için sırasıyla %14; %32 ve %40 azalma göstermişlerdir. Ayrıca basınç dayanımı için en iyi sonuçların %8 mermer tozu ve %8 SF'de bulunduğunu gözlemlemişlerdir.

Sağlam (2012), atık mermer tozu, silis dumanı ve fosfojips'in çimento üretiminde kullanımını araştırmıştır. Katkılı çimentoların tamamı %5 oranında fosfojips farklı miktarlarda klinker, mermer tozu ve silis dumanı ile üretilmiştir. Fosfojips ve mermer tozu katkılı çimento üretiminde kütlece %3, %6, %9, %12, %15, %20 ve %25 oranında mermer tozu kullanılmış, fosfojips, mermer tozu ve silis dumanı katkılı çimento üretiminde ise %3, %6, %9, %12, %15, %20 ve %25 oranında mermer tozu ve silis dumanı kullanılmıştır. Üretilen numunelere 3, 7, 28 ve 90 gün kür koşullarında bekletildikten sonra basınç ve eğilme dayanımı deneyleri yapılmıştır. Sonuç olarak, atık mermer tozu, silis dumanı ve fosfojipsin çimento üretiminde kullanılabileceği belirlenmiştir.

Erdem ve Öztürk (2012), mermer tozunu çimento yerine kütlece %0, %10, %20 ve %30 oranlarında kullanarak beton numuneleri üretmişlerdir. Numuneler 28 gün kür koşullarında bekletilerek mermer tozu katkılı harçların donma-çözülme etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucu mermer tozu ilavesinin dayanım üzerinde olumlu etkisinin olduğu belirlenmiştir.

Yıldız (2012), atık mermer tozunu ince malzemeyle hacimce %25, %50, %75, %100 oranlarında yer değiştirerek beton numuneleri üretmiş ve bu numuneler üzerinde porozite, ultrases geçiş hızı tayinleri ve ayrıca basınç ve çekme dayanımları belirlemiştir. Mermer tozunun %75 oranında kullanıldığı numunelerde basınç dayanımının yüksek olduğunu belirlemiştir.

Soliman (2013), yaptığı çalışmasında mermer tozunu çimento yerine %0; %2.5; %5; %7.5; %10; %12.5; %15; %17.5 ve %20 oranlarında kullanarak beton numuneleri üretmiştir. Kontrol karışımına kıyasla %7.5'in üzerindeki ikame oranlarında betonun basınç dayanımının yaklaşık %26 azalırken, mermer tozunu %7.5'e değiştirerek basınç dayanımının yaklaşık %25 arttığını belirlemiştir. Ayrıca, %5'e kadar mermer tozu kullanmanın, betonun dolaylı gerilme mukavemetini ve elastisite modülünü kontrol karışımına göre artırdığını ve daha yüksek ikame oranları için azaldığını gözlemlemiştir.

Boğa vd. (2014), mermer tozunu çimento yerine kütlece %10, %20 ve %30 oranlarında kullanarak beton numuneleri üretmişlerdir. Üretilen betonların fiziksel ve kimyasal özelliklerini belirlemek için sertleşmiş betonlar üzerinde ultrases geçiş hızı

deneyi, basınç dayanım deneyi, çekme dayanım deneyi yapmışlardır. Mermer tozu kullanılarak üretilen betonların basınç dayanımlarının yüksek olduğu görülmüştür.

Yamanel (2015), mermer tozunu çimento yerine kütlece %5, %10, %15 ve %20 oranlarında kullanarak harç numuneleri üretmiştir. Bu numuneler üzerinde porozite, işlenebilirlik, su emme oranı, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, aşınma, karbonatlaşma, yangın, donma çözülmeye dayanıklılık ve kuruma rötresi deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre mermer tozu ilavesinin %10 ikame oranına kadar normal harçlarda katkı maddesi olarak kullanılabileceğini gözlemlemiştir.

Soykan vd. (2015), yapılarda iç ve dış kaplamalarda kullanılan arduvaz ve andezit atıklarının beton agregası olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. İki farklı çimento tipinde agrega yerine %25, %50, %75, %100 olarak değiştirilmesiyle numuneler üretmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre arduvaz ve andezit atıklarının agrega olarak kullanılmasıyla üretilen betonların dayanımının referans betona göre daha yüksek olduğunu belirlemişlerdir.

Vardhan vd. (2015), yaptıkları çalışmada %50 oranında mermer tozunu çimentoyla yer değiştirmişler ve mekanik özellikleri açısından mermer tozunu analiz etmişlerdir. Sonuç olarak, %10 çimentonun değiştirildiği mermer tozu, numune karışımının işlenebilirliğini ve basınç dayanımını iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir.

Arel (2016), yaptığı çalışmada, beton üretiminde işlenmiş mermer atığının kullanılmasının çevre kirliliğini azaltmanın yanı sıra ekonomik açıdan da fayda sağladığını bildirmiştir. Ayrıca çimentonun %5 ve %10 oranında mermer tozuyla yer değiştirmesinin betonun mekanik davranışını iyileştirirken, çimento üretiminin CO_2 emisyonlarını %12 oranında azalttığını gözlemlemiştir.

Mashaly vd. (2016), atık mermer tozunu çimento yerine kütlece %40 oranında ikame ederek beton numuneleri üretmişlerdir. %20'ye kadar mermer tozu kullanılan beton numunelerinin basınç dayanımlarının arttığını, bu orandan daha fazla atık mermer kullanımının betonun basınç dayanımını düşürdüğünü tespit etmişlerdir.

Khodabakhshian vd. (2018), atık mermer tozunu çimento yerine kütlece %5, %10 ve %20 oranlarında yer değiştirilmesiyle numuneler üretmişlerdir. Yapılan çalışmada atık mermer tozunun çimento yerine %10'dan daha fazla kullanımının betonların mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilediği ancak atık mermer tozunun çimento yerine daha düşük oranlarında kullanıldığı betonlarda olumlu sonuçlar görülmüştür.

Eren (2019), atık mermer tozu ve atık lastik agrega kullanarak farklı karışım oranlarında çevre dostu beton üretimi hedeflemiştir. Betonlar üretilirken %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında atık mermer tozları kum ile yer değiştirilerek

kullanılmıştır. Üretilen betonların taze ve sertleşmiş beton özellikleri belirlenmiştir. Sonuç olarak atık mermer tozunun kum ile yer değiştirilerek kullanılabileceği belirlenmiştir.

Çınar (2019), atık mermer tozu ve uçucu kül ikame edilmiş çimento karışımlarında yüksek su/çimento oranlarında taze ve sertleşmiş özelliklerinin etkisini araştırmıştır. İlk seride çimentoya kütlece %5, %10, %15, %20, %25 oranlarında atık mermer tozu ilave edilerek harç numuneleri üretilmiştir. İkinci seride çimentoya kütlece %25 oranında uçucu kül, %10, %15, %20, %25, %30 oranında atık mermer tozu ilave edilmiştir. Üçüncü ve dördüncü seri karışımda ise ilk iki serideki oranlar sabit kalacak şekilde tüm karışıma %20 oranında kil ilave edilmiştir. Harç numuneleri 3, 7 ve 28 günlerde basınç deneyine tabi tutulmuştur. Sonuç olarak, atık mermer tozu ve uçucu kül ilave edilen karışımların zayıf zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılabileceğini belirlemiştir.

Mawlawizada (2020), atık mermer tozunu hacimce %0, %2, %4 oranlarında iri ve ince agrega ile yer değiştirerek kullanmıştır. Üretilen çevre dostu betonların taze ve sertleşmiş özelliklerini belirlemiştir. Atık mermer tozunun çevre dostu beton üretiminde kullanılabilirliğini göstermiştir.

Çelikten ve Canbaz (2021), atık andezit tozu ve atık mermer tozunu çimento yerine kütlece %5, %10, %15, %20 oranında kullanarak harç numuneleri üretmiş ve bu numuneler üzerinde çeşitli beton deneyleri yapmışlardır. Deney sonuçlarına göre mermer tozunun çimento yerine en uygun ikame oranının %10, andezit tozunun ikame oranın ise %15 olduğunu saptamışlardır.

Abbas ve Muntean (2025), yaptıkları çalışmada mermer tozunu çimento yerine %0 ile %50 oranında ikame ederek beton numunesi üretmişlerdir. Bu numuneler üzerinde basınç ve çekme dayanımı deneyleri yapmışlardır. Mermer tozunun çimento yerine ikamesinin %10-%15 arasında betonun basınç ve çekme dayanımını arttırdığını gözlemlemişlerdir. %15'ten fazla kullanılması durumunda dayanımın düştüğünü gözlemlemişlerdir.

Lifler betonun mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla kullanılabilmektedirler. Betonun çekme dayanımı, aşınma dayanımı, yorulma dayanımı ve çatlak sonrası yük taşıma kapasitesi yönünden zayıf olan betonda lif katkısı bu özelliklerin iyileştirilmesinde kullanılabilir. Beton içerisinde süreksiz olarak dağılan liflerin çatlak oluşumunu büyük oranda azalttığı, betonun şekil değiştirme kapasitesini tokluğunu, çekme dayanımını ve sünekliğini arttırdığı bilinmektedir. Lifler betonun büzülme çatlak genişliklerini azaltmaktadır (Karahan, 2006).

Çelik lif ve cam elyaf betonda çekme dayanımı açısından en iyi performansı gösteren lif çeşitleridir.

Cam elyaflı betonların mekanik özellikleri, lifin içeriğine, su/çimento oranına, boşluk oranına, kum içeriğine, liflerin dağılımına, lif uzunluğuna ve kür ortamına bağlıdır. Cam elyaf ve polipropilen lifler rötre çatlaklarını ve içsel gerilmeleri engellemek için tercih edilmektedirler. Cam elyaf düşük katkı oranlarında kullanıldığı zaman beton içerisine dağılan lifler erken dönemde oluşan iç gerilmelerden dolayı ortaya çıkan çatlakları azaltmaktadır. Cam elyafların yüksek oranda kullanılması durumunda ise betonun eğilme ve darbelere karşı direncini artırmaktadır (Ekincioğlu, 2002).

Yapılan literatür incelemesinde konuyla ilgili yapılan çalışmalara aşağıda yer verilmiştir. Bu çalışmalar;

Kurt (2006), yaptığı çalışmada 8 farklı beton numunesi üretmiştir. Üretilen numunelerin S/Ç oranları %34 ve %36 seçilmiş ve %0, %2, %4 ve %6 oranlarında cam lif kullanılarak numuneler üretmiştir. Üretilen bu numuneler üzerinde basınç, çekme ve kırılma enerjisi deneyleri yapmıştır. Sonuç olarak, cam lif oranının artmasıyla basınç dayanım değerlerinde %3.5 ile %20 arasında azalma olduğu, çekme dayanım değerlerinde %52 ile %73 arasında artış olduğunu, kırılma enerjilerinde ise 109 katına varan artış olduğunu görmüştür. Ayrıca S/Ç oranındaki %2 değişimin basınç dayanımı, çekme dayanımı ve elastisite modülü üzerinde büyük bir farkın olmadığı sonucuna varmıştır.

Baştürk (2008), yaptığı çalışmada C20 ve C16 beton sınıflı malzeme kullanarak hazırladığı numunelere elyaf takviyeli kompozitleri tek ve çift kat olarak sarmıştır. Oluşturulan lifli kompozit malzemelerle şahit numunelerin basınç dayanımları, gerilme-zaman, yük-zaman değerlerini deneylerle belirlemiştir. Sonuç olarak şahit numunelerin basınç dayanımlarıyla kompozit sarılı beton numunelerin basınç dayanımlarını karşılaştırmıştır.

Can vd. (2009), yaptıkları çalışmada farklı türdeki lifleri betonda katkı malzemesi olarak kullanmış lif katkısının betonun aşınma direncine etkisini araştırmışlardır. Beton numunelerinde çelik ve polipropilen lifleri katkı maddesi olarak kullanmışlardır. Üretmiş oldukları numuneleri basınç, aşınma, schmidt çekici deneylere tabi tutmuşlardır. Basınç dayanım sonuçlarını incelediklerinde en yüksek dayanımın çelik lif katkılı numunelerde olduğunu görmüşlerdir.

Yıldız vd. (2010), yaptıkları çalışmada farklı miktardaki cam lif katkısının betonun çekme ve basınç dayanımı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla C30 beton sınıfında, sabit su/çimento oranında beton numuneler hazırlanarak bu numuneler üzerinde basınç,

yarmada çekme dayanımı ve ultrases geçiş hızı deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Sonuç olarak 5-10 kg/m^3 cam lif katkısının beton basınç dayanımına olumlu yönde etki ettiğini, cam lif oranında artışa bağlı olarak çekme dayanımında artış olduğunu ve ultrases geçiş hızında düşüş olduğunu gözlemlemişlerdir.

Yıldız (2012), yapmış olduğu tez çalışmasında belli oranlarda cam elyaf ve atık mermer tozu içeren numuneler üzerinde porozite, ultrases hızı, basınç ve çekme dayanımı testleri yapmıştır. Sonuç olarak cam lif içeriğinin artmasıyla porozite değerlerinde artış ultrases hızında azalma görülmüştür. Numunelerin basınç dayanımlarında azalma görülmüştür. Cam lifin meydana getirdiği olumsuz etkiyi mermer tozu ilavesiyle ortadan kaldırıldığı tespit edilmiştir.

Çavdar (2014), çalışmasında, çimento harçlarında donma-çözülme döngülerinin zararlı etkilerine karşı liflerin kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu amaçla, çimento harçlarına dört farklı oranda (0.0%, 0.4%, 0.8% ve 1.2%) Polipropilen (PP), Karbon (CF), Aramid (AR), Cam (GF) ve Polivinil alkol (PVA) olmak üzere beş farklı lif türü hava maddesi ile birlikte eklenmiştir. Daha sonra bu numuneler beş farklı donma-çözülme döngüsüne (0, 25, 50, 75 ve 100) tabi tutulmuştur. Böylece, donma-çözülme etkileri altında mekanik davranışlar incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda lifler, numunelerin eğilme dayanımını ve sapma kabiliyetini artırırken, basınç dayanımını, dinamik elastisite modülünü ve özgül kütleyi azaltmaktadır. Normal koşullarda numuneler için en yüksek eğilme dayanımı %1.2 oranında CF lifi eklenmesiyle elde edilmiştir.

Gülan (2015), yaptığı çalışmada atık mermer tozu ve cam lif ilavesinin betondaki karbonatlaşmaya etkisini incelemiştir. Kütlece belli oranlarda cam elyaf ile filler malzeme yerine hacimce belli oranlarda atık mermer tozu ilave edilerek beton numuneler üretmiştir. 7 ve 28 günlük numuneler üzerinde karbonatlaşma öncesi ve sonrası olmak üzere basınç ve çekme dayanımı, ultrases geçiş hızı, porozite, kılcal su emme deneyleri uygulamıştır. Sonuç olarak, karbonatlaşma deneyi sonrası numunelerin, porozite, kapilarite, basınç ve yarmada çekme dayanım azalma görülmüştür. Cam lif oranının artışı ise numunelerde yarmada çekme dayanımı, kılcal su emme, porozite ve karbonatlaşma değerlerinde artış olduğu, basınç ve ultrases geçiş hızı değerlerinde azalma olduğu görülmüştür.

Türk ve Kına (2017), yapmış oldukları çalışmada inşaat sektöründe lifli beton üretiminin ve kullanımının yaygınlaştığından bahsetmişlerdir. Lif katkılı betonların daha esnek ve enerji yutma kapasitelerinin yüksek olduğunu vurgulamışlardır. Depremin binalar üzerinde oluşturduğu ileri düzey deplasman etkilerinin lif katkılarıyla iyileştirilebileceğini belirtmişlerdir. Lif katkılı kompozitler kullanılarak üretilecek

betonların dayanımlarının daha fazla olacağını ve donatı miktarında azaltmaya gidilebileceğini söylemişlerdir.

Dehghan vd. (2017), yaptıkları çalışmada cam elyaf takviyeli betonların basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, kuruma büzülme ve beton prizma testlerinde Alkali Silika Reaksiyonu (ASR) araştırmışlardır. Yapılan çalışma sonucunda cam elyaf 3 farklı epoksi ve doymamış polyester ile birleştirilerek kullanılmıştır. 3 farklı epokside %40, polyesterde %25, cam elyaf kullanımı sonucunda ise basınç dayanımı, kuruma büzülmesinde olumsuz etki gösterirken yarmada çekme dayanımında olumlu sonuç alındığını görmüşlerdir. Alkali Silika Reaksiyonunda ise ihmal edilebilir düzeyde genleşme olduğunu gözlemlemişlerdir.

Zhou vd. (2023), yaptıkları çalışmada endüstriyel atık içeren beton karışımlarına cam lif ilavesinin betonun mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla cam lif %0, %0.5, %1 ve %1.5 oranında ayrıca yüksek fırın cürufu ve uçucu kül kullanılmıştır. Üretilen beton numuneleri üzerinde basınç dayanımı, eğilme dayanımı, su emme, sülfat ve klor geçirgenliği ve donma-çözünme deneyleri yapmışlardır. Sonuç olarak %1-%1.5 cam lif ilavesinin hem mekanik hem de dayanım açısından en iyi sonuç verdiğini belirlemişlerdir. Ayrıca cam lifin çatlak yayılmasını önleyerek dayanımı artırdığını ve su ve iyon geçirimini azalttığını gözlemlemişlerdir.

Ramachandran ve Singh (2024), bu çalışmada çelik ve cam lifin birlikte kullanılarak üretilen lifli betonların eğilme dayanımı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Bu amaçla %0.25, %0.5 ve %0.75 oranlarında cam ve çelik lif kullanarak beton numuneleri üretmişlerdir. Bu numuneler üzerinde eğilme dayanımı, yük taşıma kapasitesi ve çatlat oluşum davranışını gözlemlemişlerdir. Sonuç olarak lif kullanımının eğilme dayanımını artırdığını gözlemlemişlerdir. En yüksek dayanımın %0.5 çelik ve %0.25 cam lif oranıyla elde edildiğini belirlemişlerdir.

Betonda sülfat etkisine ilişkin yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir. Bu çalışmalar şu şekildedir;

Erdoğdu ve Karataş (2002), yaptıkları çalışmada sülfat iyonu konsantrasyonu düşük ortamlara maruz bırakılan betonun durabilitesini karşılaştırmalı olarak araştırmışlardır. Bu amaçla çimento miktarının kütlece %10'u oranında silis dumanı ikame edilmiş ve 40x40x160 mm boyutlarında prizmatik numuneler üretmişlerdir. Numuneler 14 günlük standart kürü ortamında bekletildikten sonra deniz suyu ile SO_4^{-2} iyonu konsantrasyonu deniz suyuna eşdeğer sülfat iyonu içeren Na_2SO_4 ve $MgSO_4$ çözeltilerinde bekletilmiştir. Ayrıca silis dumanı içermeyen karışımlar hazırlanmış ve elde edilen prizmatik numunelerle kıyaslanmak amacıyla aynı ortamda bekletilmiştir. Değerlendirme

numunelerin zamanla basınç dayanımları ile ağırlıklarında meydana gelen değişimler ölçülerek gerçekleştirilmiştir.

Uyan ve Kılınç (2003), yaptıkları çalışmada magnezyum sülfat ve sodyum sülfat çözeltilerinin çimento harçlarında eğilme ve basınç dayanımına etkisini araştırmışlardır. Sonuç olarak, magnezyum sülfatın zararlı etkisinin %6'dan itibaren oluştuğu sodyum sülfatın olumsuz etkisinin %0.5 değerinde ortaya çıktığını tespit etmişlerdir. Sülfat etkisi açısından sodyum sülfatın magnezyum sülfattan daha zararlı olduğu ve bu tuzların etkilerinin su/çimento oranına göre değişiklik gösterdiğini belirlemişlerdir.

Biricik vd. (2003), yaptıkları çalışmada kalker ve silis dumanı katkılı beton numunelerini doksan gün (90) boyunca sülfat çözeltisi içerisinde bırakmışlardır. Silis dumanı ve kalker filleri katkılı betonların sülfata karşı dayanıklılığını gözlemlemek için SO_4^{-2} konsantrasyonu 10000 mg/L ve 40000 mg/L olan sodyum sülfat çözeltileri kullanmışlardır. Numunelerin üretimde beyaz kalker agregası ve Cem 42.5 beyaz portland çimentosu kullanmışlardır. Su/bağlayıcı oranı 0.60 olarak sabit tutulmuş, silis dumanı kütlece çimentonun %5, %10, ve %20'si, kalker ise kütlece filler malzemenin %5, %10 ve %20'si oranında ikame edilmiştir. Katkılı ve katkısız olarak üretilen beton numunelerinde sülfat etkisi, basınç dayanımı, kılcal su emme ve ağırlık değişimi deneyleri yapılmıştır. Her üç ortamda da silis dumanı ve kalker içeren betonun basınç dayanımının normal betona göre belirgin biçimde yüksek olduğu gözlemlemişlerdir. Ancak basınç dayanımı ile kılcal su emme arsındaki ilişki anlamlı bulunmamıştır. Ağırlık değişimindeki artışın ihmal edilebilir düzeyde olduğunu belirlemişlerdir. Su ve sülfat çözeltilerinde bekletilen, katkılı ve katkısız numune gruplarında bu süre zarfında sülfat etkisini incelemişlerdir.

Liu vd. (2023), yaptıkları çalışmada betonun magnezyum sülfat çözeltisine maruz bırakılması durumunda meydana gelen bozulmaları gözlemlemişlerdir. Farklı çimento türleri kullanılarak üretmiş oldukları beton numuneleri 28 gün boyunca magnezyum sülfat çözeltisi içerisinde bekletmişlerdir. Bekletilen numuneler üzerinde basınç dayanımı, kütle değişimi, ultrases geçiş hızı ve mikroyapı analizleri yapmışlardır. Sonuç olarak betonun bozulma miktarının kullanılan çimento türüne ve kür süresine bağlı olarak değiştiğini belirlemişlerdir. Portland çimentosunda 28 günlük basınç dayanımın %25-30 dayanım kaybının olduğu, sülfata dayanıklı çimentoda %10-15 dayanım kaybının olduğu, cüruflu çimentoda ise %15-20 dayanım kaybının olduğunu gözlemlemişlerdir.

Taguchi yöntemine ilişkin yapılan çalışmalar aşağıda verilmiştir. Bu çalışmalar şu şekildedir;

Tunçel (2018), yaptığı çalışmada, 0.40, 0.45, 0.50 oranlarında s/ç, çimento yerine %0, 5, 10 oranlarında silis dumanı, 0 gr/m^3, 500 gr/m^3, 1000 gr/m^3 oranlarında kevlar ve 0 gr/m^3, 500 gr/m^3, 1000 gr/m^3 oranlarında polipropilen lif kullanmıştır. Deney tasarımında Taguchi yöntemini kullanarak 28 günlük maksimum eğilme ve basınç mukavemetini veren optimum karışım değişkenleri belirlemiştir. Sonuç olarak 500 g/m^3 kadar kevlar ilavesi durumunda betonun basınç, eğilme ve elastisite modülü değerlerine olumlu etkisinin olduğunu belirlemiştir. Elde edilen sonuçlara göre atık malzeme olan kevların, betona katılması ile ekonomiye kazandırılabileceği gözlemlemiştir.

Erkuş (2021), yaptığı çalışmada çimento dozajını 350, 400 ve 450 kg/m^3 olarak belirlemiştir. Ayrıca su/çimento oranını 0.45, 0.5 ve 0.55 olarak seçmiştir. Hazırlanan bu karışımlara toplam hacmin %0.03, %0.05, % 0.1, %0.2 ve %0.4 oranlarında beş farklı polipropilen lif ilave etmiştir. Numunelerin mekanik ve fiziksel özelliklerini belirleyebilmek amacıyla; basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı, ultrases geçiş hızı ve su emme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel veriler kullanılarak Taguchi yöntemiyle optimum parametre seviyelerini belirlenmiştir. Ayrıca varyans analizi yapılarak deney sonuçlarına parametrelerin etkisini incelemiştir.

Tek (2022), yaptığı çalışmada uçucu kül (UK) ve Taguchi optimizasyon yaklaşımı içeren kenevir lifleri takviyeli köpük betonun fiziko-mekanik, dayanıklılık ve termal özellikleri üzerine araştırma yapmıştır. Köpük içeriği 50 kg/m^3, 75 kg/m^3 ve 100 kg/m^3 olan üç seri köpük beton karışımı hazırlamıştır. Her bir köpük beton karışımı, KL ve UK içermeyen referans karışımı ve çimento ikamesi olarak %0, %10, %20, %30, %40 ve %50 oranlarında UK kullanılmıştır. Karışımlara kütlece %0.75; %1.5 ve %3 oranında çimento katkı oranlarında değişen lif uzunluklarına sahip KL ilave edilmiştir. Numuneler üzerinde dayanıklılık, yüksek sıcaklık, donma-çözülme ve sülfat maruziyetleri deneyleri uygulanmıştır. Köpük betonların ısıl iletkenliği, kuruma rötresi, gözeneklilik, su emme, emicilik ve kuru birim ağırlık özellikleri incelenmiştir. Deneysel sonuçlar Taguchi optimizasyon yaklaşımı kullanılarak analiz yapılmıştır. Sonuçlar, KL ilavesinin yüksek olduğu numunelerde basınç ve eğilme dayanımının arttığını gözlemlemiştir. UK ilavesi kuruma büzülmesini ve ısıl iletkenliği azaltmış ve köpük betonların yüksek sıcaklık dayanımını artırdığını tespit etmiştir.

Uçar (2022), yaptığı çalışmada Taguchi yöntemini kullanarak 0.30; 0.35; 0.40; 0.45 oranlarında s/ç, %0, %0.5, %1, %1.5 oranlarında lif ile dört faklı gradasyon tasarım parametreleri olarak seçilmiş ve L16 ortogonal dizisi kullanılarak numuneler hazırlamıştır. Taguchi metodu L16 ortogonal dizisi kullanılarak üretilen betonların tasarım parametrelerine göre basınç ve eğilme dayanımları ile toklukları üzerine etkilerini

araştırmıştır. Sonuç olarak, Sika Fiber 12 katılması durumunda 50.14 MPa'lık bir basınç ve 9.81 MPa'lık eğilme dayanımı elde edilmiştir. Bu değerler kontrol numunesiyle kıyaslandığında ise basınç ve eğilme dayanımlarındaki artış oranlarının sırasıyla %4 ve %9.2 olduğu görülmüştür. Betona sadece Polimono 18 lif katılması durumunda ise 49.78 MPa'lık basınç ve 9.52 MPa'lık eğilme dayanımı elde edilmiştir. Bu değerler kontrol numunesiyle kıyaslandığında ise basınç ve eğilme dayanımlarındaki artış oranlarının sırasıyla %3.3 ve %7.3 olduğu görülmüştür. Her iki lifin hibrit olarak kullanılması durumunda ise 51.77 MPa'lık basınç ve 11.51 MPa'lık eğilme dayanımı elde edilmiştir. Lif oranının artmasıyla enerji yutma kapasitesinin normal betona göre %174.8 oranında arttığını gözlemlemiştir.

Gümüşkaşık (2023), yaptığı çalışmada uçucu kül ve yüksek fırın cüruf beton karışımlarında farklı oranlarda çimento ile yer değiştirerek kullanmıştır. Bu atıkları kullanarak betonun, mekanik ve fiziksel özelliklerinin Taguchi metodu ile optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Bu amaçla, su/çimento oranı 0.45 olarak sabit tutmuş ve farklı çimento dozajı ile uçucu kül miktarı %0, %10, %15, %20 oranlarında, yüksek fırın cürufu ise %0, %10, %15 ve %20 oranlarında kullanılarak numuneler üretmiştir. Üretilen beton numuneleri üzerinde mekanik ve fiziksel özelliklerini belirleyebilmek amacıyla; işlenebilirlik, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, ultrases geçiş hızı ve beton test (schmidt) çekiç ile yüzey sertlik deneyleri gerçekleştirmiştir. Elde dilen deneysel veriler kullanılarak Taguchi metoduyla optimum parametre seviyeleri belirlenmiştir. Yapılan çalışma sonucunda betonlarda kullanılacak optimum değerler belirlenmiştir. Bu çalışmada Taguchi metodunun kullanımının uygun olacağı sonucuna varmıştır.

Thakur ve Singh (2023), yaptıkları çalışmada Taguchi deney tasarımını kullanarak atık mermer tozunun çimento yerine %0, %10 ve %20 ikame edilmesiyle beton numuneleri üretmişlerdir. Bu numuneler üzerinde basınç dayanımı, eğilme ve çekme dayanımı deneyleri yapmışlardır. En yüksek dayanım değerinin %10 mermer tozu kullanılmasıyla olduğunu gözlemlemişlerdir.

Rathod ve Patel (2024), yaptıkları çalışmada atık mermer tozunun çimentoyla yer değiştirilerek kullanılmasıyla üretilen betonların mekanik özellikleri incelenmiştir. %5, %10 ve %15 oranlarında mermer tozu içeren beton numuneleri elde edilmiştir. Bu numuneler üzerinde basınç, eğilme ve işlenebilirlik deneyleri yapmışlardır. %10 mermer tozu içeren numunelerde dayanım ve işlenebilirlik açısından en iyi performans olduğu gözlemlenmiştir.

Khan ve Alam (2025), yaptıkları çalışmada atık mermer tozu ve uçucu kül kullanarak çevre dostu beton üretimi yapmışlardır. Beton karışımlarının mekanik

performansını ölçmek amacıyla Taguchi yöntemini kullanmışlardır. Bu amaçla mermer tozu %0, %10 ve %20 oranında kullanılarak beton karışımları yapmışlardır. Sonuç olarak en yüksek dayanımın %10 mermer tozu ve %20 uçucu kül içeren karışımlarda olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca Anova analizi yapılarak faktörlerin etkileri istatiksel olarak belirlenmiş ve en çok etkili olan faktörün mermer tozu olduğunu belirlemişlerdir.

Çavdar vd. (2025), farklı kür koşulları altında farklı oranlarda puzolanik atık içeren jeopolimer harçların fiziksel ve mekanik özelliklerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla, Sivas/Türkiye termik santralinden elde edilen uçucu kül (YA) ile Bolu ve İskenderun/Türkiye demir-çelik sanayinden elde edilen yüksek fırın cürufu (YFK) bağlayıcı malzeme olarak kullanılmıştır. Isıl kür ve su kürleme uygulanmış ve üç farklı mol oranında (8M, 10M, 12M) sodyum hidroksit (NaOH) çözeltisi ve sodyum silikat (Na_2SiO_3) kullanılmıştır. Sonuçlar, reaksiyon ürünlerinin, alkali aktivatör tiplerinin ve reaksiyon koşullarının jeopolimer harçlarda önemli faktörler olduğunu göstermiştir. %95 yüksek fırın cürufu (BFS) ve %5 uçucu kül (YA) içeren jeopolimer numunede kaydedilen en yüksek basınç dayanımı 84,7 MPa'dır. Ayrıca, iki farklı bağlayıcı katkı maddesi (mermer tozu ve stronsiyum) kullanılmış ve bunların ana bağlayıcı üzerindeki zamana bağlı etkileri analiz edilmiştir. Ayrıca, ANOVA istatistiksel sonuçlarına göre, bağımlı değişken olarak kabul edilen basınç dayanımları üzerindeki bağımsız değişkenlerin (Molarite, ana bağlayıcı oranları) R2 değeri %81,7'dir. Anlamlılık değeri 0,007'dir ve bu sonuçlar oldukça anlamlı olarak değerlendirilmiştir.

2. MALZEME VE YÖNTEM

Bu bölümde beton numunelerinin üretiminde kullanılan malzemeler, kullanılan malzemelerin fiziksel ve mekanik özellikleri, beton karışım oranları, numuneler üzerinde yapılan taze ve sertleşmiş beton deneyleri, deneylerin yapılışı hakkında genel bilgiler verilmiştir.

2.1. Malzemeler

2.1.1. Çimento

Hidrolik bağlayıcı özelliği olan çimento su ile tepkimeye girerek zamanla katılaşan, katkı maddeleri, klinker ve klinkeri oluşturan maddelerin yüksek sıcaklık altında öğütülmesi sonucunda oluşan inorganik toz malzemelerdir. Birçok çimento çeşidi bulunmaktadır. Bunlar, sülfata dayanıklı, cüruflu ve portland çimento olarak adlandırılmaktadır. Portland çimentosu klinkeri, oksitler olarak adlandırılan SiO_2, CaO, Al_2O_3, Fe_2O_3 ve az miktarda diğer maddeler içeren hammaddelerin sinterleşmesiyle meydana gelir (Çavdar, 2008).

Bu çalışmada, deney numunelerinin hazırlanmasında TS EN 197-1 standartlarına uygun olarak, Trabzon İli Karadeniz Hazır Beton santralinden CEM II 42.5R tipi portland çimentosu temin edilmiştir. Kullanılan çimentonun fiziksel ve kimyasal özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Çimentonun kimyasal ve fiziksel özellikleri

Çimento CEM II 42.5 R			
Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
SO_3 (%)	2.98	Yoğunluk(g/cm^3)	3.15
Cl (%)	0.0315	Özgül yüzey(cm^2/g)	3761
Na_2O (%)	0.46	Priz başlama süresi(dk)	168
K_2O (%)	1.26		
Total Alkali (%)	1.29		
Basınç Dayanımı			
2 Günlük Basınç Dayanımı		32 MPa	
28 Günlük Basınç Dayanımı		52.6 MPa	

2.1.2. Agrega

Agrega farklı boyutlarda parçalanmış, doğal olarak bulunan ve ocaklardan yapay olarak çıkarılan farklı geometrik şekillere sahip bir yapı malzemesidir. Bu malzeme beton

sektöründe en fazla kullanılan ve beton karışımında kullanılan atık malzemelere kıyasla maliyeti yüksek olan bir malzemedir (Ağar vd., 1998).

Agregaların tane dağılımları elek analizi deneyiyle belirlenir. Elek analiz sonuçlarına göre tane çapı 4 mm'den küçük agregalar ince agrega, 4 mm'den daha büyük agregalar ise iri agrega olarak tanımlanmaktadır. Agregalar doğal olarak temin edilebildikleri gibi, sert kaya ve taş parçalarının konkasör yardımıyla kırılması sonucunda da elde edilebilmektedir (Güner vd., 2001).

Deney numunelerinin hazırlanmasında TS 706 EN 12620 standartlarına uygun olarak Trabzon İli Karadeniz Hazır Beton santralinden 0/5 mm ince agrega ve 7/15 mm kırmataş agrega temin edilmiştir. Kullanılan agregalara ait özellikler Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Agrega Özellikleri

	Agrega Çapı (mm)	
	0-5	7-15
Kuru Özgül Ağırlığı (g/cm^3)	2.464	2.640
Doygun kuru yüzey özgül ağırlığı (g/cm^3)	2.577	2.655
Su emme oranı (%)	4.60	0.54

Üretilen beton numunelerinin içerinde kullanılan ince ve iri agrega Şekil 1a ve Şekil 1b'de verilmiştir.

(a) (b)

Şekil 1. İnce (a) ve İri Agrega (b)

2.1.3. Kimyasal Katkılar

Bu çalışmada**,** beton numunelerin üretimi esnasında, artan su ihtiyacını karşılayabilmek amacıyla TSE EN 943-2 de belirtilen standartlara uygun olarak, Sika ViskoCrete-4087 Hi-Tech süperakışkanlaştırıcı beton katkı maddesi kullanılmıştır.

Süperakışkanlaştırıcı katkı maddesi çimento miktarının %1 oranında kullanılmıştır. Kullanılan Süperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Süperakışkanlaştırıcının teknik özellikleri

Teknik Özellikler	Sika ViskoCrete-4087 Hi-Tech
Görünüm	Sıvı
Yoğunluk (gr/cm^3)	1.045-1.085
Renk	Kahverengi
pH	2-6
Klorür içeriği (%)	En fazla 0.1

2.1.4. Mermer Tozu

Bu deney çalışmasında Trabzon İli mermer ocağından mermer atıkları temin edilerek Los Angeles aşınma makinasında toz haline getirilerek çimento yerine belli oranlarda yer değiştirilerek beton numuneleri üretilmiştir. Kullanılan mermer tozuna ait özellikler Tablo 5'de verilmiştir.

Tablo 5. Kullanılan mermer tozunun özellikleri

Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
$CaCO_3$(%)	70.57	Birim hacim ağırlığı (g/cm^3)	2.37
SiO_2 (%)	20.45	Su emme oranı (%)	2.83
Al_2O_3 (%)	6.04		
Fe_2O_3	0.60		
Na_2O	2.11		

Beton numunelerinin üretiminde kullanılan mermer tozunun görüntüsü Şekil 2'de gösterilmiştir.

Şekil 2. Mermer Tozu

2.1.5. Arduvaz Tozu

Bu deney çalışmasında Trabzon ili taş ocağı atık sahasından atık arduvaz taşları temin edilerek Los Angeles aşınma makinasında toz haline getirilerek çimento yerine belli oranlarda yer değiştirilerek beton numuneleri üretilmiştir. Kullanılan arduvaz tozuna ait özellikler Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Kullanılan arduvaz tozunun özellikleri

Kimyasal Özellikler		Fiziksel Özellikler	
SiO_2 (%)	77.66	Birim hacim ağırlığı (g/cm^3)	2.56
Al_2O_3 (%)	10.85	Su emme oranı (%)	2.67
Fe_2O_3 (%)	3.13		
CaO (%)	1.27		
MgO (%)	0.20		

Beton numunelerinin üretiminde kullanılan arduvaz tozunun görüntüsü Şekil 3'de gösterilmiştir.

Şekil 3. Arduvaz tozu

2.1.6. Cam Elyaf

Bu deney çalışmasında beton numunelerinde lif katkısı olarak, Camelsan Sanayi A.Ş. tarafından üretilen kırpılmış 12 mm'lik cam lif kullanılmıştır. Kullanılan cam lifin özellikleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Cam Elyaf Özellikleri

Lif Çeşidi	Lif Boyu (mm)	Lif Çapı (μm)	Özgül Ağırlık (mg/m^3)	Elastisite Modülü (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
Cam	12	14	2.68	72000	1700

Bu deney çalışmasında beton numuneleri içerisinde kullanılan cam elyaf Şekil 4'te gösterilmiştir.

Şekil 4. Cam Elyaf

2.1.7. Karışım Suyu

Deney çalışmalarında karma suyu TS EN 1008 (2003)'e uygun olarak Trabzon İli şehir şebeke suyu kullanılmıştır.

2.1.8. Hava

Betonun toplam hava içeriği TS EN 12350-7 standardına göre iklim şartları ve agrega en büyük tane boyutuna uygun olarak seçilir.

Bu çalışmada, agrega en büyük tane boyutuna göre (Dmax=16 mm) hava sürüklenmemiş betondaki hava içeriği %2.3 olarak belirlenmiştir.

2.2. Yöntem

2.2.1. Taguchi Yöntemi

1950'lerde Genichi Taguchi tarafından geliştirilen ve önerilen istatistiksel bir yöntemdir. Taguchi yöntemi, test etkilerini en aza indirirken ortogonal diziler kullanarak test sayısını büyük oranda azaltan deneysel bir tasarım tekniğidir (Box ve Bisgaard, 1987).

Taguchi parametrelerinin tasarlanmasında aşağıdaki adımlar takip edilir (Gül ve Çelik, 2008).

- Sorunu tanımlama ve açıklama
- Nitelik parametrelerinin seçimi

- Tasarım ve proses parametrelerinin seçimi
- Dizayn parametrelerinin sınıflanması
- Gerekli seviyelerin belirlenmesi
- Etkileşimleri belirleme
- Uygun bir dikey sıra seçimi
- Bir deneyin yapımı
- İstatistiksel analiz yapımı
- Uygun testi yapmak ve sonuçları uygulamak

Taguchi, deneysel tasarımda bir analiz değişkeni veya performans ölçütü olarak kullanılmak üzere "S/N oranı" adı verilen bir kriter tanımlamıştır.

Taguchi, varyasyonu azaltmak amacıyla deneysel tasarımda performans ölçütü olarak kullanmak üzere, S/N oranı adı verilen bir dizi istatistik geliştirmiştir. Taguchi, uygulamadaki sorunları, hedefin türüne göre üç kısma ayırmış ve her biri için farklı bir S/N oranı belirlemiştir (Şirvancı, 1997; Çavdar ve Temizer, 2025).

En Küçük – En İyi

Bu tür problemlerde, kalite değişkeni Y'nin hedef değeri sıfırdır. Bu durumda, S/N oranı Eşitlik 3 ile hesaplanmaktadır.

$$\left(\frac{S}{N}\right) = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} yi^2\right) \quad \text{(Eşitlik 3)}$$

En Büyük – En iyi

Bu durumda Y'nin hedef değeri sonsuzdur. Bu durumda, S/N oranı Eşitlik 4 ile hesaplanmaktadır.

$$\left(\frac{S}{N}\right) = -10\log\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{yi^2}\right) \quad \text{(Eşitlik 4)}$$

Hedef Değer – En İyi

Bu tür problemlerde, Y için belli bir hedef değer verilmiştir. Bu durumda, S/N oranı Eşitlik 5 ile hesaplanmaktadır.

$$\left(\frac{S}{N}\right) = 10\log\left(\frac{1}{n}\frac{y^2}{s^2}\right) \quad \text{(Eşitlik 5)}$$

Yukarıda S/N oranları için belirtilen denklemlerde “y” performans karakteristiği değerini, “s^2 ” ise varyansı ifade etmektedir.

Bu çalışmada atık mermer tozu ve arduvaz tozunun çimento yerine kütlece %5; %10; %15; %20 oranında ve cam lifin belirli oranlarda hacimce %0.25; %0.50; %0.75 ve %1.00 oranlarında değiştirilerek kullanılmasıyla üretilen çevre dostu betonun Taguchi metoduyla optimizasyonu yapılarak en iyi karışım oranlarının bulunması amaçlanmıştır. Bu amaçla, Tablo 8’de verilen dört parametre esas alınarak L16(4^3) Taguchi ortogonal dizini belirlenmiştir.

Tablo 8. Deney parametreleri ve seviyeleri

Deney parametreleri	Parametre Seviyeleri			
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Mermer Tozu (A)	%5	%10	%15	%20
Arduvaz Tozu (B)	%5	%10	%15	%20
Cam Lif (C)	%0.25	%0.50	%0.75	%1

Normal şartlarda tam faktöriyel bir deney tasarımı kullanılması durumunda 64 deney yapılması gerekirken Minitab programı kullanılarak Taguchi yöntemiyle 3 faktör ve 4 seviye dikkate alınarak bu sayı 16’ya düşürülmüştür. Parametre seviyeleri dikkate alınarak toplam 16 deney numunesi ve deneylerde kullanılacak malzeme miktarları belirlenmiştir. Belirlenen ortogonal dizin Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. L16 ortogonal dizini

Deney No	A	B	C	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Lif
D1	1	1	1	20.5	20.5	1.25
D2	1	2	2	20.5	41.0	2.50
D3	1	3	3	20.5	61.5	3.75
D4	1	4	4	20.5	82.0	5.00
D5	2	1	2	41.0	20.5	2.50
D6	2	2	1	41.0	41.0	1.25
D7	2	3	4	41.0	61.5	5.00
D8	2	4	3	41.0	82.0	3.75
D9	3	1	3	61.5	20.5	3.75
D10	3	2	4	61.5	41.0	5.00
D11	3	3	1	61.5	61.5	1.25
D12	3	4	2	61.5	82.0	2.50
D13	4	1	4	82.0	20.5	5.00
D14	4	2	3	82.0	41.0	3.75
D15	4	3	2	82.0	61.5	2.50
D16	4	4	1	82.0	82.0	1.25

2.2.2. Beton Karışım Hesapları

TS 806'ya göre beton karışım hesap adımları ve karışıma giren malzemelerin özellikleri ve miktarları aşağıda verilmiştir.

- Betonun çökme miktarı, yapı elemanı türüne göre, kiriş, kolon, betonarme perde elemanları için maksimum 10 cm olarak belirlenmiştir.
- Maksimum agrega dane çapı (Dmax) 16 mm olarak seçilmiş ve kırma taş agrega kullanılmıştır.
- Dayanım sınıfı C25/30 olan beton sınıfına göre karışım hesabında esas alınacak hedef basınç dayanımı Fca=36 MPa olarak belirlenmiştir.
- Hedef basınç dayanımına göre donma-çözülme etkisi olmadığı varsayılan hava sürüklenmemiş betona göre Su/Çimento=0.46 olarak belirlenmiştir.
- Agrega en büyük tane boyutuna göre (Dmax=16 mm) kırma taş agregayla yapılmış betondaki karışım suyu 225 kg/m^3 olarak belirlenmiştir.
- Beton katkı maddesi olarak %1 oranında akışkanlaştırıcı kullanıldığından karma suyu %16 oranında azaltılır. Bu durumda su miktarı (225x(1-0.16)=189 kg/m^3) olarak hesaplanmıştır.
- Agrega en büyük tane boyutuna göre (Dmax=16 mm) hava sürüklenmemiş betondaki hava içeriği % 2.3 olarak belirlenmiştir.
- Su/Çimento oranı ve karma suyu miktarı bilindiğinden karışımdaki çimento miktarı 410 kg/m^3 olarak hesaplanmıştır.

Deneysel çalışmalar için gerekli olan seriler Taguchi ortogonal dizisine göre belirlenmiştir. TS 802 esaslarına uygun olarak hesaplanan L16 ortogonal dizisindeki serilerin karışım oranları Tablo 11'da verilmiştir. Tablo 11'de verilen kısaltmalara ilişkin açıklamalar Tablo 10'da gösterilmiştir.

Tablo 10. Kullanılan malzemelerin oranları

Kısaltma	Cam Elyaf	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu
Referans (CE0-MT0-AT0)	0	0	0
CE0.25-MT5-AT5	%0.25	%5	%5
CE0.50-MT5-AT10	%0.50	%5	%10
CE0.75-MT5-AT15	%0.75	%5	%15
CE1-MT5-AT20	%1	%5	%20
CE0.50-MT10-AT5	%0.5	%10	%5
CE0.25-MT10-AT10	%0.25	%10	%10
CE1-MT10-AT15	%1	%10	%15

Tablo 10. (Devam)

Kısaltma	Cam Elyaf	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu
CE0.75-MT10-AT20	%0.75	%10	%20
CE0.75-MT15-AT5	%0.75	%15	%5
CE1-MT15-AT10	%1	%15	%10
CE0.25-MT15-AT15	%0.25	%15	%15
CE0.50-MT15-AT20	%0.50	%15	%20
CE1-MT20-AT5	%1	%20	%5
CE0.75-MT20-AT10	%0.75	%20	%10
CE0.50-MT20-AT15	%0.50	%20	%15
CE0.25-MT20-AT20	%0.25	%20	%20

Tablo 11. L16 ortogonal dizisindeki serilerin $1m^3$ için karışım miktarları

Deney No	Çimento (kg)	İnce Agrega (kg)	İri Agrega (kg)	Su (lt)	Kimyasal Katkı (kg)	Mermer Tozu (kg)	Arduvaz Tozu (kg)	Cam Elyaf (kg)
Referans (CE0-MT-AT0)	410	891.5	781.52	198	4.1	0	0	0
CE0.25-MT5-AT5	369	891.5	781.52	198	3.6	20.5	20.5	1.25
CE0.50-MT5-AT10	348.5	891.5	781.52	198	3.4	20.5	41	2.5
CE0.75-MT5-AT15	328	891.5	781.52	198	3.2	20.5	61.5	3.75
CE1-MT5-AT20	307.5	891.5	781.52	198	3	20.5	82	5
CE0.50-MT10-AT5	348.5	891.5	781.52	198	3.4	41	20.5	2.5
CE0.25-MT10-AT10	328	891.5	781.52	198	3.2	41	41	1.25
CE1-MT10-AT15	307.5	891.5	781.52	198	3	41	61.5	5
CE0.75-MT10-AT20	287	891.5	781.52	198	2.8	41	82	3.75
CE0.75-MT15-AT5	328	891.5	781.52	198	3.2	61.5	20.5	3.75
CE1-MT15-AT10	307.5	891.5	781.52	198	3	61.5	41	5
CE0.25-MT15-AT15	287	891.5	781.52	198	2.8	61.5	61.5	1.25
CE0.50-MT15-AT20	266.5	891.5	781.52	198	2.6	61.5	82	2.5
CE1-MT20-AT5	307.5	891.5	781.52	198	3	82	20.5	5
CE0.75-MT20-AT10	287	891.5	781.52	198	2.8	82	41	3.75
CE0.50-MT20-AT15	266.5	891.5	781.52	198	2.6	82	61.5	2.5
CE0.25-MT20-AT20	246	891.5	781.52	198	2.4	82	82	1.25

2.2.3. Beton Numunelerinin Hazırlanması

Bu çalışmada kullanılan beton numuneleri Karadeniz Hazır Beton santralinde üretilmiştir. Beton numunelerinin üretiminde kullanılan çimento, ince ve iri agrega, mermer tozu, arduvaz tozu, cam elyaf, kimyasal katkı ve su hassas terazi de tartılmıştır. Belirlenen oranlarda malzemeler sırasıyla, agrega, mermer tozu, arduvaz tozu beton mikserine katılmıştır. İlave edilen malzemeler beton mikserinde sabit hızla karıştırılmıştır. Topaklanma olmaması için cam elyaf sonradan ilave edilmiştir. Karıştırma işlemi devam ederken önce suyun 1/3 eklenmiş daha sonra çimento ilave edilmiştir. Suyun 1/3'üne akışkanlaştırıcı ilave edilerek mikser içerisine eklenmiş ve son olarak kalan su ilave edilmiştir. Topaklaşma bitinceye kadar mikser çalıştırılmaya devam edilmiştir.

Üretilen beton numuneler kalıplara 3 seferde doldurularak şişleme çubuğuyla şişlenmiş, mala yardımıyla yüzeyi düzlenmiş ve tokmak yardımıyla kalıba yerleştirilmesi sağlanmıştır. Harç yerleştirilmeden önce kalıplar temizlenmiş ve motor yağıyla iyice yağlanmıştır. Malzemelerin hassas terazide tartılması Şekil 5a ve Şekil 5b'de gösterilmiştir. Malzemelerin beton mikserinde karıştırılması işlemi Şekil 6'da gösterilmiştir. Harcın kalıplara doldurulma işlemi Şekil 7a ve 7b'de gösterilmiştir.

(a) (b)

Şekil 5. Malzemelerin hassas terazide tartılması

Şekil 6. Malzemelerin beton mikserinde karıştırılması

(a) (b)

Şekil 7. Harcın kalıplara doldurulması (a), kalıpların isimlendirilmesi (b)

Kalıplara yerleştirilen harç 24 saat kalıpta tutulduktan sonra kalıplardan çıkarılmıştır. Kalıplardan çıkarılan numuneler Şekil 8'de gösterilmiştir.

Şekil 8. Kalıptan çıkarılan beton numuneleri

Kalıplardan çıkarılan numuneler 28 gün boyunca 22±3 °C kirece doygun suda kür edilmiştir. Kür havuzunda bekletilen numuneler Şekil 9'da gösterilmiştir.

Şekil 9. Numunelerin kür havuzunda bekletilmesi

2.3. Taze Beton Deneyleri

Bu bölümde üretilen beton karışımından taze halde numuneler alınarak slump (çökme) deneyi ve hava muhtevası tayini deneyi yapılmıştır.

2.3.1. Slump (Çökme) Deneyi

TS EN 12350-2 standardına uygun olarak yapılan çökme deneyi taze beton kıvamını tayin etmek amacıyla yapılır. Çökme deneyi 10 mm ile 200 mm arasında çökme değerine sahip betonlar için uygundur. Agrega en büyük tane büyüklüğü 40 mm'den büyük olan betonlarda çökme deneyi uygun değildir (TS EN 12350–2).

Çökme deneyi için metal malzemeli kesik koni şeklinde alt ve üst kısımları açık huni kullanılır. Huninin iç yüzeyi ve taban plakası nemli bez ile silinerek temizlenir ve nemlendirilir. Huninin içerisine beton doldurulması esnasında iki ayak basma parçasına basılarak sabitlenmesi sağlanır. Taze beton huni içerisine üç tabaka halinde eşit kalınlıkta doldurulur. Doldurma esnasında her tabaka sıkıştırma çubuğu yardımıyla 25 defa şişlenerek beton iyice sıkıştırılır. Sıkıştırma işlemi tamamlandıktan sonra kalıbın üst seviyesinden taşan taze beton mastar yardımıyla sıyırıp alınarak düz bir yüzey oluşturulur. Daha sonra kalıp iki taraftan el tutamaklarından tutularak sabit hızda 5 ila 10

saniye arası düşey yönde yukarı doğru çekilerek alınır. Kalıbın çıkarılmasından hemen sonra bir cetvel yardımıyla kalıp üst seviyesi ile çöken beton kütlesinin en üst noktası arasındaki mesafe ölçülerek çökme mesafesi hesaplanır (TS EN 12350–2). Slump deneyi Şekil 10'da gösterilmiştir.

Şekil 10. Slump (Çökme) deneyi

2.3.2. Hava Muhtevası Tayini Deneyi

TS EN 12350-7 standardına uygun olarak yapılan bu deney sıkıştırılmış taze betonda hava muhtevasının belirlenmesini sağlar. Bu deney en büyük tane büyüklüğü 63 mm'ye kadar olan agregalarla yapılmış betonda uygulanır (TS EN 12350–7).

Taze beton hava ölçer kabına mümkün olduğu kadar hava kalmayacak şekilde kepçe yardımıyla doldurulur. Beton, kap içerisine eşit kalınlıkta üç tabaka halinde yerleştirilmelidir. Her tabaka şişleme çubuğu yardımıyla sıkıştırılmalıdır. Son tabakaya yerleştirilen beton kalıbı tam dolduracak ancak taşmayacak şekilde olmalıdır (TS EN 12350–7).

Basınç ölçme metodunda, taze beton içerisinde hava kalmayacak şekilde hava ölçer kabına taze beton kepçe yardımıyla üç tabaka halinde doldurularak sıkıştırılır. Kapak düzeneği hava almayacak şekilde hava ölçer kabına kelepçelenir. Ana hava vanası kapatılır ve A ve B vanaları açılır. Şırınga yardımıyla A ve B vanasından ana vanadan su çıkıncaya kadar cihaza su doldurulur. Kapalı hava hücresine bağlı hava tahliye vanası

kapatılır ve hava hücresi içerisine basınç gösterge ibresi sıfır çizgisine gelinceye kadar hava pompalanır. Daha sonra A ve B vanalarının her ikisi de kapatılarak ana hava vanası açılır. Basınç ibresinin gösterdiği değer hava yüzdesi olarak okunur (TS EN 12350–7). Deney esnasında çekilen fotoğraf Şekil 11'de gösterilmiştir.

Şekil 11. Hava Muhtevası deneyi

2.4. Sertleşmiş Beton Deneyleri

2.4.1. Basınç Dayanımı Deneyi

Bu deney TS EN 12390-3 standardına uygun olarak sertleşmiş beton numunelerinin basınç dayanımlarının tayini için yapılır. Deney numuneleri TS EN 12390-3 standardına uygun basınç deney makinasında kırılıncaya kadar yüklenir. Numunelerin taşıyabileceği en büyük yük belirlenerek basınç dayanımı hesaplanır (TS EN 12390-3).

Numuneler deney makinasına yerleştirilmeden önce numune yüzeyleri iyice kurulanır. Deney makinası yükleme başlıkları temizlenir. Küp numuneler, uygulama yönü beton döküm yönüne dik olacak şekilde yerleştirilmelidir. Deney numuneleri makinanın alt yükleme başlığı üzerine merkezlenerek yerleştirilmelidir. Yükleme işlemi için 0.2 MPa/s -1.0 MPa/s arasında sabit bir hız seçilmelidir. Uygulanacak yük deney numunesine darbe etkisi olmaksızın seçilen hızdan ± %10 geçmeyecek şekilde sapma ve en büyük yüke ulaşıncaya kadar sabit hızda uygulanmalıdır. Göstergeden okunan en büyük yük değeri kaydedilmelidir (TS EN 12390-3). Şekil 12'de basınç dayanım deney makinası gösterilmiştir.

Beton basınç dayanımı aşağıda Eşitlik 6 yardımıyla hesaplanır;

$$Fc=F/Ac \quad (\text{Eşitlik 6})$$

Fc = Basınç dayanımını, MPa (N/mm^2),

F= Kırılma anında ulaşılan en büyük yükü, N,

Ac = Numunenin, üzerine basınç uygulandığı en kesit alanı, (mm^2) ifade etmektedir (Bingöl ve Çavdar, 2018).

Şekil 12. Basınç dayanım deney makinası

2.4.2. Yarmada Çekme Dayanımı Deneyi

Bu deney TS EN 12390-6 standardına uygun olarak sertleşmiş beton numunelerinin yarmada çekme dayanımlarının tayini için yapılır.

Kür havuzunda bekletilen deney numuneleri sudan çıkarıldıktan sonra iyice kurulanmalıdır. Sabitleme cihazı, sıkıştırma şeritleri, yükleme parçaları silinip temizlenmelidir. Deney numunesi sabitleme cihazı kullanılarak makinanın tam merkezine yerleştirilmelidir. Sıkıştırma şeritleri numunenin yükleme düzleminde alt ve üst kısmı boyunca dikkatlice yerleştirilmelidir. Makinanın alt ve üst yükleme başlıkları birbirine paralel olmalıdır (TS EN 12390-6).

Yükleme hızı 0.04 MPa/s ile 0.06 MPa/s arasında sabit gerilme hızı sağlayacak şekilde olmalıdır. Yük sabit hızda artırılarak darbe etkisi oluşturmadan yükleme hızının ±%1 sapma sınırları içerisinde kalarak numune kırılıncaya kadar kesintisiz uygulanmalıdır. Yük göstergesinde ulaşılan en büyük yük kaydedilmelidir (TS EN 12390-6). Şekil 13'de yarmada çekme dayanımı deney makinası gösterilmiştir.

Betonun yarmada çekme dayanımı aşağıda Eşitlik 7 yardımıyla hesaplanır;

$$Fd=2F/Lxd \quad \text{(Eşitlik 7)}$$

Fd= Yarmada çekme dayanımını, (MPa),

F= En büyük yükü, (N),

L= Numunenin yükleme parçasına temas çizgisi uzunluğunu, (mm),

d= Numunenin en kesit boyutlarını, (mm)

Şekil 13. Yarmada çekme dayanımı deney makinası

2.4.3. Ultrases Geçiş Hızı Deneyi

Ultrases geçiş hızı yönteminde deney numunelerinin bir yüzüne ses üstü atım uygulanarak beton içerisinde basınç dalgaları oluşturulur. Bu yöntemde amaç ses üstü dalgalarının gönderilen yüzeyle alınan yüzey arasındaki mesafeyi ne kadar sürede kat ettiğini belirlemektir. Böylece ses üstü dalgaların beton numunesi içerisinden geçiş hızı hesaplanabilmekte ve beton dayanımı hakkında bilgi sahibi olunabilmektedir.

Ultrases geçiş hızı aşağıda Eşitlik 8 yardımıyla hesaplanır;

$$Hız(V)=s/tx106 \quad \text{(Eşitlik 8)}$$

V = Ultrases geçiş dalga hızı (km/s),

s = Transdüserler arasındaki mesafe (m),

t = Dalganın gönderildiği yüzeyinden, alındığı yüzeye kadar geçen zaman (μs).

Şekil 14. Ultrases geçiş hızı deneyi

2.4.4. Geri Sıçrama (Test Çekici) Deneyi

Bu deney yöntemi sertleşmiş betonun dayanımını belirlemek için kullanılan tahribatsız deney yöntemlerindendir. Bu yöntem betonun dayanım ve dayanıklılığı hakkında bilgi vermektedir. Bu deney TS EN 12504-2 standardına uygun olarak yapılmaktadır. Deney numuneleri üzerinde 10 farklı noktadan 90^0 açıyla vuruş yapılarak elde edilen değerlerin ortalaması alınmıştır.

2.5. Sülfat Direnci Deneyi

Bu deney ASTM C 1012'ye uygun yapılmıştır. 150x150x150 mm'lik 3 adet küp numune 28 gün boyunca magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisi içerisinde bekletilmiştir. Sülfat ortamında bekletilen numuneler üzerinde basınç dayanım deneyi ve test çekici deneyi yapılmış ve sülfata maruz bırakılmamış numunelerle karşılaştırılmıştır.

2.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

SEM tekniği, özel hazırlanmış sınırlı kalınlıktaki numunelerden yüksek enerjili elektron demeti geçirerek görüntü alan ve elektron demetinin numune içinden geçerken uğradığı difraksiyonla faz karakterizasyonu da sağlayan bir tekniktir. SEM çimento kimyasında klinkerinin ve betondaki agreganın muayenesi için kullanılmaktadır. Çimento kimyasını ilgilendiren pek çok materyali optik mikroskoptan çözümlemek mümkün olmadığından SEM bu alanda oldukça kullanışlıdır (Yazıcı, 1997).

SEM Analizi ile 1 nm'den daha fazla çözünürlüğe ulaşılabilir. Standart SEM analizi araçları maksimum vakumda, iletken ve kuru yüzeyleri incelemek için kullanılır. Fakat nemli ortamlarda, düşük vakumda sıcaklık farklarının fazla olduğu ortamlarda çalışabilen cihazlar da bulunmaktadır (Erkuş, 2021).

SEM analizinde görüntü elde etmek için en fazla uyarı gönderilen elektron demeti aracılığıyla numune içerisindeki atomların yaydığı ikincil elektronlardan (SE) faydalanılır. Numunelerin ayrı bölgesinden salınan ikincil elektronların miktarındaki farklılık ilk önce yüzeyin demetle buluşma açısına bağlıdır. İkincil elektronların ya geri saçılan elektronlar (BSE), ışık (CL), karakteristik X ışınları, numune akımı ve aktarılan elektronlarla da numuneden çeşitli sinyaller alınarak istenilen nitelikte kompozisyon ve topoğrafı analizleri elde edilir (Çavdar ve Yetgin, 2005).

2.7. XRD Analizi (X-Işını Kırınımı)

Beton numunelerinin X ışını kırınımı (XRD) yöntemi ile faz analizleri ve kristal yapı tanımlaması bakır x ışını tüplü Shimadzu XRD–6000 cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Basınç mukavemeti deneyi sonrası çok ince öğütülerek toz haline getirilen numune, cihazın numune tutucusuna yerleştirilerek kristal faz analizi yapılmıştır (Çavdar, 2008).

3. BULGULAR

Bu bölümde taze ve sertleşmiş beton deney sonuçlarının Taguchi yöntemiyle analizleri tablo ve grafiklerle gösterilmiştir.

3.1. Taze Beton Deney Sonuçları

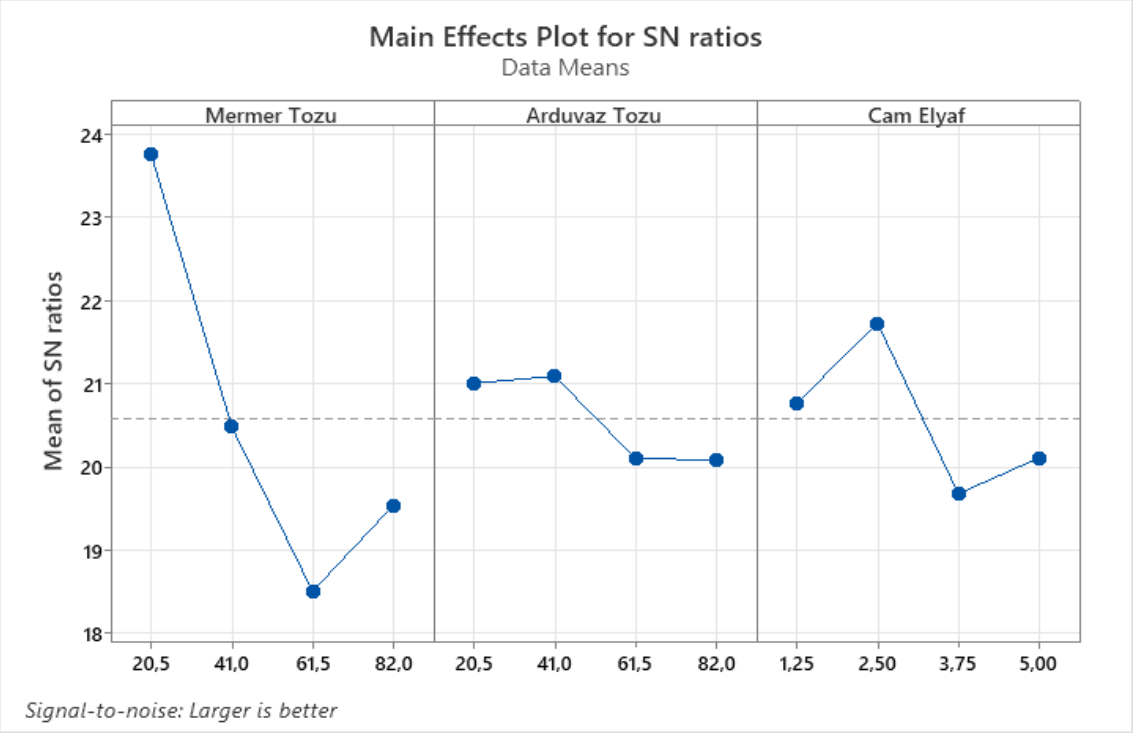
3.1.1. Slump (Çökme) Deneyi Sonuçları

Yapılan deney sonucunda bulunan slump deney sonuçlarının Taguchi metoduyla analizleri yapılmıştır. Betonun daha fazla akışkan olması amaçlandığından slump sonucunun yüksek olması daha iyi olacağı için S/N oranları hesaplanırken En büyük- En iyi durumu dikkate alınmıştır. Tablo 12'de slump deneyi sonuçlarına göre elde edilen S/N (sinyal gürültü oranı) oranları verilmiştir.

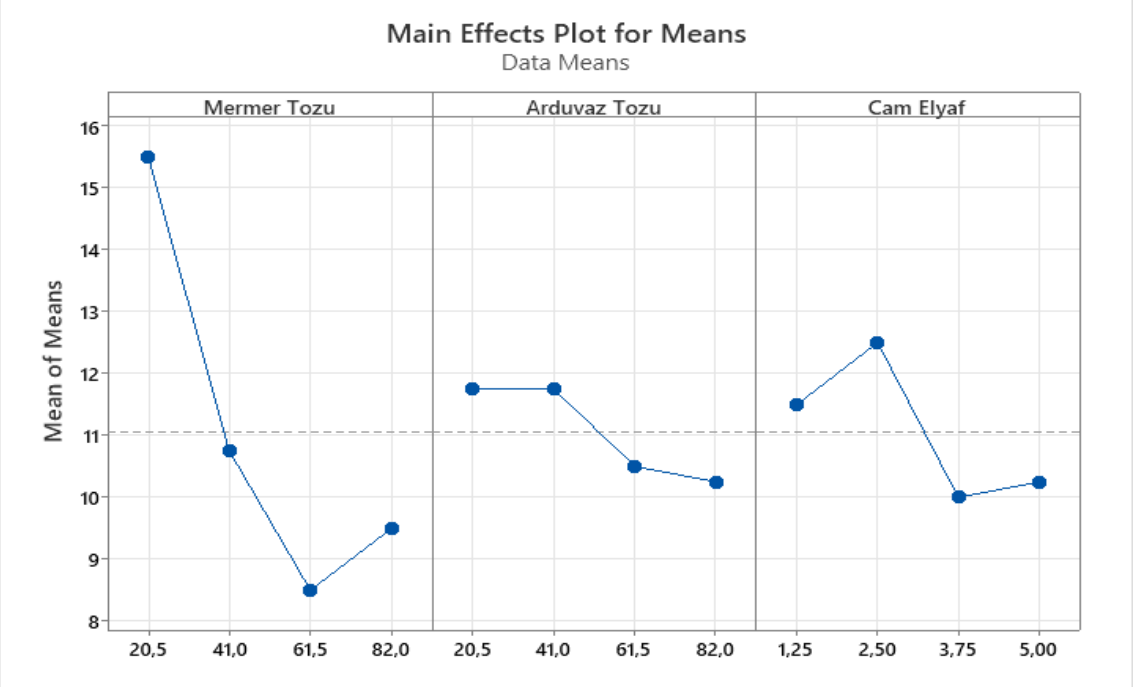
Tablo 12. Slump (Çökme) deneyi S/N oranları

Deney No	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf	Slump deney sonuçları	S/N oranı
D1	20.5	20.5	1.25	17	24.6090
D2	20.5	41.0	2.50	17	24.6090
D3	20.5	61.5	3.75	15	23.5218
D4	20.5	82.0	5.00	13	22.2789
D5	41.0	20.5	2.50	13	22.2789
D6	41.0	41.0	1.25	12	21.5836
D7	41.0	61.5	5.00	10	20.0000
D8	41.0	82.0	3.75	8	18.0618
D9	61.5	20.5	3.75	8	18.0618
D10	61.5	41.0	5.00	9	19.0849
D11	61.5	61.5	1.25	7	16.9020
D12	61.5	82.0	2.50	10	20.0000
D13	82.0	20.5	5.00	9	19.0849
D14	82.0	41.0	3.75	9	19.0849
D15	82.0	61.5	2.50	10	20.0000
D16	82.0	82.0	1.25	10	20.0000

Her parametre seviyesine göre S/N oranı ve slump değerleri hesaplanmış ve optimum değerler bu sonuçlara göre belirlenmiştir. Parametre seviyelerine göre S/N oranları Şekil 15'de verilmiştir. Parametre seviyelerine göre slump deneyi ortalama etki grafiği Şekil 16'da verilmiştir.



Şekil 15. Parametre seviyelerine göre slump deneyi S/N oranları



Şekil 16. Parametre seviyelerine göre slump deneyi ortalama etki grafiği

Şekil 15 incelendiğinde; %5 mermer tozu, %10 arduvaz tozu, %0.50 cam elyafın olduğu durumda en yüksek slump değerine ulaşıldığı görülmüştür. Bu sebeple mermer tozu 20.5 gr, arduvaz tozu 41 gr cam elyaf 2.50 gr seviyeleri (A1B2C2) Taguchi optimizasyon metoduna göre en optimum faktör seviyelerini oluşturmuştur. Sonuç olarak mermer tozunun %5, arduvaz tozunun %10'a kadar çimentoyla yer değiştirilmesinin

slump değerlerini artırdığı görülmüştür. %10'dan fazla kullanılması durumunda ise slump değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Cam elyaf katkısının da %0.50 oranına kadar slump değerlerini artırdığı gözlemlenmiştir.

Tablo 13'de S/N oranının faktörlere göre değişimi ve Tablo 14'de ise ortalamanın faktörlere göre değişimini veren değerlerin sunulduğu tablolar verilmiştir.

Tablo 13. S/N oranları için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam elyaf
1	23.75	21.01	20.77
2	20.48	21.09	21.72
3	18.51	20.11	19.68
4	19.54	20.09	20.11
Delta	5.24	1.01	2.04
Rank	1	3	2

Tablo 14. Ortalamalar için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam elyaf
1	15.500	11.750	11.500
2	10.750	11.750	12.500
3	8.500	10.500	10.000
4	9.500	10.250	10.250
Delta	7.000	1.500	2.500
Rank	1	3	2

Her faktör için hesaplanan S/N oranının en yüksek olduğu değer en iyi deney sonucunu göstermektedir. Tablo 13 incelendiğinde; slump değerine en çok etkisi olan faktörün mermer tozu olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının mermer tozu (1), cam elyaf (2) ve en düşük deltaya sahip arduvaz tozu (3) olduğu görülmektedir.

Tablo 14'de ortalamalar grafiğinde de slump değerine en çok etkisi olan faktörün mermer tozu olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının aynı şekilde mermer tozu (1), cam elyaf (2) ve en düşük deltaya sahip arduvaz tozu (3) olduğu görülmektedir. Tablo 13 ve Tablo 14'de verilen delta ve rank değerleri incelendiğinde sonuçların birbirine paralel olduğu görülmektedir.

Deney parametrelerinin slump değerleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla varyans analizi yapılmıştır. Tablo 15'de varyans analiz sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 15. Slump deneyi varyans analiz sonuçları

Parametre	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Ortalama Kare (MS)	F değeri	P değeri	Faktör Etkisi (%)
Mermer tozu	3	115.187	38.396	29.25	0.001	78.39
Arduvaz tozu	3	7.688	2.563	1.95	0.223	5.23
Cam elyaf	3	16.188	5.396	4.11	0.067	11.02
Hata (Error)	6	7.875	1.313			5.36
Toplam (Total)	15	146.938				100.00
R-Sq= %94.64	R-Sq(adj)= %86.60					

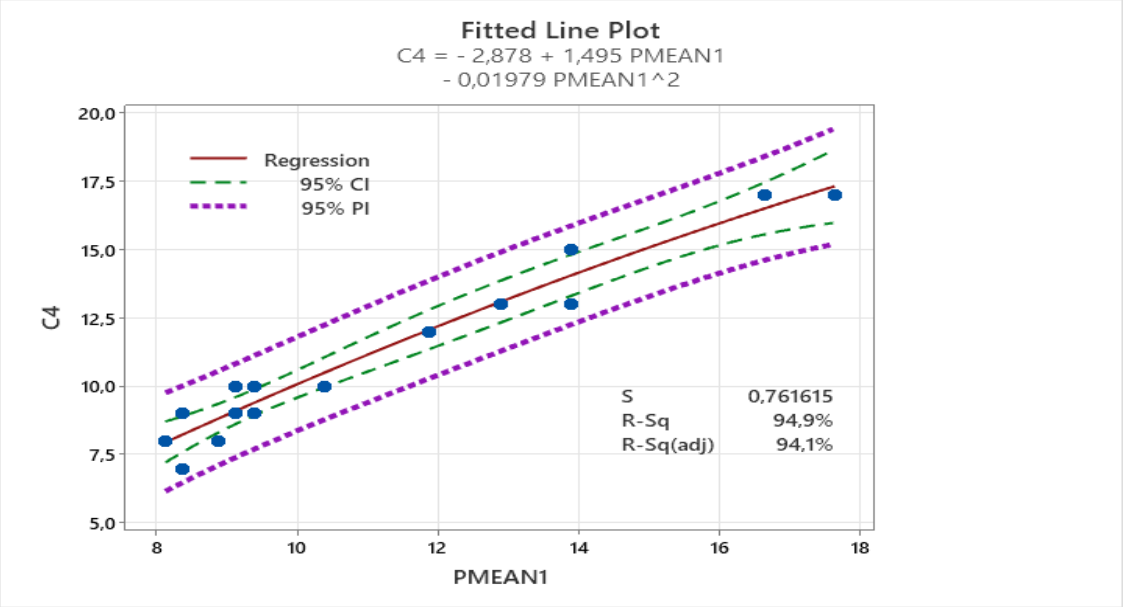
Varyans analiz sonuçları incelendiğinde; slump deney sonuçlarına en yüksek etkiyi %78.39 oranıyla mermer tozunun verdiği görülmektedir. Diğer faktörler %11.02 oranıyla cam elyaf ve %5.23 oranıyla arduvaz tozudur.

Tablo 16'da slump deneyindeki parametrelerin optimum seviyeleri, Taguchi analizi ve doğrulama deney sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 16. Slump tahmini analizi ve doğrulama deney sonuçları

Deney Parametreleri	Optimum parametre seviyeleri	Taguchi analiz sonucu	Doğrulama deney sonucu
Mermer tozu	%5	17.63	17
Arduvaz tozu	%10		
Cam elyaf	%0.50		

Tablo 16 incelendiğinde; mermer tozunun %5, arduvaz tozunun %10, cam elyafın %0.50 olduğu durumlarda optimum sonuç elde edilmiştir. Ayrıca Taguchi analiz sonucu ve doğrulama deney sonucu hesaplanmış ve bu sonuçların birbirine çok yakın değerler olduğu ve arada %3.57'lik bir fark olduğu görülmüştür. Şekil 18'da tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği verilmiştir.



Şekil 17. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği

Şekil 17 incelendiğinde; tahmini değerler ile gerçek değerler grafiğinde noktaların çizgi üzerinde ve yakınında olduğu görülmüştür. Bu da sonuçların güven aralığında bulunduğunu göstermektedir. Grafikte bulunan mor çizgiler bireysel gözlemlerin dağılımını ifade etmektedir. Bu da modelin bireysel veri noktalarını ne kadar iyi tahmin edebileceğini göstermektedir. Tahmin aralığı genel olarak güven aralığından daha geniştir çünkü bireysel verilerin değişkenliği daha fazla olmaktadır. Grafikte yer alan yeşil çizgiler arasındaki alan, tahmin edilen regresyon çizgisi etrafındaki olası ortalama sapmayı ifade eder. Bu da modelin tahminlerinin ne kadar kesin olduğunu göstermektedir.

3.1.2. Hava Muhtevası Deney Sonuçları

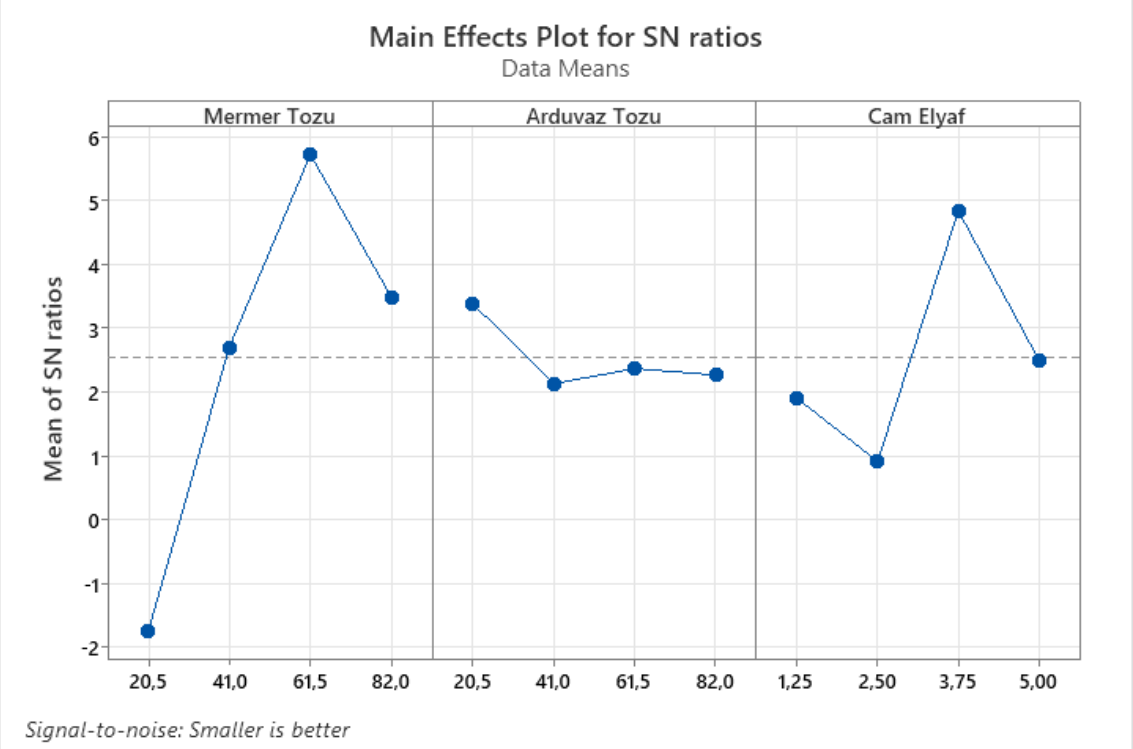
Yapılan deney sonucunda bulunan hava muhtevası deney sonuçlarının Taguchi metoduyla analizleri yapılmıştır. Beton içerisindeki hava miktarının düşük olması dayanımı artıracağından hava muhtevası deney sonuçlarının düşük olması istendiğinden S/N oranları hesaplanırken En küçük - En iyi durumu dikkate alınmıştır.

Taguchi tasarımlarda “maksimum en iyi” ya da “minimum en iyi” problem şekline bakılmaksızın gürültü/şiddet grafiğinde problemi en iyi şekilde tanımlamak için faktör seviyelerini belirlemede daima maksimum nokta alınır. Faktör seviyelerini belirlemede bir diğer çözüm ise ortalama etki grafiğine bakmaktır. Eğer problem “minimum en iyi” şeklinde ise ortalama etki grafiğinde minimum değer alınır (Çavdar ve Temizer, 2024). Tablo 17’de hava muhtevası deneyi sonuçlarına göre elde edilen ortalama etki değerleri verilmiştir.

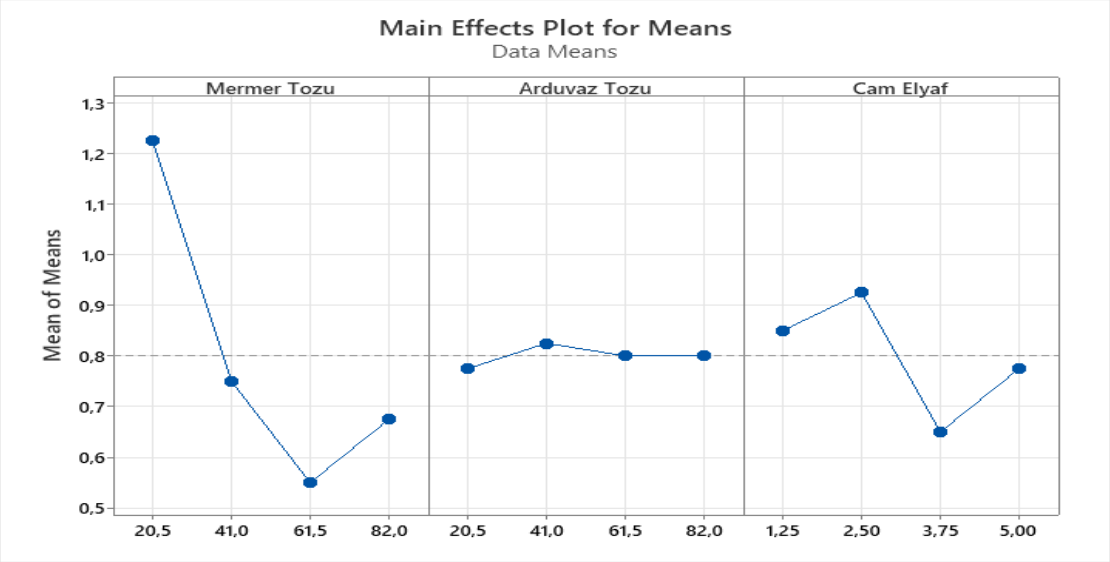
Tablo 17. Hava Muhtevası deneyi ortalama etki değerleri

Deney No	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Lif	Hava Muhtevası Deney Sonuçları	Ortalama Etki Değerleri
D1	20.5	20.5	1.25	1.3	1.3
D2	20.5	41.0	2.50	1.3	1.3
D3	20.5	61.5	3.75	1.2	1.2
D4	20.5	82.0	5.00	1.1	1.1
D5	41.0	20.5	2.50	0.9	0.9
D6	41.0	41.0	1.25	0.8	0.8
D7	41.0	61.5	5.00	0.8	0.8
D8	41.0	82.0	3.75	0.5	0.5
D9	61.5	20.5	3.75	0.3	0.3
D10	61.5	41.0	5.00	0.6	0.6
D11	61.5	61.5	1.25	0.5	0.5
D12	61.5	82.0	2.50	0.8	0.8
D13	82.0	20.5	5.00	0.6	0.6
D14	82.0	41.0	3.75	0.6	0.6
D15	82.0	61.5	2.50	0.7	0.7
D16	82.0	82.0	1.25	0.8	0.8

Her parametre seviyesine göre S/N oranı ve hava muhtevası değerleri hesaplanmış ve optimum değerler bu sonuçlara göre belirlenmiştir. Parametre seviyelerine göre S/N oranları Şekil 18'de verilmiştir. Parametre seviyelerine göre hava muhtevası deneyi ortalama etki grafiği Şekil 19'da verilmiştir.



Şekil 18. Parametre seviyelerine göre hava muhtevası deneyi S/N oranları



Şekil 19. Parametre seviyelerine göre hava muhtevası deneyi ortalama etki grafiği

Hava muhtevası deney sonuçlarının düşük olması istendiğinden, problem "minimum en iyi" şeklinde olduğundan ortalama etki grafiğinde minimum değer alınır. Şekil 20 incelendiğinde; %15 mermer tozu, %5 arduvaz tozu, %0.75 cam elyafın olduğu durumda minimum değere ulaşıldığı görülmüştür. Bu sebeple mermer tozu 61.5 gr, arduvaz tozu 20.5 gr, cam elyaf 3.75 gr seviyeleri (A3B1C3) Taguchi optimizasyon metoduna göre en optimum faktör seviyelerini oluşturmuştur.

Tablo 18'de S/N oranının faktörlere göre değişimi ve Tablo 19'da ise ortalamanın faktörlere göre değişimini veren değerlerin sunulduğu tablolar verilmiştir.

Tablo 18. S/N oranları için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf
1	-1.7423	3.3827	1.9045
2	2.7030	2.1333	0.9181
3	5.7133	2.3683	4.8329
4	3.4775	2.2673	2.4961
Delta	7.4556	1.2494	3.9148
Rank	1	3	2

Tablo 19. Ortalamalar için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf
1	1.2250	0.7750	0.8500
2	0.7500	0.8250	0.9250
3	0.5500	0.8000	0.6500
4	0.6750	0.8000	0.7750
Delta	0.6750	0.0500	0.2750
Rank	1	3	2

Tablo 18 incelendiğinde; hava muhtevasına en çok etkisi olan faktörün mermer tozu olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının mermer tozu (1), cam elyaf (2) ve en düşük deltaya sahip arduvaz tozu (3) olduğu görülmektedir.

Tablo 19'da ortalamalar grafiğinde de hava muhtevasına en çok etkisi olan faktörün mermer tozu olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının aynı şekilde mermer tozu (1), cam elyaf (2) ve en düşük deltaya sahip arduvaz tozu (3) olduğu görülmektedir. Tablo 18 ve Tablo 19'da verilen delta ve rank değerleri incelendiğinde sonuçların birbirine paralel olduğu görülmektedir.

Deney parametrelerinin hava muhtevası sonuçları üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla varyans analizi yapılmıştır. Tablo 20'de varyans analiz sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 20. Hava Muhtevası deneyi varyans analiz sonuçları

Parametre	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Ortalama Kare (MS)	F değeri	P değeri	Faktör Etkisi (%)
Mermer tozu	3	1.04500	0.348333	19.90	0.002	79.17%
Arduvaz tozu	3	0.00500	0.001667	0.10	0.960	0.38%
Cam elyaf	3	0.16500	0.055000	3.14	0.108	12.50%
Hata (Error)	6	0.10500	0.017500			7.95%
Toplam (Total)	15	1.32000				100.00%
R-Sq= %92.05	R-Sq(adj)= %80.11					

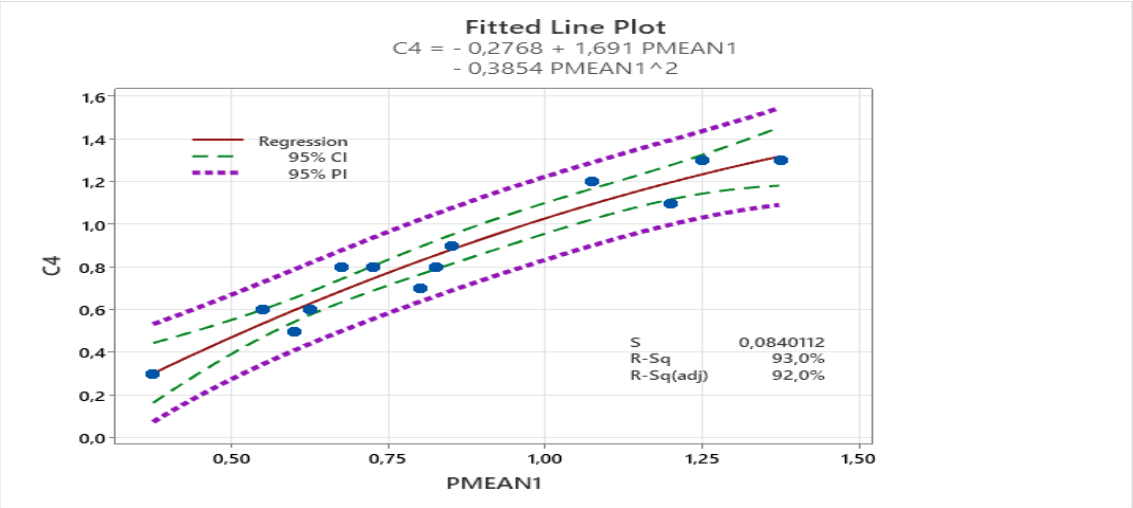
Varyans analiz sonuçları incelendiğinde; hava muhtevası deney sonuçlarına en yüksek etkiyi %79.17 oranıyla mermer tozunun verdiği görülmektedir. Diğer faktörler %12.50 oranıyla cam elyaf ve %0.38 oranıyla arduvaz tozudur.

Tablo 21'de hava muhtevası deneyindeki parametrelerin optimum seviyeleri Taguchi analizi ve doğrulama deney sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 21. Hava muhtevası deneyi tahmini analizi ve doğrulama deney sonuçları

Deney Parametreleri	Optimum parametre seviyeleri	Taguchi analiz sonucu	Doğrulama deney sonucu
Mermer tozu	%15	0.375	0.3
Arduvaz tozu	%5		
Cam elyaf	%0.75		

Tablo 21 incelendiğinde; mermer tozunun %15, arduvaz tozunun %5, cam elyafın %0.75 olduğu durumlarda optimum sonuç elde edilmiştir. Ayrıca Taguchi analiz sonucu ve doğrulama deney sonucu hesaplanmış ve bu sonuçların birbirine yakın değerler olduğu görülmüştür. Şekil 21'de tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği verilmiştir.



Şekil 20. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği

Şekil 20 incelendiğinde; tahmini değerler ile gerçek değerler grafiğinde noktaların çizgi üzerinde ve yakınında olduğu görülmüştür. Bu da sonuçların güven aralığında bulunduğunu göstermektedir. Grafikte bulunan mor çizgiler bireysel gözlemlerin dağılımını ifade etmektedir. Bu da modelin bireysel veri noktalarını ne kadar iyi tahmin edebileceğini göstermektedir. Tahmin aralığı genel olarak güven aralığından daha geniştir çünkü bireysel verilerin değişkenliği daha fazla olmaktadır. Grafikte yer alan yeşil çizgiler arasındaki alan, tahmin edilen regresyon çizgisi etrafındaki olası ortalama sapmayı ifade eder. Bu da modelin tahminlerinin ne kadar kesin olduğunu göstermektedir.

3.2. 7 Günlük Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

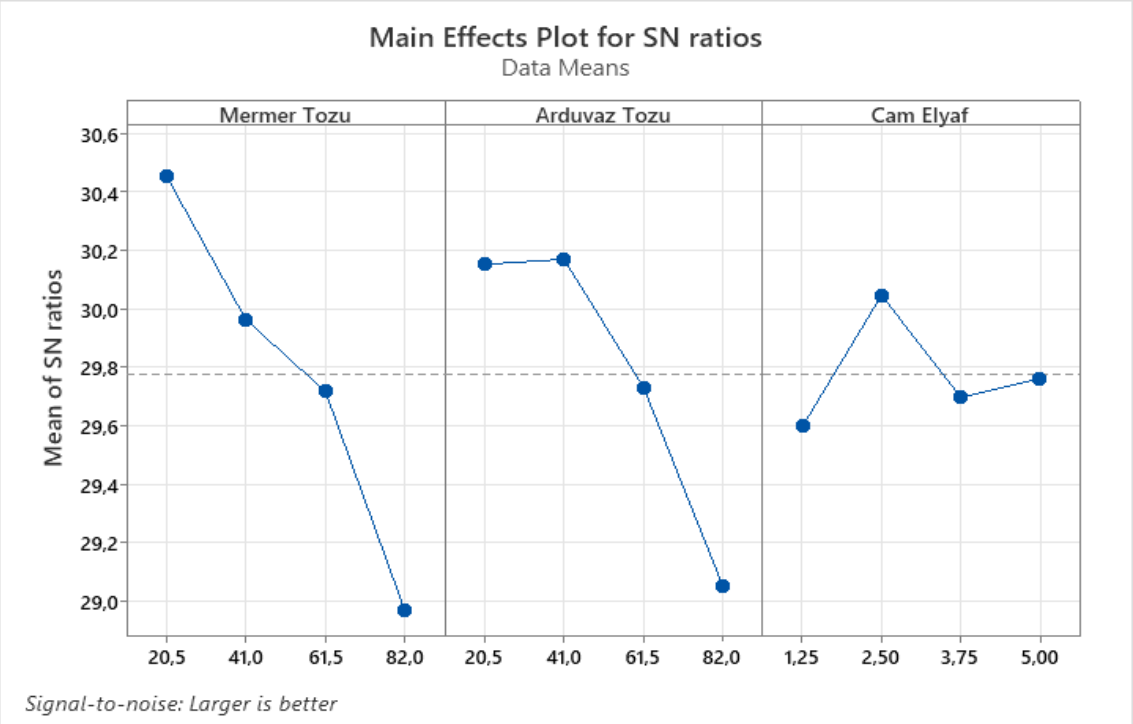
3.2.1. 7 Günlük Basınç Dayanım Deneyi Sonuçları

Yapılan deney sonucunda bulunan basınç dayanımı değerlerinin Taguchi metoduyla analizleri yapılmıştır. Beton basınç dayanımının yüksek olması daha iyi olacağı için S/N oranları hesaplanırken En büyük- En iyi durumu dikkate alınmıştır. Tablo 22'de basınç dayanımı deney sonuçlarına göre elde edilen S/N (sinyal gürültü oranı) oranları verilmiştir.

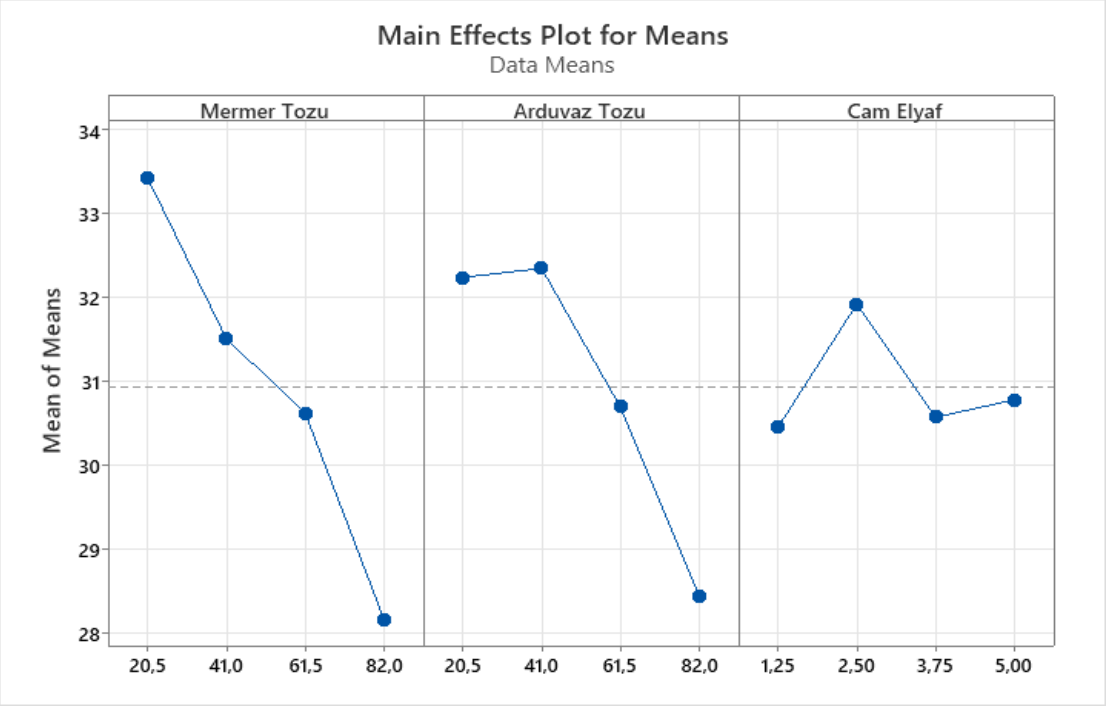
Tablo 22. Basınç dayanımı S/N oranları

Deney No	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf	Basınç Dayanımı	S/N oranı
D1	20.5	20.5	1.25	35.21	30.9333
D2	20.5	41.0	2.50	36.24	31.1838
D3	20.5	61.5	3.75	32.75	30.3042
D4	20.5	82.0	5.00	29.50	29.3964
D5	41.0	20.5	2.50	32.72	30.2963
D6	41.0	41.0	1.25	32.16	30.1463
D7	41.0	61.5	5.00	31.40	29.9386
D8	41.0	82.0	3.75	29.76	29.4727
D9	61.5	20.5	3.75	30.78	29.7654
D10	61.5	41.0	5.00	31.98	30.0976
D11	61.5	61.5	1.25	29.83	29.4931
D12	61.5	82.0	2.50	29.91	29.5163
D13	82.0	20.5	5.00	30.25	29.6145
D14	82.0	41.0	3.75	29.01	29.2510
D15	82.0	61.5	2.50	28.81	29.1909
D16	82.0	82.0	1.25	24.61	27.8222

Her parametre seviyesine göre S/N oranı ve basınç dayanımları hesaplanmış ve optimum değerler bu sonuçlara göre belirlenmiştir. Parametre seviyelerine göre S/N oranları Şekil 21'de verilmiştir. Parametre seviyelerine göre basınç dayanımı ortalama etki grafiği Şekil 22'de verilmiştir.



Şekil 21. Parametre seviyelerine göre basınç dayanımında S/N oranları



Şekil 22. Parametre seviyelerine göre basınç dayanımı ortalama etki grafiği

Şekil 21 incelendiğinde; %5 mermer tozu, %10 arduvaz tozu, %0.50 cam elyafın olduğu durumda en yüksek basınç dayanımına ulaşıldığı görülmüştür. Bu sebeple mermer tozu 20.5 gr, arduvaz tozu 41 gr, cam elyaf 2.50 gr seviyeleri (A1B2C2) Taguchi optimizasyon metoduna göre en optimum faktör seviyelerini oluşturmuştur. Mermer tozunun %5'den fazla kullanılması durumunda basınç dayanımının düştüğü, arduvaz tozunun ise %10'a kadar çimentoyla yer değiştirilmesinin basınç dayanımını artırdığı % 10'dan sonra basınç dayanımını düşürdüğü görülmüştür. Cam elyaf katkısının da %0.50 oranına kadar basınç dayanımını artırdığı görülmüştür.

Tablo 23'de S/N oranının faktörlere göre değişimi ve Tablo 24'de ise ortalamanın faktörlere göre değişimini veren değerlerin sunulduğu tablolar verilmiştir.

Tablo 23. S/N oranları için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam elyaf
1	30.45	30.15	29.60
2	29.96	30.17	30.05
3	29.72	29.73	29.70
4	28.97	29.05	29.76
Delta	1.48	1.12	0.45
Rank	1	2	3

Tablo 24. Ortalamalar için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam elyaf
1	33.42	32.24	30.45
2	31.51	32.35	31.92
3	30.63	30.70	30.58
4	28.17	28.45	30.78
Delta	5.25	3.90	1.47
Rank	1	2	3

Her faktör için hesaplanan S/N oranının en yüksek olduğu değer en iyi deney sonucunu göstermektedir. Tablo 23 incelendiğinde; basınç dayanımına en çok etkisi olan faktörün mermer tozu olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının mermer tozu (1), arduvaz tozu (2) ve en düşük deltaya sahip cam elyaf (3) olduğu görülmektedir.

Tablo 24'de ortalamalar grafiğinde de basınç dayanımına en çok etkisi olan faktörün mermer tozu olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının aynı şekilde mermer tozu (1), arduvaz tozu (2) ve en düşük deltaya sahip cam elyaf (3) olduğu görülmektedir. Tablo 23 ve Tablo 24'de verilen delta ve rank değerleri incelendiğinde sonuçların birbirine paralel olduğu görülmektedir.

Deney parametrelerinin basınç dayanımı sonuçları üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla Varyans analizi yapılmıştır. Tablo 25'de varyans analiz sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 25. Basınç dayanımı varyans analiz sonuçları

Parametre	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Ortalama Kare (MS)	F değeri	P değeri	Faktör Etkisi (%)
Mermer tozu	3	57.088	19.029	14.62	0.004	51.83
Arduvaz tozu	3	39.819	13.273	10.20	0.009	36.15
Cam elyaf	3	5.423	1.808	1.39	0.334	4.92
Hata (Error)	6	7.809	1.302			7.09
Toplam (Total)	15	110.140				100.00
R-Sq= % 92.91	R-Sq(adj)= % 82.27					

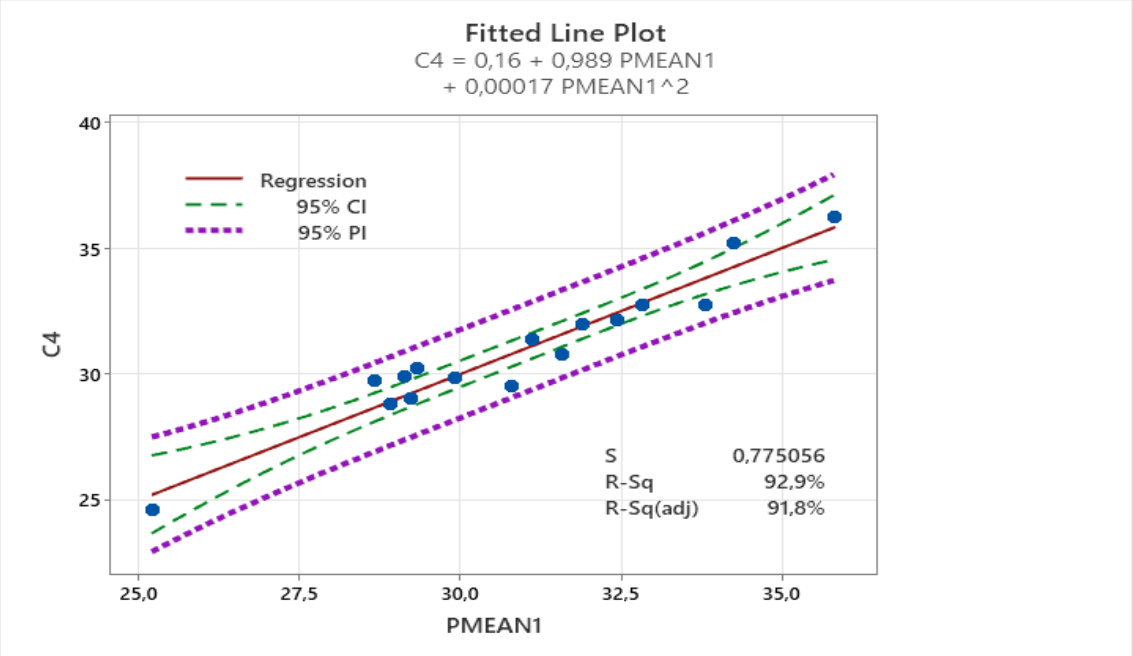
Varyans analiz sonuçları incelendiğinde; basınç dayanımı sonuçlarına en yüksek etkiyi %51.83 oranıyla mermer tozunun verdiği görülmektedir. Diğer faktörler %36.15 oranıyla arduvaz tozu ve %4.92 oranıyla cam elyaftır.

Tablo 26'da basınç deneyindeki parametrelerin optimum seviyeleri Taguchi analizi ve doğrulama deney sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 26. Basınç dayanımı analizi ve doğrulama deney sonuçları

Deney Parametreleri	Optimum parametre seviyeleri	Taguchi analiz sonucu	Doğrulama deney sonucu
Mermer tozu	%5	35.83	36.24
Arduvaz tozu	%10		
Cam elyaf	%0.50		

Tablo 26 incelendiğinde; mermer tozunun %5, arduvaz tozunun %10, cam elyafın %0.50 olduğu durumlarda optimum basınç dayanımı elde edilmiştir. Ayrıca Taguchi analiz sonucu ve doğrulama deney sonucu hesaplanmış ve bu sonuçların birbirine çok yakın değerler olduğu ve arada %1.14'lük bir fark olduğu görülmüştür. Şekil 22'de tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği verilmiştir.



Şekil 22. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği

Şekil 22 incelendiğinde; tahmini değerler ile gerçek değerler grafiğinde noktaların çizgi üzerinde ve yakınında olduğu görülmüştür. Bu da sonuçların güven aralığında bulunduğunu göstermektedir. Grafikte bulunan mor çizgiler bireysel gözlemlerin dağılımını ifade etmektedir. Bu da modelin bireysel veri noktalarını ne kadar iyi tahmin edebileceğini göstermektedir. Tahmin aralığı genel olarak güven aralığından daha geniştir çünkü bireysel verilerin değişkenliği daha fazla olmaktadır. Grafikte yer alan yeşil çizgiler arasındaki alan, tahmin edilen regresyon çizgisi etrafındaki olası ortalama sapmayı ifade eder. Bu da modelin tahminlerinin ne kadar kesin olduğunu göstermektedir.

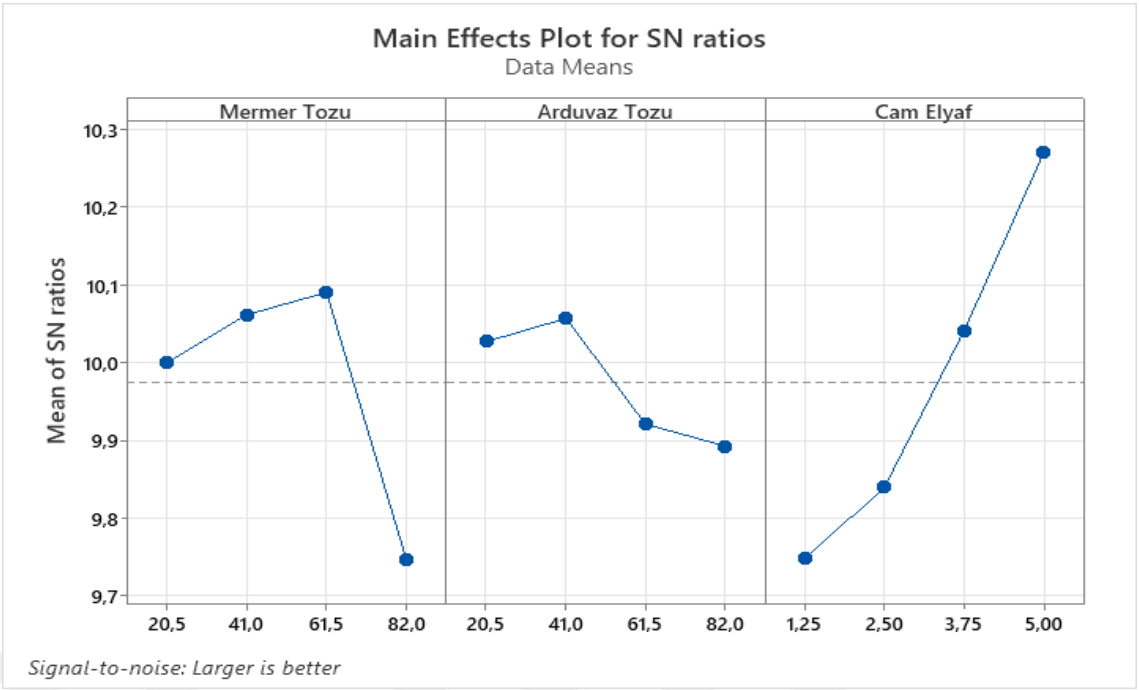
3.2.2. 7 Günlük Yarmada Çekme Dayanım Deney Sonuçları

Yapılan deney sonucunda bulunan 7 günlük yarmada çekme dayanımı değerlerinin Taguchi metoduyla analizleri yapılmıştır. Yarmada çekme dayanımının yüksek olması daha iyi olacağı için S/N oranları hesaplanırken En büyük-En iyi durumu dikkate alınmıştır. Tablo 27'de yarmada çekme dayanımı deney sonuçlarına göre elde edilen S/N (sinyal gürültü oranı) oranları verilmiştir.

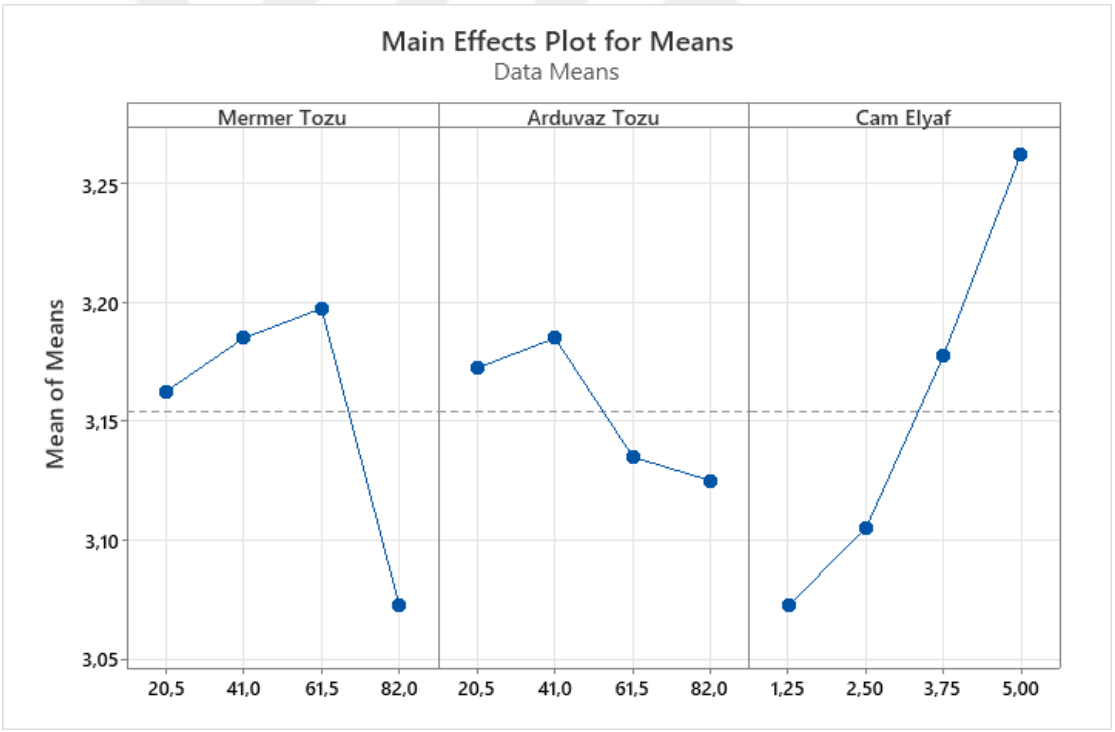
Tablo 27. Yarmada çekme dayanımı S/N oranları

Deney No	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Lif	Yarmada Çekme Dayanımı	S/N oranı
D1	20.5	20.5	1.25	3.10	9.8272
D2	20.5	41.0	2.50	3.14	9.9386
D3	20.5	61.5	3.75	3.19	10.0758
D4	20.5	82.0	5.00	3.22	10.1571
D5	41.0	20.5	2.50	3.16	9.9937
D6	41.0	41.0	1.25	3.13	9.9109
D7	41.0	61.5	5.00	3.25	10.2377
D8	41.0	82.0	3.75	3.20	10.1030
D9	61.5	20.5	3.75	3.23	10.1841
D10	61.5	41.0	5.00	3.38	10.5783
D11	61.5	61.5	1.25	3.08	9.7710
D12	61.5	82.0	2.50	3.10	9.8272
D13	82.0	20.5	5.00	3.20	10.1030
D14	82.0	41.0	3.75	3.09	9.7992
D15	82.0	61.5	2.50	3.02	9.6001
D16	82.0	82.0	1.25	2.98	9.4843

Her parametre seviyesine göre S/N oranı ve yarmada çekme dayanımları hesaplanmış ve optimum değerler bu sonuçlara göre belirlenmiştir. Parametre seviyelerine göre S/N oranları Şekil 23'de verilmiştir. Şekil 24'de parametre seviyelerine göre yarmada çekme dayanımı ortalama etki oranları verilmiştir.



Şekil 23. Parametre seviyelerine göre yarmada çekme dayanımı S/N oranları



Şekil 24. Parametre seviyelerine göre yarmada çekme dayanımı ortalama etki grafiği

Şekil 23 incelendiğinde; %15 mermer tozu, %10 arduvaz tozu, %1 cam elyafın olduğu durumda en yüksek yarmada çekme dayanımına ulaşıldığı görülmüştür. Bu sebeple mermer tozu 61.5 gr, arduvaz tozu 41 gr, cam elyaf 5 gr seviyeleri (A3B2C4) Taguchi optimizasyon metoduna göre en optimum faktör seviyelerini oluşturmuştur. Sonuç olarak mermer tozunun %15, arduvaz tozunun %10'a kadar çimentoyla yer

değiştirilmesinin yarmada çekme dayanımını artırdığı görülmüştür. Cam elyaf oranının arttıkça yarmada çekme dayanımının arttırdığı görülmüştür.

Tablo 28'de S/N oranının faktörlere göre değişimi ve Tablo 29'da ise ortalamaların faktörlere göre değişimini veren değerlerin sunulduğu tablolar verilmiştir.

Tablo 28. S/N oranları için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf
1	10.000	10.027	9.748
2	10.061	10.057	9.840
3	10.090	9.921	10.041
4	9.747	9.893	10.269
Delta	0.343	0.164	0.521
Rank	2	3	1

Tablo 29. Ortalamalar için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf
1	3.163	3.173	3.073
2	3.185	3.185	3.105
3	3.197	3.135	3.178
4	3.073	3.125	3.263
Delta	0.125	0.060	0.190
Rank	2	3	1

Her faktör için hesaplanan S/N oranının en yüksek olduğu değer en iyi deney sonucunu göstermektedir. Tablo 28 incelendiğinde; yarmada çekme dayanımına en çok etkisi olan faktörün mermer tozu olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının cam elyaf (1), mermer tozu (2) ve en düşük deltaya sahip arduvaz tozu (3) olduğu görülmektedir.

Tablo 29'da ortalamalar grafiğinde de yarmada çekme dayanımına en çok etkisi olan faktörün mermer tozu olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının aynı şekilde cam elyaf (1), mermer tozu (2) ve en düşük deltaya sahip arduvaz tozu (3) olduğu görülmektedir. Tablo 28 ve Tablo 29'da verilen delta ve rank değerleri incelendiğinde sonuçların birbirine paralel olduğu görülmektedir.

Deney parametrelerinin yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla varyans analizi yapılmıştır. Tablo 30'da varyans analiz sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 30. Yarmada çekme dayanımı varyans analiz sonuçları

Parametre	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Ortalama Kare (MS)	F değeri	P değeri	Faktör Etkisi (%)
Mermer tozu	3	0.038269	0.012756	11.53	0.007	27.26
Arduvaz tozu	3	0.010019	0.003340	3.02	0.116	7.14
Cam elyaf	3	0.085469	0.028490	25.75	0.001	60.88
Hata (Error)	6	0.006637	0.001106			4.73
Topla (Total)	15	0.140394				100.00
R-Sq= % 95.27	R-Sq(adj)= % 88.18					

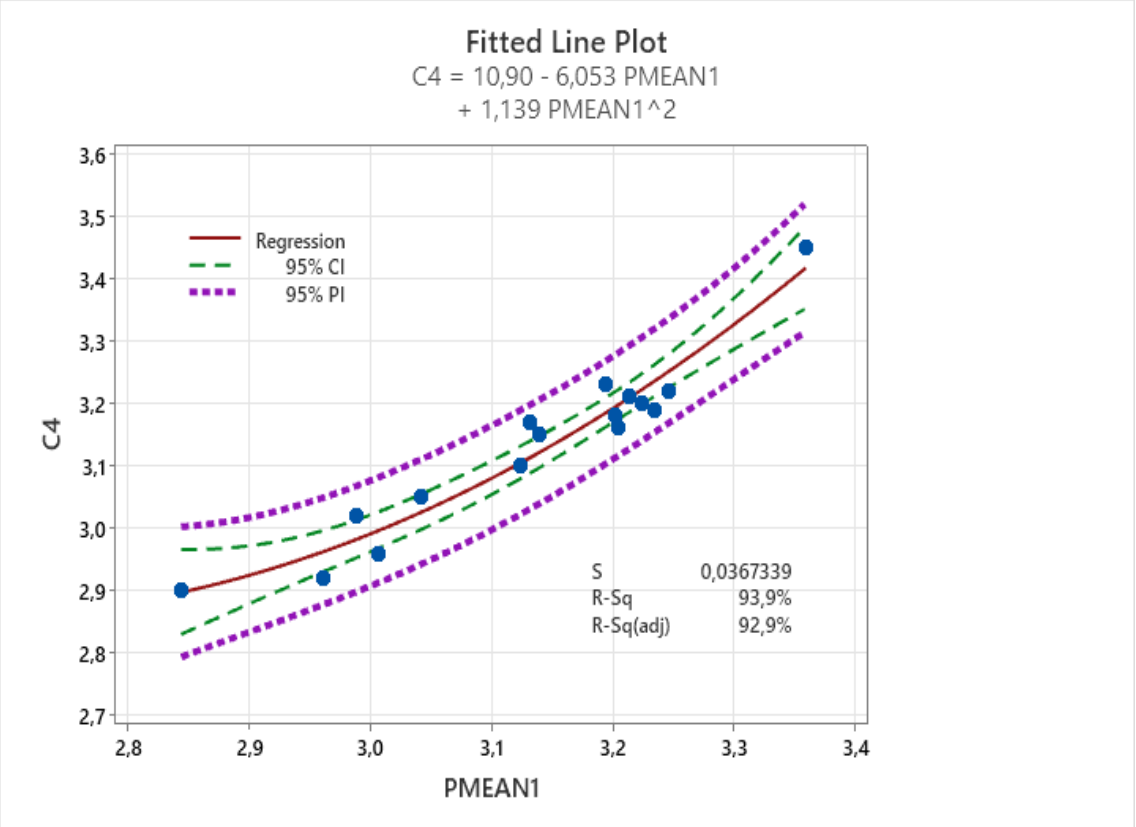
Varyans analiz sonuçları incelendiğinde; yarmada çekme dayanımına en yüksek etkiyi %60.88 oranıyla cam elyafın verdiği görülmektedir. Diğer faktörler %27.26 oranıyla mermer tozu ve %7.14 oranıyla arduvaz tozudur.

Tablo 31'de yarmada çekme dayanım parametrelerin optimum seviyeleri Taguchi analizi ve doğrulama deney sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 31. Yarmada çekme dayanımı tahmini analizi ve doğrulama deney sonuçları

Deney Parametreleri	Optimum parametre seviyeleri	Taguchi analiz sonucu	Doğrulama deney sonucu
Mermer tozu	%15	3.34	3.38
Arduvaz tozu	%10		
Cam elyaf	%1		

Tablo 31 incelendiğinde; mermer tozunun %15, arduvaz tozunun %10, cam elyafın %1 olduğu durumlarda optimum sonuç elde edilmiştir. Ayrıca Taguchi analiz sonucu ve doğrulama deney sonucu hesaplanmış ve bu sonuçların birbirine çok yakın değerler olduğu görülmüştür. Şekil 25'de tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği verilmiştir.



Şekil 25. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği

Şekil 25 incelendiğinde; tahmini değerler ile gerçek değerler grafiğinde noktaların çizgi üzerinde ve yakınında olduğu görülmüştür. Bu da sonuçların güven aralığında bulunduğunu göstermektedir. Grafikte bulunan mor çizgiler bireysel gözlemlerin dağılımını ifade etmektedir. Bu da modelin bireysel veri noktalarını ne kadar iyi tahmin edebileceğini göstermektedir. Tahmin aralığı genel olarak güven aralığından daha geniştir çünkü bireysel verilerin değişkenliği daha fazla olmaktadır. Grafikte yer alan yeşil çizgiler arasındaki alan, tahmin edilen regresyon çizgisi etrafındaki olası ortalama sapmayı ifade eder. Bu da modelin tahminlerinin ne kadar kesin olduğunu göstermektedir.

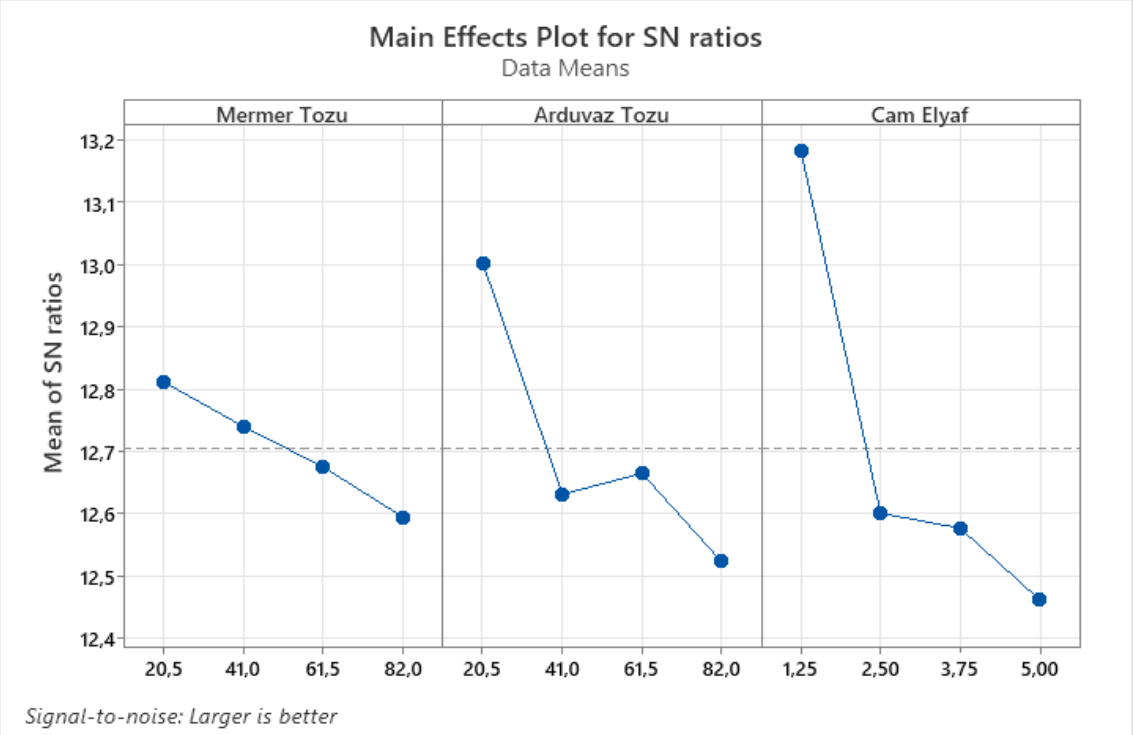
3.2.3. 7 Günlük Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları

Yapılan deney sonucunda bulunan 7 günlük ultrases geçiş hızı deney sonuçlarının Taguchi metoduyla analizleri yapılmıştır. Ultrasonik geçiş hızı arttıkça betonun kalitesi artacağından ultrases geçiş hızlarının yüksek olması daha iyi olacağı için S/N oranları hesaplanırken En büyük- En iyi durumu dikkate alınmıştır. Tablo 32'de ultrases geçiş hızı deney sonuçlarına göre elde edilen S/N (sinyal gürültü oranı) oranları verilmiştir.

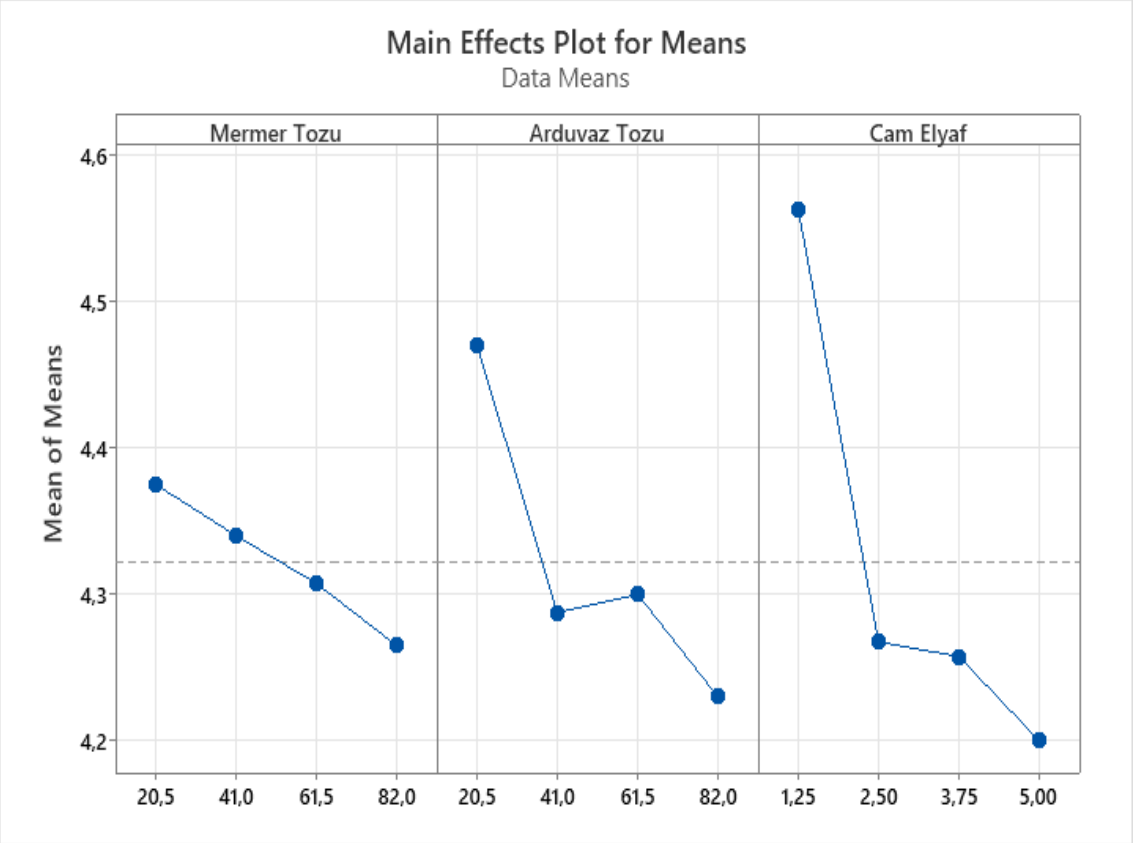
Tablo 32. Ultrases Geçiş Hızı deneyi S/N oranları

Deney No	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf	Ultrases Geçiş Hızı deney sonuçları	S/N oranı
D1	20.5	20.5	1.25	4.68	13.4049
D2	20.5	41.0	2.50	4.32	12.7097
D3	20.5	61.5	3.75	4.29	12.6491
D4	20.5	82.0	5.00	4.21	12.4856
D5	41.0	20.5	2.50	4.38	12.8295
D6	41.0	41.0	1.25	4.65	13.3491
D7	41.0	61.5	5.00	4.18	12.4235
D8	41.0	82.0	3.75	4.15	12.3610
D9	61.5	20.5	3.75	4.49	13.0449
D10	61.5	41.0	5.00	4.08	12.2132
D11	61.5	61.5	1.25	4.51	13.0835
D12	61.5	82.0	2.50	4.15	12.3610
D13	82.0	20.5	5.00	4.33	12.7298
D14	82.0	41.0	3.75	4.10	12.2557
D15	82.0	61.5	2.50	4.22	12.5062
D16	82.0	82.0	1.25	4.41	12.8888

Her parametre seviyesine göre S/N oranı ve ultrases geçiş hızları hesaplanmış ve optimum değerler bu sonuçlara göre belirlenmiştir. Parametre seviyelerine göre S/N oranları Şekil 26'de verilmiştir. Parametre seviyelerine göre ultrases geçiş hızları ortalama etki grafiği ise Şekil 27'de verilmiştir.



Şekil 26. Parametre seviyelerine göre ultrases geçiş hızı S/N oranları



Şekil 27. Parametre seviyelerine göre ultrases geçiş hızı ortalama etki grafiği

Şekil 26 incelendiğinde; %5 mermer tozu, %5 arduvaz tozu, %0.25 cam elyafın olduğu durumda en yüksek ultrases geçiş hızı değerine ulaşıldığı görülmüştür. Bu sebeple mermer tozu 20.5 gr, arduvaz tozu 20.5 gr, cam elyaf 1.25 gr seviyeleri (A1B1C1) Taguchi optimizasyon metoduna göre en optimum faktör seviyelerini oluşturmuştur. Mermer tozu ve arduvaz tozunun %5'ten fazla kullanılması, cam elyafın da %0.25'ten fazla kullanılması durumunda ultrases geçiş hızının düştüğü görülmüştür.

Tablo 33'de S/N oranının faktörlere göre değişimi ve Tablo 34'de ise ortalamanın faktörlere göre değişimini veren değerlerin sunulduğu tablolar verilmiştir.

Tablo 33. S/N oranları için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf
1	12.81	13.00	13.18
2	12.74	12.63	12.60
3	12.68	12.67	12.58
4	12.60	12.52	12.46
Delta	0.22	0.48	0.72
Rank	3	2	1

Tablo 34. Ortalamalar için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf
1	4.375	4.470	4.563
2	4.340	4.287	4.268
3	4.308	4.300	4.258
4	4.265	4.230	4.200
Delta	0.110	0.240	0.362
Rank	3	2	1

Her faktör için hesaplanan S/N oranının en yüksek olduğu değer en iyi deney sonucunu göstermektedir. Tablo 33 incelendiğinde; ultrases geçiş hızına en çok etkisi olan faktörün cam elyaf olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının cam elyaf (1), arduvaz tozu (2) ve en düşük deltaya sahip mermer tozu (3) olduğu görülmektedir.

Tablo 34'de ortalamalar grafiğinde de ultrases geçiş hızına en çok etkisi olan faktörün cam elyaf olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının aynı şekilde cam elyaf (1), arduvaz tozu (2) ve en düşük deltaya sahip mermer tozu (3) olduğu görülmektedir. Tablo 33 ve Tablo 34'de verilen delta ve rank değerleri incelendiğinde sonuçların birbirine paralel olduğu görülmektedir.

Deney parametrelerinin ultrases geçiş hızı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla varyans analizi yapılmıştır. Tablo 35'de varyans analiz sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 35. Ultrases geçiş hızı deneyi varyans analiz sonuçları

Parametre	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Ortalama Kare (MS)	F değeri	P değeri	Faktör Etkisi (%)
Mermer tozu	3	0.02637	0.008790	1.11	0.417	5.05
Arduvaz tozu	3	0.12817	0.042723	5.38	0.039	24.57
Cam elyaf	3	0.31942	0.106473	13.40	0.005	61.23
Hata (Error)	6	0.04769	0.007948			9.14
Toplam (Total)	15	0.52164				100.00
R-Sq= % 90.86	R-Sq(adj)= % 77.15					

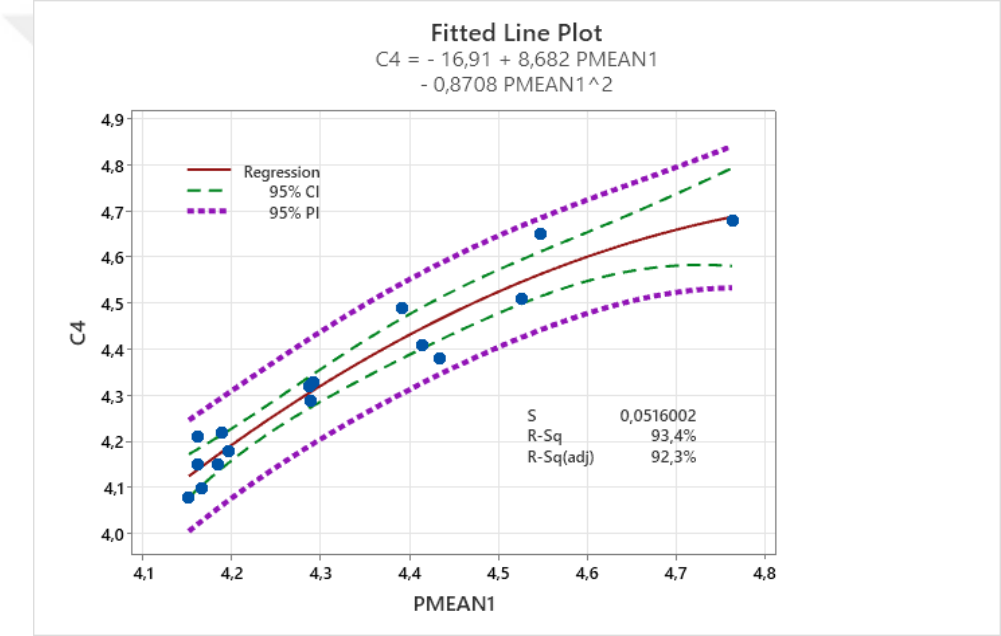
Varyans analiz sonuçları incelendiğinde; ultrases geçiş hızına en yüksek etkiyi %61.23 oranıyla cam elyafın verdiği görülmektedir. Diğer faktörler %24.57 oranıyla arduvaz tozu ve %5.05 oranıyla mermer tozudur.

Tablo 36'da ultrases geçiş hızı parametrelerin optimum seviyeleri Taguchi analizi ve doğrulama deney sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 36. Ultrases geçiş hızı tahmini analizi ve doğrulama deney sonuçları

Deney Parametreleri	Optimum parametre seviyeleri	Taguchi analiz sonucu	Doğrulama deney sonucu
Mermer tozu	%5	4.76	4.68
Arduvaz tozu	%5		
Cam elyaf	%0.25		

Tablo 36 incelendiğinde; mermer tozunun %5, arduvaz tozunun %5, cam elyafın %0.25 olduğu durumlarda optimum sonuç elde edilmiştir. Ayrıca Taguchi analiz sonucu ve doğrulama deney sonucu hesaplanmış ve bu sonuçların birbirine çok yakın değerler olduğu görülmüştür. Şekil 28'de tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği verilmiştir.



Şekil 28. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği

Şekil 28 incelendiğinde; tahmini değerler ile gerçek değerler grafiğinde noktaların çizgi üzerinde ve yakınında olduğu görülmüştür. Bu da sonuçların güven aralığında bulunduğunu göstermektedir. Grafikte bulunan mor çizgiler bireysel gözlemlerin dağılımını ifade etmektedir. Bu da modelin bireysel veri noktalarını ne kadar iyi tahmin edebileceğini göstermektedir. Tahmin aralığı genel olarak güven aralığından daha geniştir çünkü bireysel verilerin değişkenliği daha fazla olmaktadır. Grafikte yer alan yeşil çizgiler arasındaki alan, tahmin edilen regresyon çizgisi etrafındaki olası ortalama sapmayı ifade eder. Bu da modelin tahminlerinin ne kadar kesin olduğunu göstermektedir.

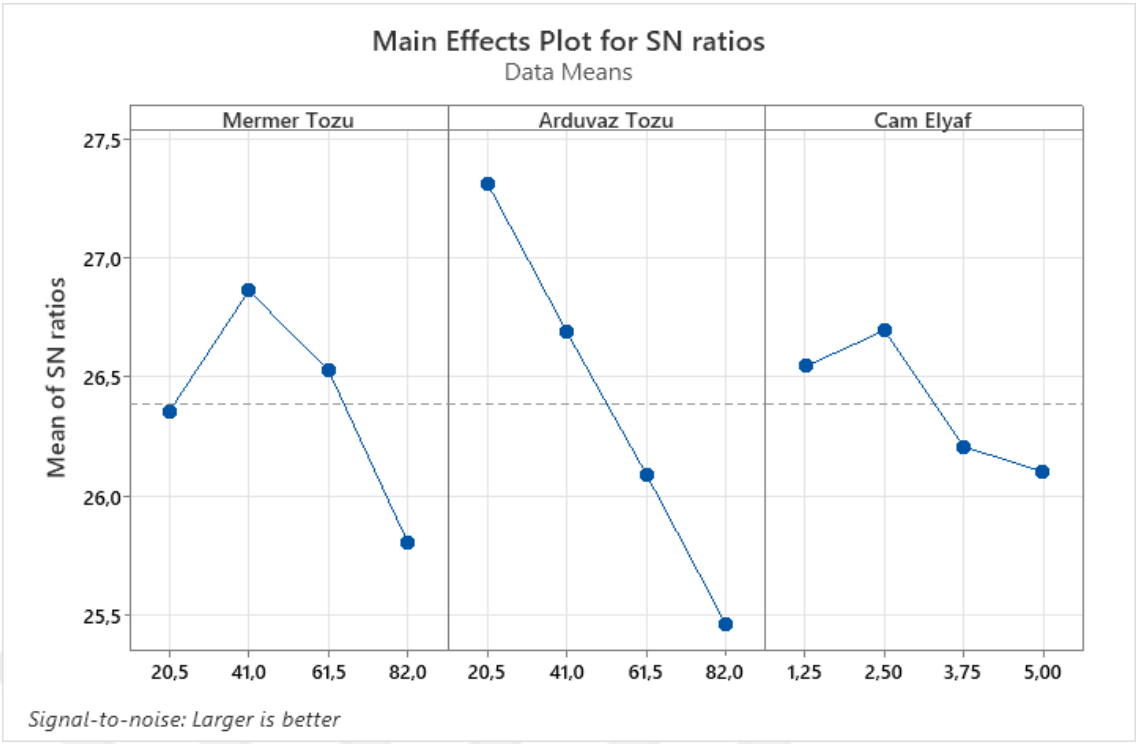
3.2.4. 7 Günlük Test Çekici (Schmidt) Deneyi Sonuçları

Yapılan deney sonucunda bulunan 7 günlük test çekici deney sonuçlarının Taguchi metoduyla analizleri yapılmıştır. Test çekici sonuçlarının yüksek olması daha iyi olacağı için S/N oranları hesaplanırken En büyük- En iyi durumu dikkate alınmıştır. Tablo 37'de test çekici deney sonuçlarına göre elde edilen S/N (sinyal gürültü oranı) oranları verilmiştir.

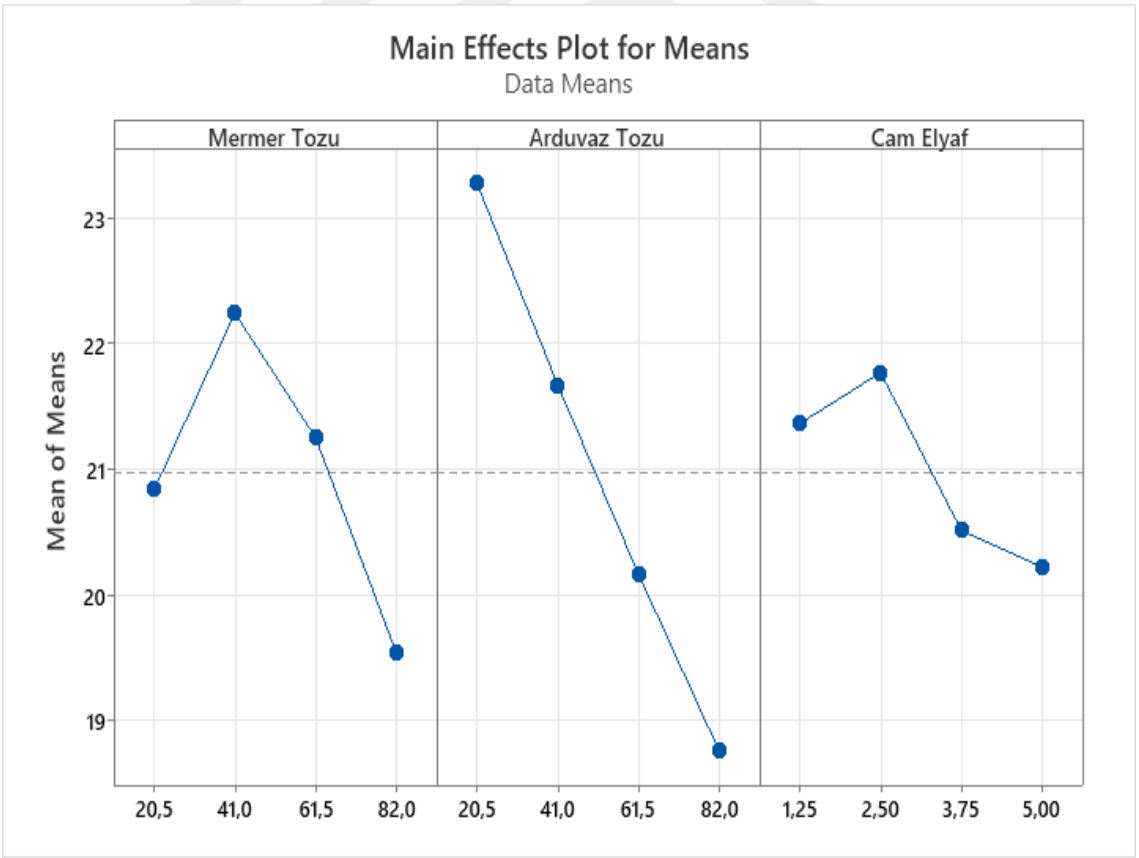
Tablo 37. Test çekici deneyi S/N oranları

Deney No	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf	Test Çekici deney sonuçları	S/N oranı
D1	20.5	20.5	1.25	22.36	26.9894
D2	20.5	41.0	2.50	21.80	26.7691
D3	20.5	61.5	3.75	20.70	26.3194
D4	20.5	82.0	5.00	18.50	25.3434
D5	41.0	20.5	2.50	26.12	28.3395
D6	41.0	41.0	1.25	24.30	27.7121
D7	41.0	61.5	5.00	19.75	25.9113
D8	41.0	82.0	3.75	18.80	25.4832
D9	61.5	20.5	3.75	23.42	27.3917
D10	61.5	41.0	5.00	21.45	26.6285
D11	61.5	61.5	1.25	20.60	26.2773
D12	61.5	82.0	2.50	19.54	25.8185
D13	82.0	20.5	5.00	21.20	26.5267
D14	82.0	41.0	3.75	19.14	25.6388
D15	82.0	61.5	2.50	19.62	25.8540
D16	82.0	82.0	1.25	18.20	25.2014

Her parametre seviyesine göre S/N oranı ve test çekici değerleri hesaplanmış ve optimum değerler bu sonuçlara göre belirlenmiştir. Parametre seviyelerine göre S/N oranları Şekil 29'da verilmiştir. Parametre seviyelerine göre test çekici değerleri ortalama etki grafiği ise Şekil 30'da verilmiştir.



Şekil 29. Parametre seviyelerine göre test çekici deneyi S/N oranları



Şekil 30. Parametre seviyelerine göre test çekici deneyi ortalama etki grafiği

Şekil 29 incelendiğinde; %10 mermer tozu, %5 arduvaz tozu, %0.50 cam elyafın olduğu durumda en yüksek değere ulaşıldığı görülmüştür. Bu sebeple mermer tozu 41 gr, arduvaz tozu 20.5 gr, cam elyaf 2.50 gr seviyeleri (A2B1C2) Taguchi optimizasyon metoduna göre en optimum faktör seviyelerini oluşturmuştur. Mermer tozunun ve cam elyafın %10'a kadar dayanımı artırdığı, arduvaz tozunun ise %5'ten sonra dayanımı düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Tablo 38'de S/N oranının faktörlere göre değişimi ve Tablo 39'da ise ortalamanın faktörlere göre değişimini veren değerlerin sunulduğu tablolar verilmiştir.

Tablo 38. S/N oranları için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf
1	26.36	27.31	26.55
2	26.86	26.69	26.70
3	26.53	26.09	26.21
4	25.81	25.46	26.10
Delta	1.06	1.85	0.59
Rank	2	1	3

Tablo 39. Ortalamalar için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf
1	20.84	23.28	21.36
2	22.24	21.67	21.77
3	21.25	20.17	20.52
4	19.54	18.76	20.23
Delta	2.70	4.52	1.55
Rank	2	1	3

Her faktör için hesaplanan S/N oranının en yüksek olduğu değer en iyi deney sonucunu göstermektedir. Tablo 38 incelendiğinde; test çekici sonucuna en çok etkisi olan faktörün arduvaz tozu olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının arduvaz tozu (1), mermer tozu (2) ve en düşük deltaya sahip cam elyaf (3) olduğu görülmektedir.

Tablo 39'da ortalamalar grafiğinde de test çekici sonucuna en çok etkisi olan faktörün arduvaz tozu olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının arduvaz tozu (1), mermer tozu (2) ve en düşük deltaya sahip cam elyaf (3) olduğu görülmektedir. Tablo 38 ve Tablo 39'da verilen delta ve rank değerleri incelendiğinde sonuçların birbirine paralel olduğu görülmektedir.

Deney parametrelerinin test çekici sonucu üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla varyans analizi yapılmıştır. Tablo 40'da varyans analiz sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 40. Test çekici deneyi varyans analiz sonuçları

Parametre	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Ortalama Kare (MS)	F değeri	P değeri	Faktör Etkisi (%)
Mermer tozu	3	15.043	5.014	4.12	0.066	20.35
Arduvaz tozu	3	45.339	15.113	12.42	0.006	61.34
Cam elyaf	3	6.232	2.077	1.71	0.264	8.43
Hata (Error)	6	7.301	1.217			9.88
Toplam (Total)	15	73.915				100.00
R-Sq= % 90.12	R-Sq(adj)= % 75.31					

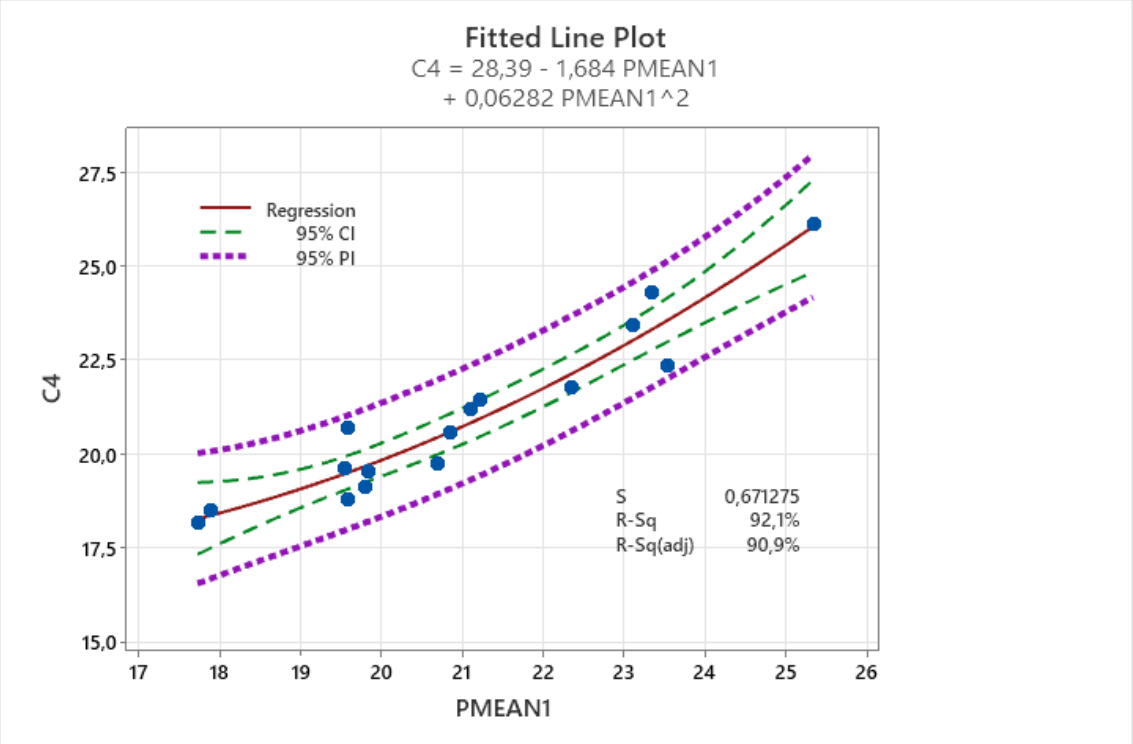
Varyans analiz sonuçları incelendiğinde; test çekici sonucuna en yüksek etkiyi % 61.34 oranıyla arduvaz tozunun verdiği görülmektedir. Diğer faktörler %20.35 oranıyla mermer tozu ve % 8.43 oranıyla cam elyaftır.

Tablo 41'de test çekici parametrelerin optimum seviyeleri Taguchi analizi ve doğrulama deney sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 41. Test çekici tahmini analizi ve doğrulama deney sonuçları

Deney Parametreleri	Optimum parametre seviyeleri	Taguchi analiz sonucu	Doğrulama deney sonucu
Mermer tozu	%10	25.35	26.12
Arduvaz tozu	%5		
Cam elyaf	%0.50		

Tablo 41 incelendiğinde; mermer tozunun %10, arduvaz tozunun %5, cam elyafın %0.50 olduğu durumlarda optimum sonuç elde edilmiştir. Ayrıca Taguchi analiz sonucu ve doğrulama deney sonucu hesaplanmış ve bu sonuçların birbirine çok yakın değerler olduğu ve arada %3.04'lük bir fark olduğu görülmüştür. Şekil 31'de tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği verilmiştir.



Şekil 31. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği

Şekil 31 incelendiğinde; tahmini değerler ile gerçek değerler grafiğinde noktaların çizgi üzerinde ve yakınında olduğu görülmüştür. Bu da sonuçların güven aralığında bulunduğunu göstermektedir. Grafikte bulunan mor çizgiler bireysel gözlemlerin dağılımını ifade etmektedir. Bu da modelin bireysel veri noktalarını ne kadar iyi tahmin edebileceğini göstermektedir. Tahmin aralığı genel olarak güven aralığından daha geniştir çünkü bireysel verilerin değişkenliği daha fazla olmaktadır. Grafikte yer alan yeşil çizgiler arasındaki alan, tahmin edilen regresyon çizgisi etrafındaki olası ortalama sapmayı ifade eder. Bu da modelin tahminlerinin ne kadar kesin olduğunu göstermektedir.

3.3. 28 Günlük Sertleşmiş Beton Deney Sonuçları

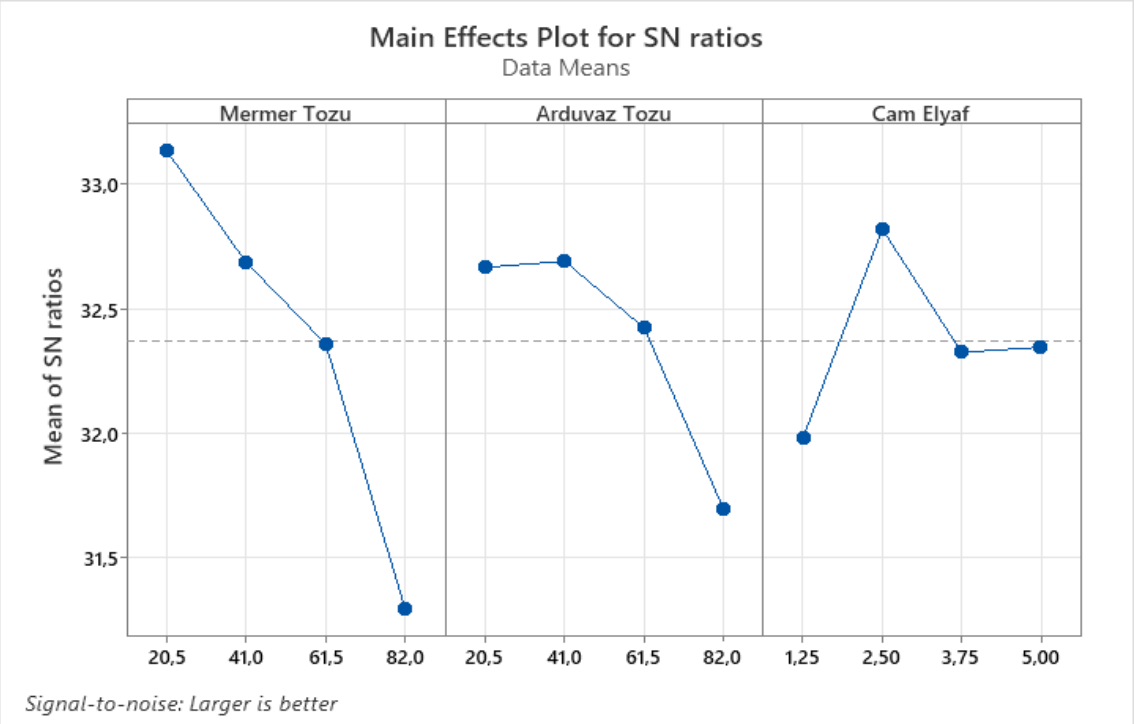
3.3.1. 28 Günlük Basınç Dayanım Deneyi Sonuçları

Yapılan deney sonucunda bulunan 28 günlük basınç dayanımı değerlerinin Taguchi metoduyla analizleri yapılmıştır. Beton basınç dayanımının yüksek olması daha iyi olacağı için S/N oranları hesaplanırken En büyük- En iyi durumu dikkate alınmıştır. Tablo 42'de basınç dayanımı deney sonuçlarına göre elde edilen S/N (sinyal gürültü oranı) oranları verilmiştir.

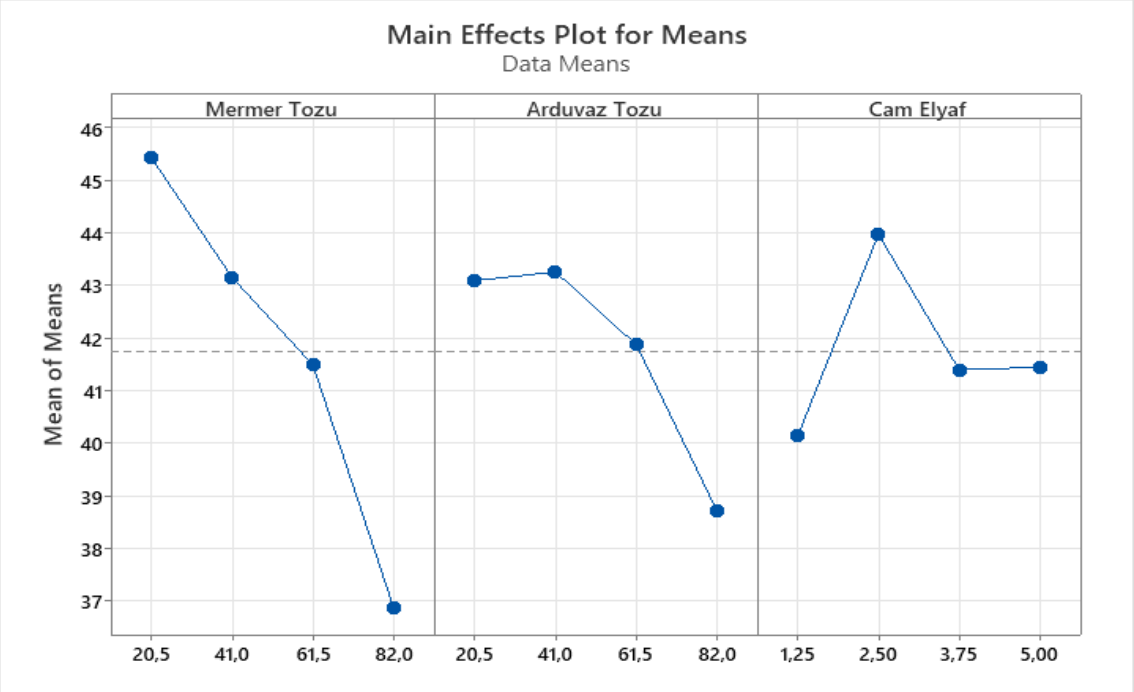
Tablo 42. Basınç dayanımı S/N oranları

Deney No	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf	Basınç dayanımı	S/N oranı
D1	20.5	20.5	1.25	45.07	33.0778
D2	20.5	41.0	2.50	49.26	33.8499
D3	20.5	61.5	3.75	45.38	33.1373
D4	20.5	82.0	5.00	42.02	32.4691
D5	41.0	20.5	2.50	47.08	33.4567
D6	41.0	41.0	1.25	42.78	32.6248
D7	41.0	61.5	5.00	42.64	32.5963
D8	41.0	82.0	3.75	40.12	32.0672
D9	61.5	20.5	3.75	40.95	32.2451
D10	61.5	41.0	5.00	41.86	32.4360
D11	61.5	61.5	1.25	41.56	32.3735
D12	61.5	82.0	2.50	41.60	32.3819
D13	82.0	20.5	5.00	39.28	31.8834
D14	82.0	41.0	3.75	39.14	31.8524
D15	82.0	61.5	2.50	37.96	31.5865
D16	82.0	82.0	1.25	31.14	29.8664

Her parametre seviyesine göre S/N oranı ve basınç dayanımları hesaplanmış ve optimum değerler bu sonuçlara göre belirlenmiştir. Parametre seviyelerine göre S/N oranları Şekil 32'de verilmiştir. Parametre seviyelerine göre basınç dayanımı ortalama etki grafiği Şekil 33'de verilmiştir.



Şekil 32. Parametre seviyelerine göre basınç dayanımında S/N oranları



Şekil 33. Parametre seviyelerine göre basınç dayanımı ortalama etki grafiği

Şekil 32 incelendiğinde; %5 mermer tozu, %10 arduvaz tozu, %0.50 cam elyafın olduğu durumda en yüksek basınç dayanımına ulaşıldığı görülmüştür. Bu sebeple mermer tozu 20.5 gr, arduvaz tozu 41 gr, cam elyaf 2.50 gr seviyeleri (A1B2C2) Taguchi optimizasyon metoduna göre en optimum faktör seviyelerini oluşturmuştur. Mermer tozunun %5'den fazla kullanılması durumunda basınç dayanımının düştüğü, arduvaz tozunun ise %10'a kadar çimentoyla yer değiştirilmesinin basınç dayanımını artırdığı % 10'dan sonra basınç dayanımını düşürdüğü görülmüştür. Cam elyaf katkısının da %0.50 oranına kadar basınç dayanımını artırdığı görülmüştür.

Tablo 43'de S/N oranının faktörlere göre değişimi ve Tablo 44'de ise ortalamanın faktörlere göre değişimini veren değerlerin sunulduğu tablolar verilmiştir.

Tablo 43. S/N oranları için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf
1	33.13	32.67	31.99
2	32.69	32.69	32.82
3	32.36	32.42	32.33
4	31.30	31.70	32.35
Delta	1.84	0.99	0.83
Rank	1	2	3

Tablo 44. Ortalamalar için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf
1	45.43	43.10	40.14
2	43.16	43.26	43.98
3	41.49	41.89	41.40
4	36.88	38.72	41.45
Delta	8.55	4.54	3.84
Rank	1	2	3

Her faktör için hesaplanan S/N oranının en yüksek olduğu değer en iyi deney sonucunu göstermektedir. Tablo 43 incelendiğinde; basınç dayanımına en çok etkisi olan faktörün mermer tozu olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının mermer tozu (1), arduvaz tozu (2) ve en düşük deltaya sahip cam elyaf (3) olduğu görülmektedir.

Tablo 44'de ortalamalar grafiğinde de basınç dayanımına en çok etkisi olan faktörün mermer tozu olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının aynı şekilde mermer tozu (1), arduvaz tozu (2) ve en düşük deltaya sahip cam elyaf (3) olduğu görülmektedir. Tablo 43 ve Tablo 44'de verilen delta ve rank değerleri incelendiğinde sonuçların birbirine paralel olduğu görülmektedir.

Deney parametrelerinin basınç dayanımı sonuçları üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla Varyans analizi yapılmıştır. Tablo 45'de varyans analiz sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 45. Basınç dayanımı varyans analiz sonuçları

Parametre	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Ortalama Kare (MS)	F değeri	P değeri	Faktör Etkisi (%)
Mermer tozu	3	157.27	52.424	24.83	0.001	61.88
Arduvaz tozu	3	53.15	17.717	8.39	0.014	20.91
Cam elyaf	3	31.06	10.353	4.90	0.047	12.22
Hata (Error)	6	12.67	2.111			4.98
Toplam (Total)	15	254.15				100.00
R-Sq= % 95.02	R-Sq(adj)= % 87.54					

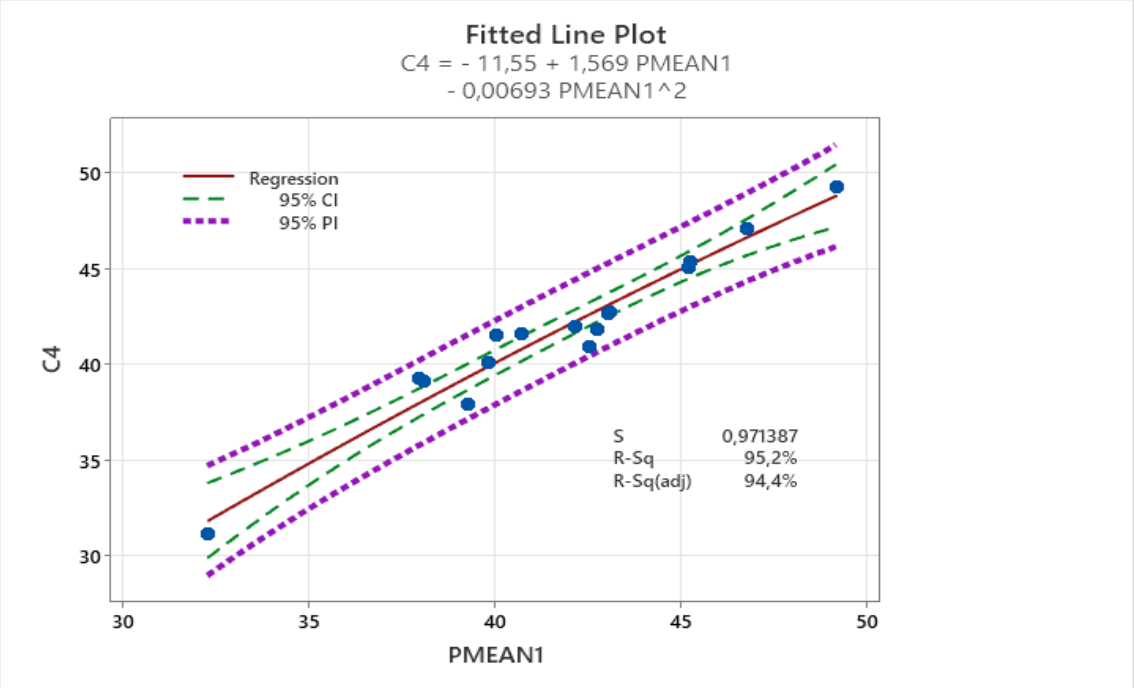
Varyans analiz sonuçları incelendiğinde; basınç dayanımı sonuçlarına en yüksek etkiyi %61.88 oranıyla mermer tozunun verdiği görülmektedir. Diğer faktörler %20.91 oranıyla arduvaz tozu ve %12.22 oranıyla cam elyaftır.

Tablo 46’da basınç deneyindeki parametrelerin optimum seviyeleri Taguchi analizi ve doğrulama deney sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 46. Basınç dayanımı analizi ve doğrulama deney sonuçları

Deney Parametreleri	Optimum parametre seviyeleri	Taguchi analiz sonucu	Doğrulama deney sonucu
Mermer tozu	%5	49.19	49.26
Arduvaz tozu	%10		
Cam elyaf	%0.50		

Tablo 46 incelendiğinde; mermer tozunun %5, arduvaz tozunun %10, cam elyafın %0.50 olduğu durumlarda optimum basınç dayanımı elde edilmiştir. Ayrıca Taguchi analiz sonucu ve doğrulama deney sonucu hesaplanmış ve bu sonuçların birbirine çok yakın değerler olduğu görülmüştür. Şekil 34’de tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği verilmiştir.



Şekil 34. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği

Şekil 34 incelendiğinde; tahmini değerler ile gerçek değerler grafiğinde noktaların çizgi üzerinde ve yakınında olduğu görülmüştür. Bu da sonuçların güven aralığında bulunduğunu göstermektedir. Grafikte bulunan mor çizgiler bireysel gözlemlerin dağılımını ifade etmektedir. Bu da modelin bireysel veri noktalarını ne kadar iyi tahmin

edebileceğini göstermektedir. Tahmin aralığı genel olarak güven aralığından daha geniştir çünkü bireysel verilerin değişkenliği daha fazla olmaktadır. Grafikte yer alan yeşil çizgiler arasındaki alan, tahmin edilen regresyon çizgisi etrafındaki olası ortalama sapmayı ifade eder. Bu da modelin tahminlerinin ne kadar kesin olduğunu göstermektedir.

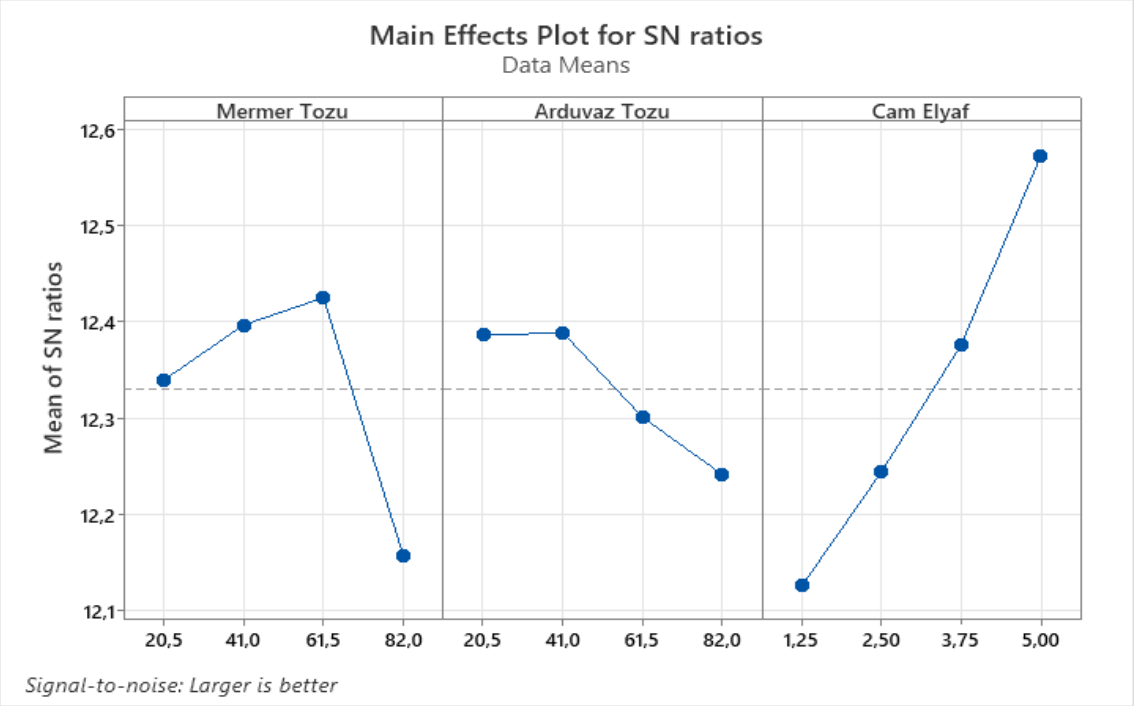
3.3.2. 28 Günlük Yarmada Çekme Dayanım Deneyi Sonuçları

Yapılan deney sonucunda bulunan 28 günlük yarmada çekme dayanımı değerlerinin Taguchi metoduyla analizleri yapılmıştır. Yarmada çekme dayanımının yüksek olması daha iyi olacağı için S/N oranları hesaplanırken En büyük-En iyi durumu dikkate alınmıştır. Tablo 47'de yarmada çekme dayanımı deney sonuçlarına göre elde edilen S/N (sinyal gürültü oranı) oranları verilmiştir.

Tablo 47. Yarmada çekme dayanımı S/N oranları

Deney No	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Lif	Yarmada Çekme dayanımı	S/N oranı
D1	20.5	20.5	1.25	4.08	12.2132
D2	20.5	41.0	2.50	4.12	12.2979
D3	20.5	61.5	3.75	4.17	12.4027
D4	20.5	82.0	5.00	4.19	12.4443
D5	41.0	20.5	2.50	4.15	12.3610
D6	41.0	41.0	1.25	4.10	12.2557
D7	41.0	61.5	5.00	4.24	12.5473
D8	41.0	82.0	3.75	4.18	12.4235
D9	61.5	20.5	3.75	4.21	12.4856
D10	61.5	41.0	5.00	4.37	12.8096
D11	61.5	61.5	1.25	4.06	12.1705
D12	61.5	82.0	2.50	4.09	12.2345
D13	82.0	20.5	5.00	4.21	12.4856
D14	82.0	41.0	3.75	4.07	12.1919
D15	82.0	61.5	2.50	4.02	12.0845
D16	82.0	82.0	1.25	3.92	11.8657

Her parametre seviyesine göre S/N oranı ve yarmada çekme dayanımları hesaplanmış ve optimum değerler bu sonuçlara göre belirlenmiştir. Parametre seviyelerine göre S/N oranları Şekil 35'de verilmiştir. Şekil 36'da parametre seviyelerine göre yarmada çekme dayanımı ortalama etki oranları verilmiştir.



Şekil 35. Parametre seviyelerine göre yarmada çekme dayanımı S/N oranları

Şekil 36. Parametre seviyelerine göre yarmada çekme dayanımı ortalama etki grafiği

Şekil 35 incelendiğinde; %15 mermer tozu, %10 arduvaz tozu, %1 cam elyafın olduğu durumda en yüksek yarmada çekme dayanımına ulaşıldığı görülmüştür. Bu sebeple mermer tozu 61.5 gr, arduvaz tozu 41 gr, cam elyaf 5 gr seviyeleri (A3B2C4) Taguchi optimizasyon metoduna göre en optimum faktör seviyelerini oluşturmuştur.

Sonuç olarak mermer tozunun %15, arduvaz tozunun %10'a kadar çimentoyla yer değiştirilmesinin yarmada çekme dayanımını artırdığı görülmüştür. Cam elyaf oranı arttıkça yarmada çekme dayanımının arttığı görülmüştür.

Tablo 48'de S/N oranının faktörlere göre değişimi ve Tablo 49'da ise ortalamaların faktörlere göre değişimini veren değerlerin sunulduğu tablolar verilmiştir.

Tablo 48. S/N oranları için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf
1	12.34	12.39	12.13
2	12.40	12.39	12.24
3	12.43	12.30	12.38
4	12.16	12.24	12.57
Delta	0.27	0.15	0.45
Rank	2	3	1

Tablo 49. Ortalamalar için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf
1	4.140	4.163	4.040
2	4.168	4.165	4.095
3	4.183	4.122	4.157
4	4.055	4.095	4.253
Delta	0.128	0.070	0.213
Rank	2	3	1

Her faktör için hesaplanan S/N oranının en yüksek olduğu değer en iyi deney sonucunu göstermektedir. Tablo 48 incelendiğinde; yarmada çekme dayanımına en çok etkisi olan faktörün cam elyaf olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının cam elyaf (1), mermer tozu (2) ve en düşük deltaya sahip arduvaz tozu (3) olduğu görülmektedir.

Tablo 49'da ortalamalar grafiğinde de yarmada çekme dayanımına en çok etkisi olan faktörün cam elyafın olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının aynı şekilde cam elyaf (1), mermer tozu (2) ve en düşük deltaya sahip arduvaz tozu (3) olduğu görülmektedir. Tablo 48 ve Tablo 49'da verilen delta ve rank değerleri incelendiğinde sonuçların birbirine paralel olduğu görülmektedir.

Deney parametrelerinin yarmada çekme dayanımı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla varyans analizi yapılmıştır. Tablo 50'de varyans analiz sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 50. Yarmada çekme dayanımı varyans analiz sonuçları

Parametre	Serbestlik Derecesi(DF)	Kareler Toplamı(SS)	Ortalama Kare(MS)	F değeri	P değeri	Faktör Etkisi (%)
Mermer tozu	3	0.038925	0.012975	10.38	0.009	24.36
Arduvaz tozu	3	0.013625	0.004542	3.63	0.084	8.53
Cam elyaf	3	0.099725	0.033242	26.59	0.001	62.42
Hata (Error)	6	0.007500	0.001250			4.69
Toplam (Total)	15	0.159775				100.00
R-Sq= %95.31	R-Sq(adj)= %88.26					

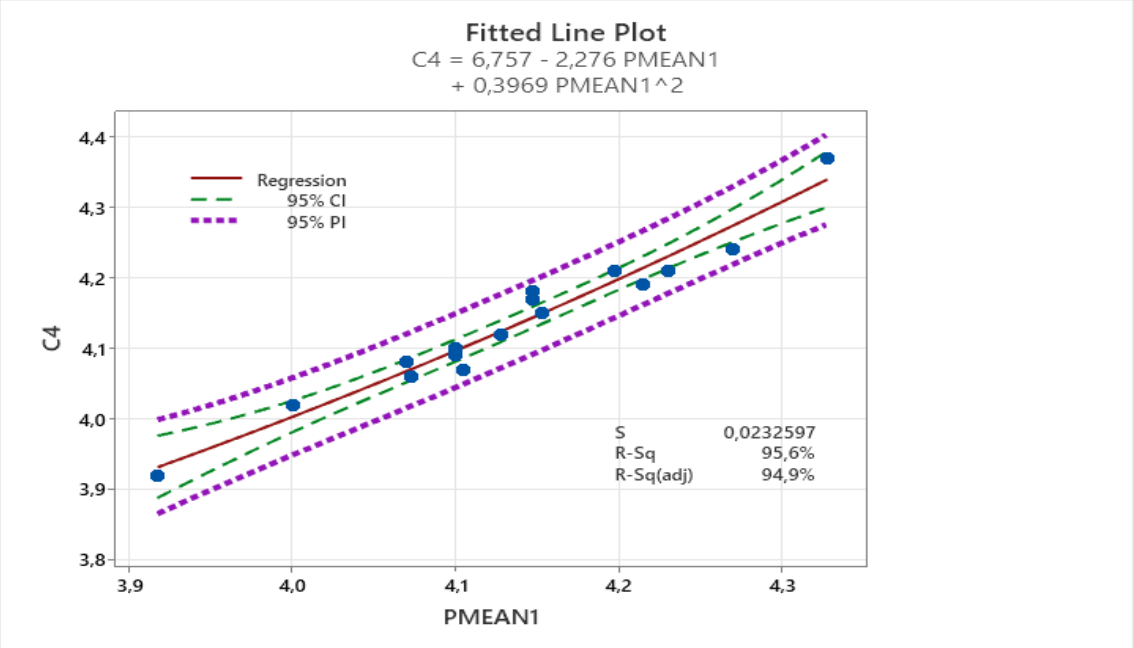
Varyans analiz sonuçları incelendiğinde; yarmada çekme dayanımına en yüksek etkiyi %62.42 oranıyla cam elyafın verdiği görülmektedir. Diğer faktörler %24.36 oranıyla mermer tozu ve %8.53 oranıyla arduvaz tozudur.

Tablo 51'de yarmada çekme dayanım parametrelerin optimum seviyeleri Taguchi analizi ve doğrulama deney sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 51. Yarmada çekme dayanımı tahmini analizi ve doğrulama deney sonuçları

Deney Parametreleri	Optimum parametre seviyeleri	Taguchi analiz sonucu	Doğrulama deney sonucu
Mermer tozu	%15	4.33	4.37
Arduvaz tozu	%10		
Cam elyaf	%1		

Tablo 51 incelendiğinde; mermer tozunun %15, arduvaz tozunun %10, cam elyafın %1 olduğu durumlarda optimum sonuç elde edilmiştir. Ayrıca Taguchi analiz sonucu ve doğrulama deney sonucu hesaplanmış ve bu sonuçların birbirine çok yakın değerler olduğu görülmüştür. Şekil 37'de tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği verilmiştir.



Şekil 37. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği

Şekil 37 incelendiğinde; tahmini değerler ile gerçek değerler grafiğinde noktaların çizgi üzerinde ve yakınında olduğu görülmüştür. Bu da sonuçların güven aralığında bulunduğunu göstermektedir. Grafikte bulunan mor çizgiler bireysel gözlemlerin dağılımını ifade etmektedir. Bu da modelin bireysel veri noktalarını ne kadar iyi tahmin edebileceğini göstermektedir. Tahmin aralığı genel olarak güven aralığından daha geniştir çünkü bireysel verilerin değişkenliği daha fazla olmaktadır. Grafikte yer alan yeşil çizgiler arasındaki alan, tahmin edilen regresyon çizgisi etrafındaki olası ortalama sapmayı ifade eder. Bu da modelin tahminlerinin ne kadar kesin olduğunu göstermektedir.

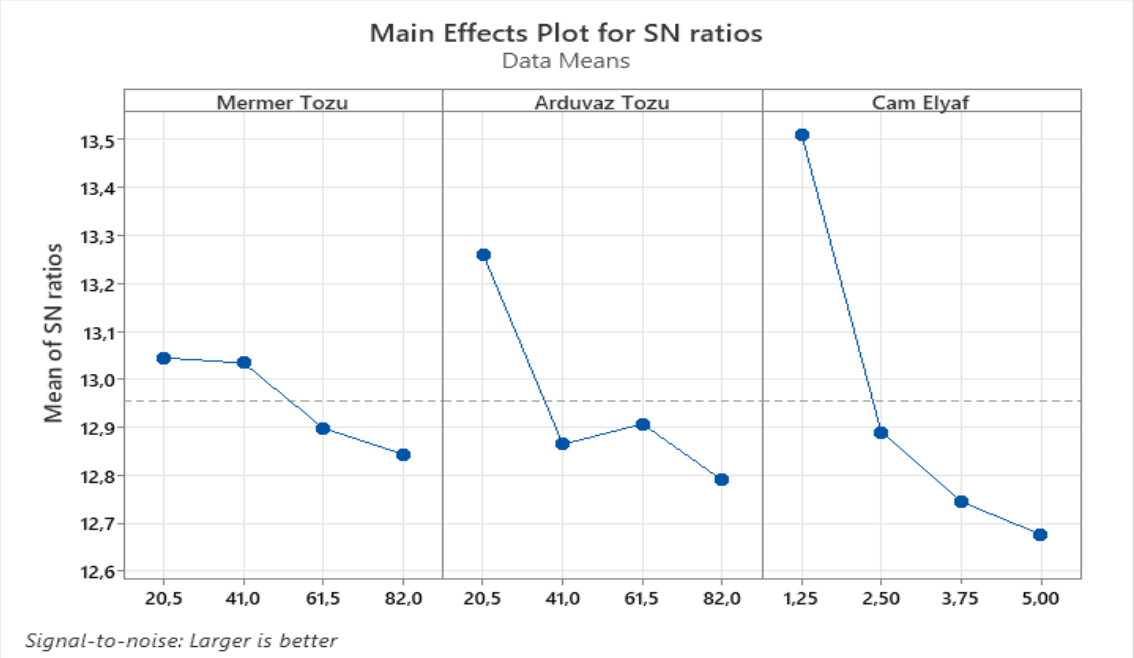
3.3.3. 28 Günlük Ultrases Geçiş Hızı Deneyi Sonuçları

Yapılan deney sonucunda bulunan 28 günlük ultrases geçiş hızı deney sonuçlarının Taguchi metoduyla analizleri yapılmıştır. Ultrasonik geçiş hızı arttıkça betonun kalitesi artacağından ultrases geçiş hızlarının yüksek olması daha iyi olacağı için S/N oranları hesaplanırken En büyük- En iyi durumu dikkate alınmıştır. Tablo 52'de ultrases geçiş hızı deney sonuçlarına göre elde edilen S/N (sinyal gürültü oranı) oranları verilmiştir.

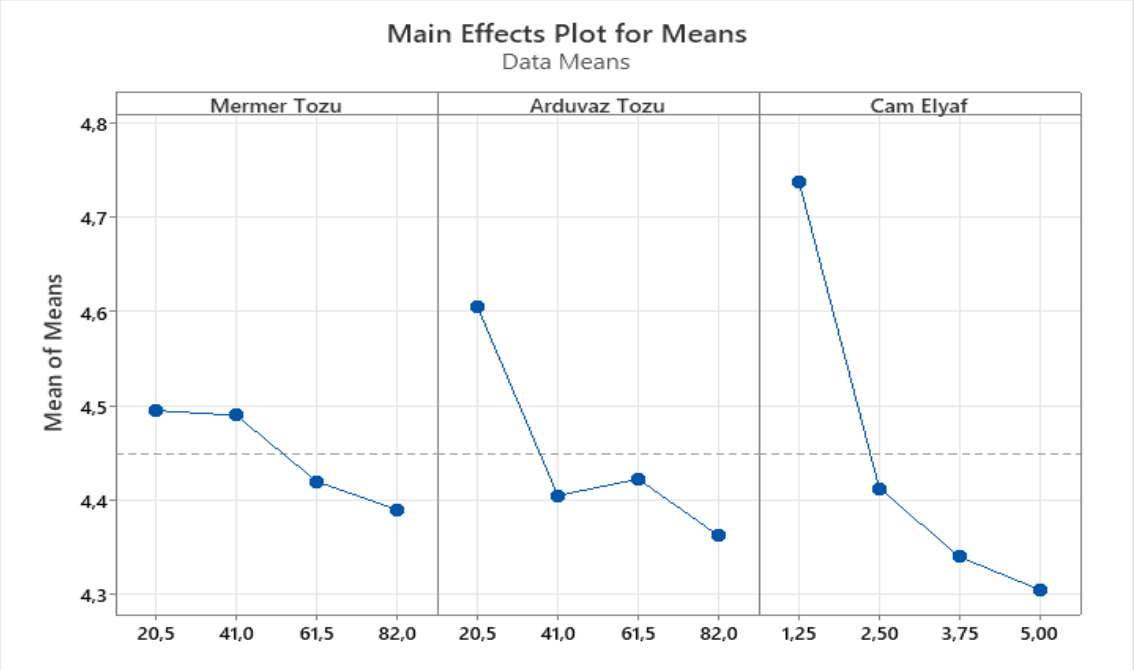
Tablo 52. Ultrases Geçiş Hızı deneyi S/N oranları

Deney No	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf	Ultrases Geçiş Hızı deney sonuçları	S/N oranı
D1	20.5	20.5	1.25	4.85	13.7148
D2	20.5	41.0	2.50	4.45	12.9672
D3	20.5	61.5	3.75	4.36	12.7897
D4	20.5	82.0	5.00	4.32	12.7097
D5	41.0	20.5	2.50	4.60	13.2552
D6	41.0	41.0	1.25	4.80	13.6248
D7	41.0	61.5	5.00	4.29	12.6491
D8	41.0	82.0	3.75	4.27	12.6086
D9	61.5	20.5	3.75	4.54	13.1411
D10	61.5	41.0	5.00	4.18	12.4235
D11	61.5	61.5	1.25	4.70	13.4420
D12	61.5	82.0	2.50	4.26	12.5882
D13	82.0	20.5	5.00	4.43	12.9281
D14	82.0	41.0	3.75	4.19	12.4443
D15	82.0	61.5	2.50	4.34	12.7498
D16	82.0	82.0	1.25	4.60	13.2552

Her parametre seviyesine göre S/N oranı ve ultrases geçiş hızları hesaplanmış ve optimum değerler bu sonuçlara göre belirlenmiştir. Parametre seviyelerine göre S/N oranları Şekil 38'de verilmiştir. Parametre seviyelerine göre ultrases geçiş hızları ortalama etki grafiği ise Şekil 39'da verilmiştir.



Şekil 38. Parametre seviyelerine göre ultrases geçiş hızı S/N oranları



Şekil 39. Parametre seviyelerine göre ultrases geçiş hızı ortalama etki grafiği

Şekil 38 incelendiğinde; %5 mermer tozu, %5 arduvaz tozu, %0.25 cam elyafın olduğu durumda en yüksek ultrases geçiş hızı değerine ulaşıldığı görülmüştür. Bu sebeple mermer tozu 20.5 gr, arduvaz tozu 20.5 gr, cam elyaf 1.25 gr seviyeleri (A1B1C1) Taguchi optimizasyon metoduna göre en optimum faktör seviyelerini oluşturmuştur. Mermer tozu ve arduvaz tozunun %5'ten fazla kullanılması, cam elyafın da %0.25'ten fazla kullanılması durumunda ultrases geçiş hızının düştüğü görülmüştür.

Tablo 53'de S/N oranının faktörlere göre değişimi ve Tablo 54'de ise ortalamanın faktörlere göre değişimini veren değerlerin sunulduğu tablolar verilmiştir.

Tablo 53. S/N oranları için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf
1	13.05	13.26	13.51
2	13.03	12.86	12.89
3	12.90	12.91	12.75
4	12.84	12.79	12.68
Delta	0.20	0.47	0.83
Rank	3	2	1

Tablo 54. Ortalamalar için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf
1	4.495	4.605	4.737
2	4.490	4.405	4.412
3	4.420	4.423	4.340
4	4.390	4.362	4.305
Delta	0.105	0.242	0.432
Rank	3	2	1

Her faktör için hesaplanan S/N oranının en yüksek olduğu değer en iyi deney sonucunu göstermektedir. Tablo 53 incelendiğinde; ultrases geçiş hızına en çok etkisi olan faktörün cam elyaf olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının cam elyaf (1), arduvaz tozu (2) ve en düşük deltaya sahip mermer tozu (3) olduğu görülmektedir.

Tablo 54'de ortalamalar grafiğinde de ultrases geçiş hızına en çok etkisi olan faktörün cam elyaf olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının aynı şekilde cam elyaf (1), arduvaz tozu (2) ve en düşük deltaya sahip mermer tozu (3) olduğu görülmektedir. Tablo 53 ve Tablo 54'de verilen delta ve rank değerleri incelendiğinde sonuçların birbirine paralel olduğu görülmektedir.

Deney parametrelerinin ultrases geçiş hızı üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla varyans analizi yapılmıştır. Tablo 55'de varyans analiz sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 55. Ultrases geçiş hızı deneyi varyans analiz sonuçları

Parametre	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Ortalama Kare (MS)	F değeri	P değeri	Faktör Etkisi (%)
Mermer tozu	3	0.03248	0.010825	2.09	0.204	4.85
Arduvaz tozu	3	0.13782	0.045942	8.85	0.013	20.57
Cam elyaf	3	0.46872	0.156242	30.09	0.001	69.94
Hata (Error)	6	0.03115	0.005192			4.65
Toplam (Total)	15	0.67017				100.00
R-Sq= %95.35	R-Sq(adj)= % 88.38					

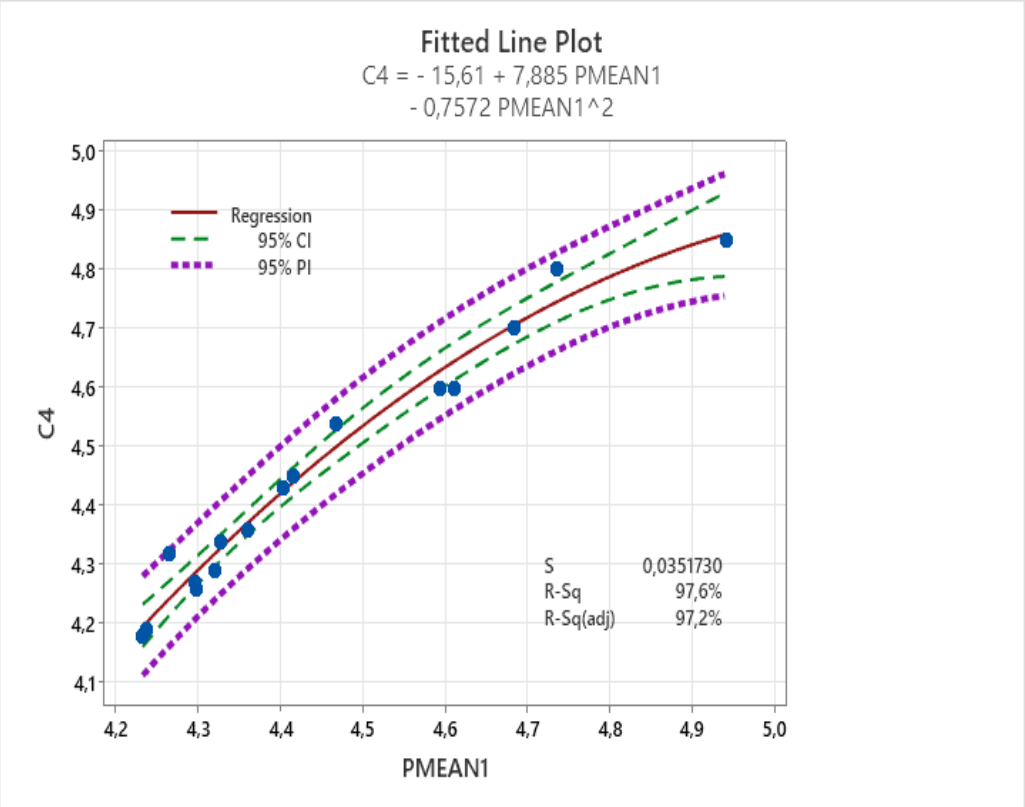
Varyans analiz sonuçları incelendiğinde; ultrases geçiş hızına en yüksek etkiyi %69.94 oranıyla cam elyafın verdiği görülmektedir. Diğer faktörler %20.57 oranıyla arduvaz tozu ve %4.85 oranıyla mermer tozudur.

Tablo 56’da ultrases geçiş hızı parametrelerin optimum seviyeleri Taguchi analizi ve doğrulama deney sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 56. Ultrases geçiş hızı tahmini analizi ve doğrulama deney sonuçları

Deney Parametreleri	Optimum parametre seviyeleri	Taguchi analiz sonucu	Doğrulama deney sonucu
Mermer tozu	%5	4.94	4.85
Arduvaz tozu	%5		
Cam elyaf	%0.25		

Tablo 56 incelendiğinde; mermer tozunun %5, arduvaz tozunun %5, cam elyafın %0.25 olduğu durumlarda optimum sonuç elde edilmiştir. Ayrıca Taguchi analiz sonucu ve doğrulama deney sonucu hesaplanmış ve bu sonuçların birbirine çok yakın değerler olduğu görülmüştür. Şekil 40’da tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği verilmiştir.



Şekil 40. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği

Şekil 40 incelendiğinde; tahmini değerler ile gerçek değerler grafiğinde noktaların çizgi üzerinde ve yakınında olduğu görülmüştür. Bu da sonuçların güven aralığında bulunduğunu göstermektedir. Grafikte bulunan mor çizgiler bireysel gözlemlerin

dağılımını ifade etmektedir. Bu da modelin bireysel veri noktalarını ne kadar iyi tahmin edebileceğini göstermektedir. Tahmin aralığı genel olarak güven aralığından daha geniştir çünkü bireysel verilerin değişkenliği daha fazla olmaktadır. Grafikte yer alan yeşil çizgiler arasındaki alan, tahmin edilen regresyon çizgisi etrafındaki olası ortalama sapmayı ifade eder. Bu da modelin tahminlerinin ne kadar kesin olduğunu göstermektedir.

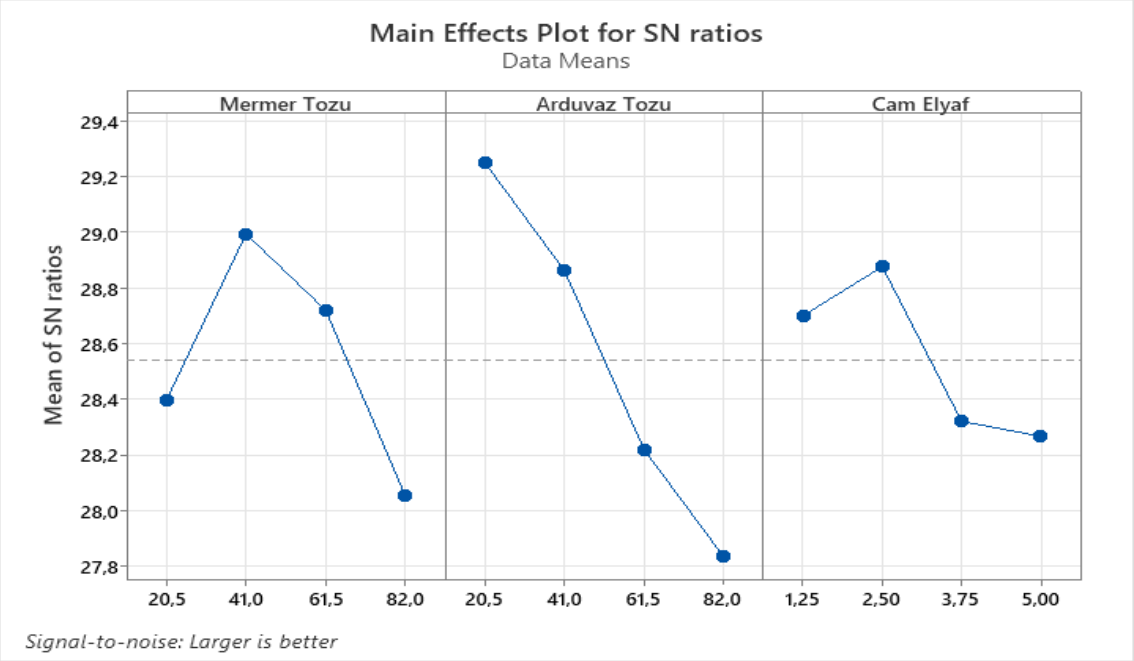
3.3.4. 28 Günlük Test Çekici (Schmidt) Deneyi Sonuçları

Yapılan deney sonucunda bulunan 28 günlük test çekici deney sonuçlarının Taguchi metoduyla analizleri yapılmıştır. Test çekici sonuçlarının yüksek olması daha iyi olacağı için S/N oranları hesaplanırken En büyük- En iyi durumu dikkate alınmıştır. Tablo 57'de test çekici deney sonuçlarına göre elde edilen S/N (sinyal gürültü oranı) oranları verilmiştir.

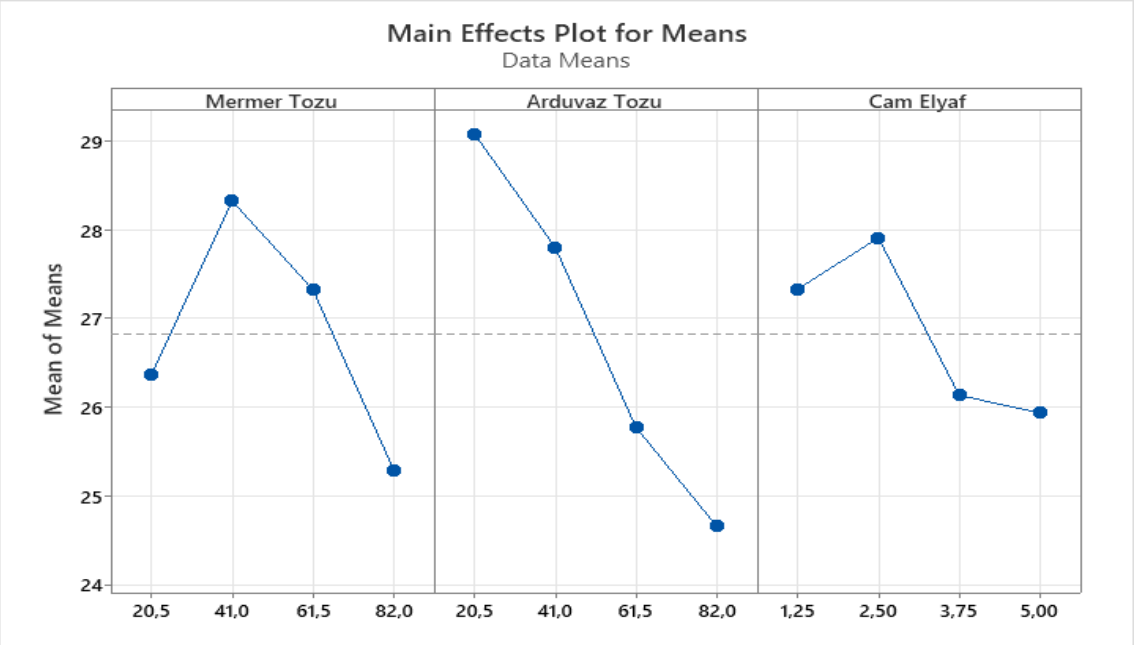
Tablo 57. Test çekici deneyi S/N oranları

Deney No	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf	Test Çekici deney sonuçları	S/N oranı
D1	20.5	20.5	1.25	28.32	29.0419
D2	20.5	41.0	2.50	28.14	28.9865
D3	20.5	61.5	3.75	24.90	27.9240
D4	20.5	82.0	5.00	24.10	27.6403
D5	41.0	20.5	2.50	32.18	30.1517
D6	41.0	41.0	1.25	30.36	29.6460
D7	41.0	61.5	5.00	25.78	28.2257
D8	41.0	82.0	3.75	24.98	27.9518
D9	61.5	20.5	3.75	29.48	29.3905
D10	61.5	41.0	5.00	27.52	28.7930
D11	61.5	61.5	1.25	26.70	28.5302
D12	61.5	82.0	2.50	25.60	28.1648
D13	82.0	20.5	5.00	26.34	28.4123
D14	82.0	41.0	3.75	25.18	28.0211
D15	82.0	61.5	2.50	25.71	28.2020
D16	82.0	82.0	1.25	23.95	27.5861

Her parametre seviyesine göre S/N oranı ve test çekici değerleri hesaplanmış ve optimum değerler bu sonuçlara göre belirlenmiştir. Parametre seviyelerine göre S/N oranları Şekil 41'de verilmiştir. Parametre seviyelerine göre test çekici değerleri ortalama etki grafiği ise Şekil 42'de verilmiştir.



Şekil 41. Parametre seviyelerine göre test çekici deneyi S/N oranları



Şekil 42. Parametre seviyelerine göre test çekici deneyi ortalama etki grafiği

Şekil 41 incelendiğinde; %10 mermer tozu, %5 arduvaz tozu, %0.50 cam elyafın olduğu durumda en yüksek değere ulaşıldığı görülmüştür. Bu sebeple mermer tozu 41 gr, arduvaz tozu 20.5 gr, cam elyaf 2.50 gr seviyeleri (A2B1C2) Taguchi optimizasyon metoduna göre en optimum faktör seviyelerini oluşturmuştur. Mermer tozunun ve cam elyafın %10'a kadar dayanımı artırdığı, arduvaz tozunun ise %5'ten sonra dayanımı düşürdüğü gözlemlenmiştir.

Tablo 58'de S/N oranının faktörlere göre değişimi ve Tablo 59'da ise ortalamanın faktörlere göre değişimini veren değerlerin sunulduğu tablolar verilmiştir.

Tablo 58. S/N oranları için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf
1	28.40	29.25	28.70
2	28.99	28.86	28.88
3	28.72	28.22	28.32
4	28.06	27.84	28.27
Delta	0.94	1.41	0.61
Rank	2	1	3

Tablo 59. Ortalamalar için yanıt tablosu

Seviye	Mermer Tozu	Arduvaz Tozu	Cam Elyaf
1	26.37	29.08	27.33
2	28.32	27.80	27.91
3	27.33	25.77	26.13
4	25.29	24.66	25.94
Delta	3.03	4.42	1.97
Rank	2	1	3

Her faktör için hesaplanan S/N oranının en yüksek olduğu değer en iyi deney sonucunu göstermektedir. Tablo 58 incelendiğinde; test çekici sonucuna en çok etkisi olan faktörün arduvaz tozu olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının arduvaz tozu (1), mermer tozu (2) ve en düşük deltaya sahip cam elyaf (3) olduğu görülmektedir.

Tablo 59'da ortalamalar grafiğinde de test çekici sonucuna en çok etkisi olan faktörün arduvaz tozu olduğu görülmüştür. Deney sonucunu etkileyen faktörlerin önem sıralamasının arduvaz tozu (1), mermer tozu (2) ve en düşük deltaya sahip cam elyaf (3) olduğu görülmektedir. Tablo 58 ve Tablo 59'da verilen delta ve rank değerleri incelendiğinde sonuçların birbirine paralel olduğu görülmektedir.

Deney parametrelerinin test çekici sonucu üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amacıyla varyans analizi yapılmıştır. Tablo 60'da varyans analiz sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 60. Test çekici deneyi varyans analiz sonuçları

Parametre	Serbestlik Derecesi (DF)	Kareler Toplamı (SS)	Ortalama Kare (MS)	F değeri	P değeri	Faktör Etkisi (%)
Mermer tozu	3	20.210	6.7366	10.37	0.009	24.57
Arduvaz tozu	3	47.366	15.7886	24.31	0.001	57.58
Cam elyaf	3	10.790	3.5967	5.54	0.037	13.12
Hata (Error)	6	3.896	0.6494			4.74
Toplam (Total)	15	82.262				100.00
R-Sq= % 95.26	R-Sq(adj)= % 88.16					

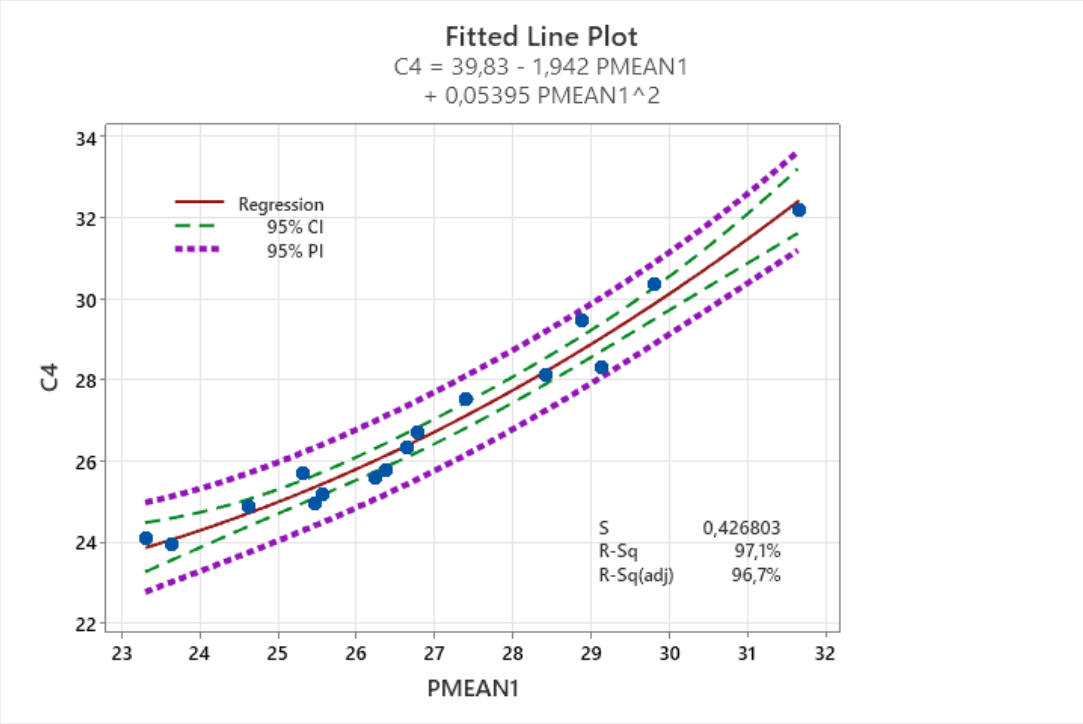
Varyans analiz sonuçları incelendiğinde; test çekici sonucuna en yüksek etkiyi % 57.58 oranıyla arduvaz tozunun verdiği görülmektedir. Diğer faktörler %24.57 oranıyla mermer tozu ve % 13.12 oranıyla cam elyaftır.

Tablo 61'de test çekici parametrelerin optimum seviyeleri Taguchi analizi ve doğrulama deney sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 61. Test çekici tahmini analizi ve doğrulama deney sonuçları

Deney Parametreleri	Optimum parametre seviyeleri	Taguchi analiz sonucu	Doğrulama deney sonucu
Mermer tozu	%10	31.65	32.18
Arduvaz tozu	%5		
Cam elyaf	%0.50		

Tablo 61 incelendiğinde; mermer tozunun %10, arduvaz tozunun %5, cam elyafın %0.50 olduğu durumlarda optimum sonuç elde edilmiştir. Ayrıca Taguchi analiz sonucu ve doğrulama deney sonucu hesaplanmış ve bu sonuçların birbirine çok yakın değerler olduğu görülmüştür. Şekil 43'de tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği verilmiştir.



Şekil 43. Tahmini değerler ile gerçek değerler grafiği

Şekil 43 incelendiğinde; tahmini değerler ile gerçek değerler grafiğinde noktaların çizgi üzerinde ve yakınında olduğu görülmüştür. Bu da sonuçların güven aralığında bulunduğunu göstermektedir. Grafikte bulunan mor çizgiler bireysel gözlemlerin dağılımını ifade etmektedir. Bu da modelin bireysel veri noktalarını ne kadar iyi tahmin edebileceğini göstermektedir. Tahmin aralığı genel olarak güven aralığından daha geniştir çünkü bireysel verilerin değişkenliği daha fazla olmaktadır. Grafikte yer alan yeşil çizgiler arasındaki alan, tahmin edilen regresyon çizgisi etrafındaki olası ortalama sapmayı ifade eder. Bu da modelin tahminlerinin ne kadar kesin olduğunu göstermektedir.

3.4. Sülfat Deney Sonuçları

3.4.1. Basınç Dayanımı Sonuçları

150x150x150 mm'lik 3 adet küp numune 28 gün boyunca magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisi içerisinde bekletilmiştir. Sülfat ortamında bekletilen numuneler üzerinde basınç dayanım deneyi yapılmıştır. Sülfat çözeltisinde bekletilen numuneler ile sülfata maruz bırakılmamış numunelerin basınç dayanımları Tablo 62'de gösterilmiştir.

Tablo 62. Sülfat çözeltisinde bekletilen numuneler ile sülfata maruz bırakılmamış numunelerin basınç dayanımları

Deney Numarası	Sülfata Maruz Bırakılmamış Numuneler (MPa)	Sülfata Maruz Numuneler (MPa)
Referans	55.76	44.30
CE0.25-MT5-AT5	45.07	34.66
CE1-MT10-AT15	42.64	33.16

Tablo 62 incelendiğinde Sülfata maruz kalan referans numunesinde basınç dayanımının %20.55 oranında düştüğü, CE0.25-MT5-AT5 numunesinde basınç dayanımının %23.09 oranında düştüğü ve CE1-MT10-AT15 numunesinde basınç dayanımının %22.23 oranında düştüğü görülmüştür.

Şekil 44'de sülfata maruz kalmış beton numunesinin görüntüsü verilmiştir.

Şekil 44. Sülfata maruz beton numunesi

3.4.2. Test Çekici Sonuçları

150x150x150 mm'lik 3 adet küp numune 28 gün boyunca sülfat (MgSO4) çözeltisi içerisinde bekletilmiştir. Sülfat ortamında bekletilen numuneler üzerinde test çekici deneyi yapılmıştır. Sülfat çözeltisinde bekletilen numuneler ile sülfata maruz bırakılmamış numunelerin test çekici sonuçları Tablo 63'te gösterilmiştir.

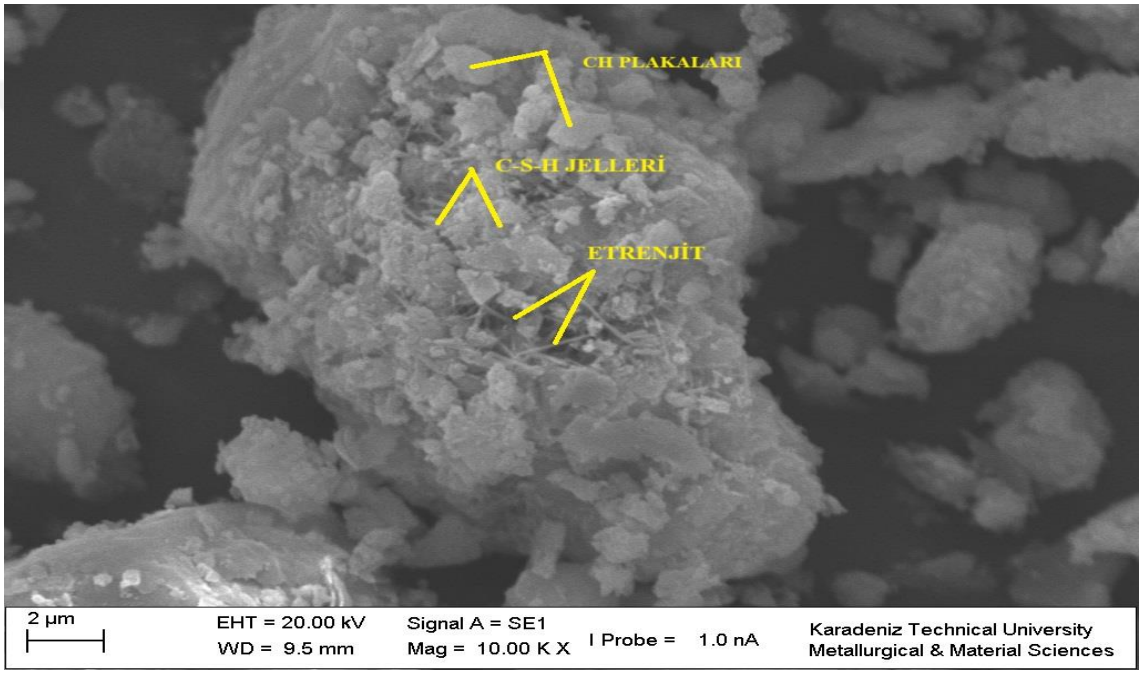
Tablo 63. Sülfat çözeltisinde bekletilen numuneler ile sülfata maruz bırakılmamış numunelerin basınç dayanımları

Deney Numarası	Sülfata Maruz Bırakılmamış Numuneler (MPa)	Sülfata Maruz Numuneler (MPa)
Referans	32.44	30.54
CE0.25-MT5-AT5	28.32	27.45
CE1-MT10-AT15	25.78	24.62

Tablo 63 incelendiğinde Sülfata maruz kalan referans numunesinde test çekici dayanımının %5.86 oranında düştüğü, CE0.25-MT5-AT5 numunesinde test çekici %3.07 oranında düştüğü ve CE1-MT10-AT15 numunesinde test çekici %4.5 oranında düştüğü görülmüştür.

3.5. SEM Analizi

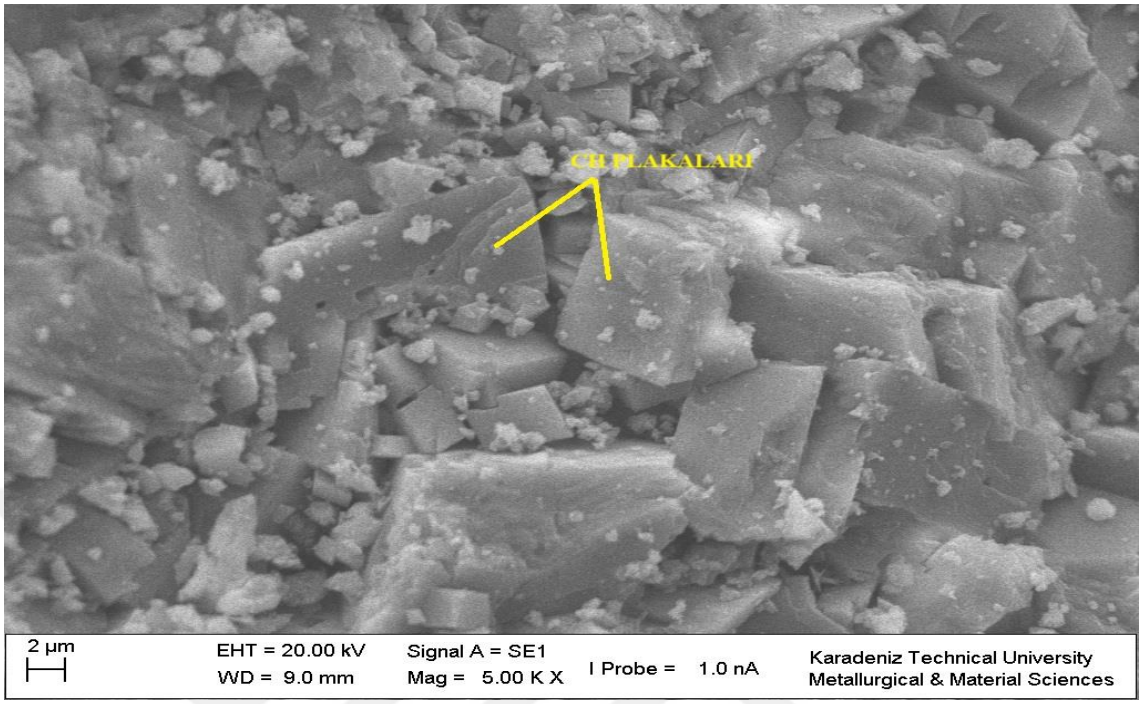
28 günlük dayanıma ulaşan numuneler üzerinde SEM analizi yapılmıştır. SEM analizlerine ait görüntüler aşağıda şekillerde gösterilmiştir. Şekil 44 ve Şekil 45'te referans numunesine ait SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 45. Referans numunesi sem görüntüsü

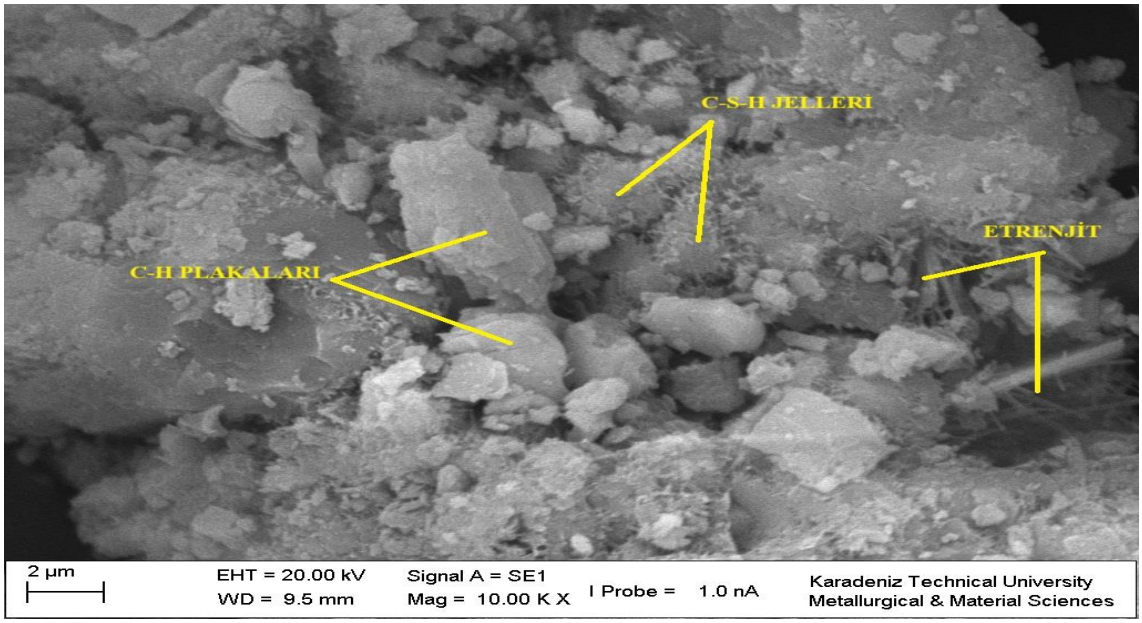
Şekil 45 incelendiğinde 28 günlük dayanıma ulaşan referans numunesinin mikro yapı görüntülerinde C-S-H (Kalsiyum Silikat Hidrat) jelleri, CH plakları ve etrenjit oluşumu görülmektedir. Şekilde görülen iğnemsi-çubuk benzeri yapılar etrenjit oluşumunu göstermektedir. Bu iğnemsi kristaller çimento hidratasyonu sonucunda oluşmaktadır ve betonun mikroyapısında önemli bir role sahiptir. Şekilde görülen pamuksu-lifli görünümlü yapılar C-S-H jelleri oluşumunu göstermektedir. C-S-H jelleri beton içerisinde gözenekleri doldurarak daha yoğun ve geçirimsiz bir yapı meydana getirir. Çimento pastasının sertleşmesini ve mukavemeti artırır. Bu da betonun basınç dayanımının artmasına sebep olur. Şekilde görülen levha görünümlü yapılar CH

(Portlandit) plakaları oluşumunu göstermektedir. CH plakaları çimento hidratasyonu esnasında oluşan kristalli bir yapıdır.



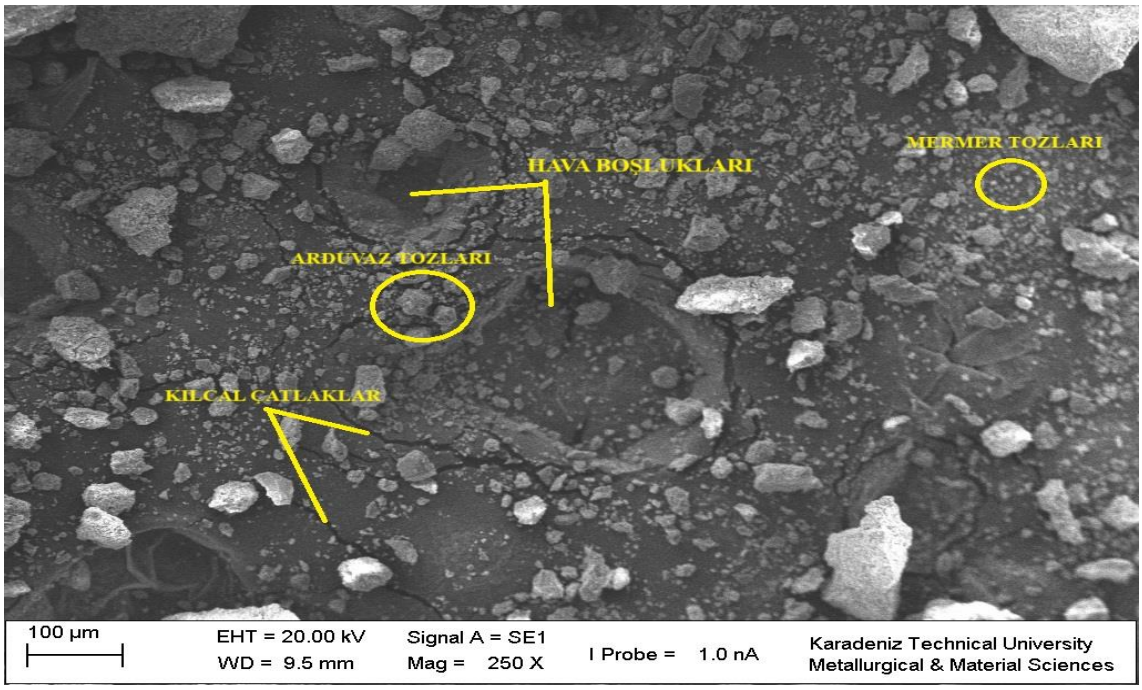
Şekil 46. Referans Numunesi sem görüntüsü

Şekil 46 incelendiğinde; CH plakaları görülmektedir. CH plakaları çimento hidratasyonu esnasında oluşan kristalli bir yapıdır.



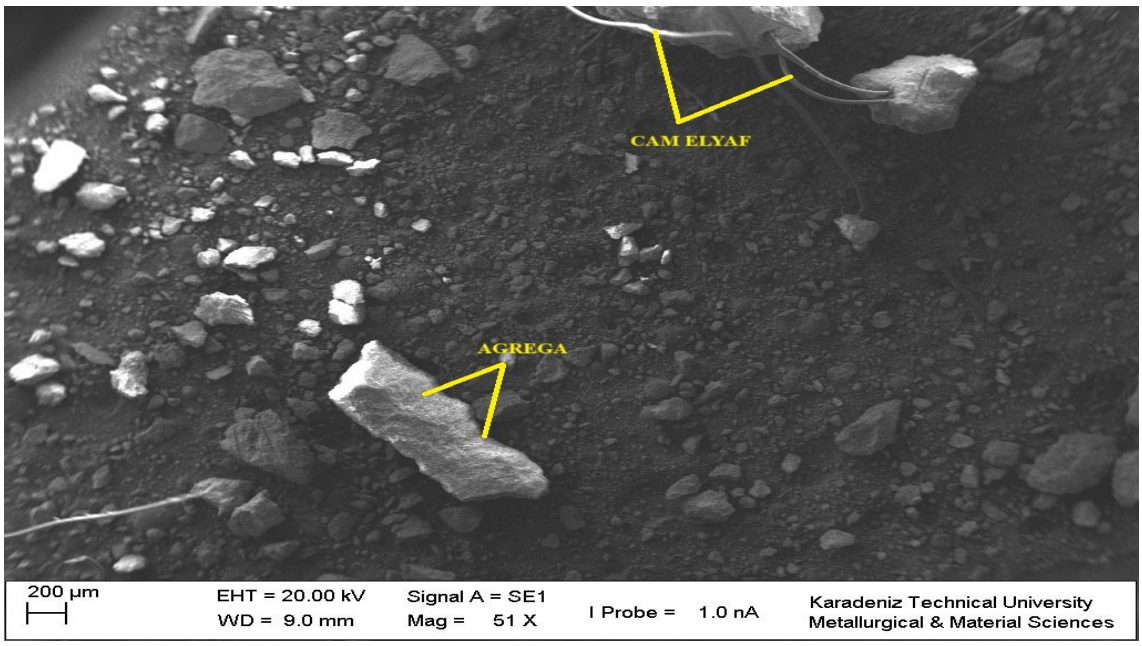
Şekil 47. C0.25-MT10-AT10 numunesi SEM görüntüsü

Şekil 47 incelendiğinde 28 günlük dayanıma ulaşan C0.25-MT10-AT10 numunesinin mikro yapı görüntülerinde C-S-H (Kalsiyum Silikat Hidrat) jelleri, CH plakları ve etrenjit oluşumu görülmektedir. Şekilde görülen iğnemsi-çubuk benzeri yapılar etrenjit oluşumunu göstermektedir. Şekilde görülen pamuksu-lifli görünümlü yapılar C-S-H jelleri oluşumunu göstermektedir. Şekilde görülen levha görünümlü yapılar CH (Portlandit) plakaları oluşumunu göstermektedir.



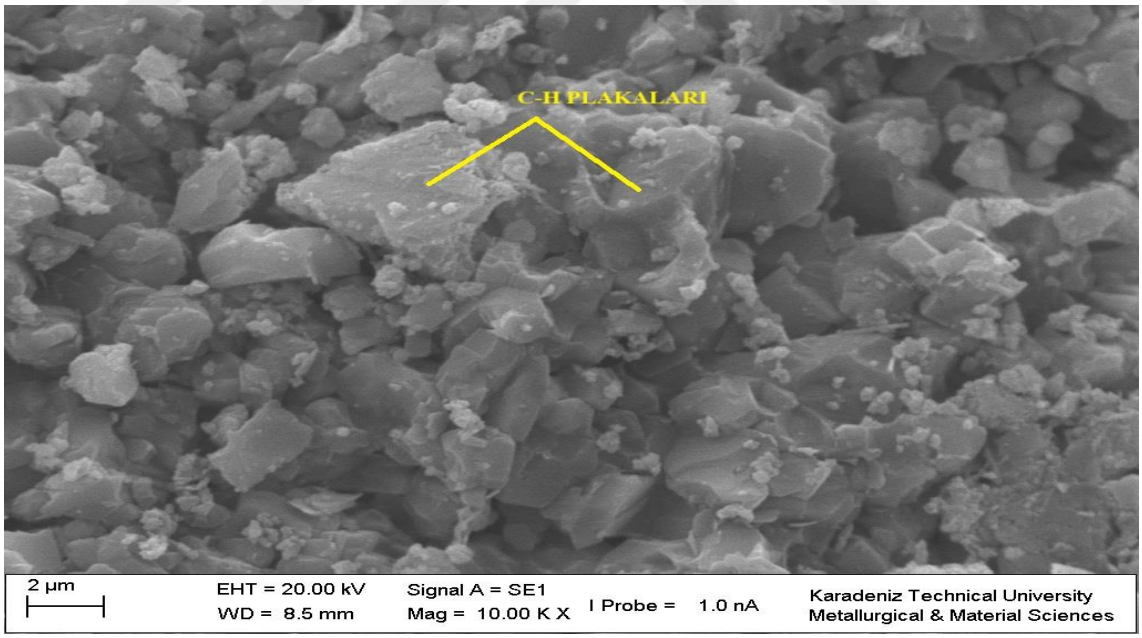
Şekil 48. C0.25-MT10-AT10 numunesi SEM görüntüsü

Şekil 48 incelendiğinde 28 günlük dayanıma ulaşan C0.25-MT10-AT10 numunesinin mikro yapı görüntülerinde hava kabarcıkları ve kılcal çatlaklar görülmektedir. Şekilde görülen en küçük boyutlu parçalar mermer tozlarını göstermektedir. Daha büyük parçalar ise arduvaz tozlarını göstermektedir.



Şekil 49. CE1-MT15-AT10 numunesi SEM görüntüsü

Şekil 49 incelendiğinde 28 günlük dayanıma ulaşan CE1-MT15-AT10 numunesinin mikro yapı görüntülerinde cam elyaf ve agrega parçaları görülmektedir.

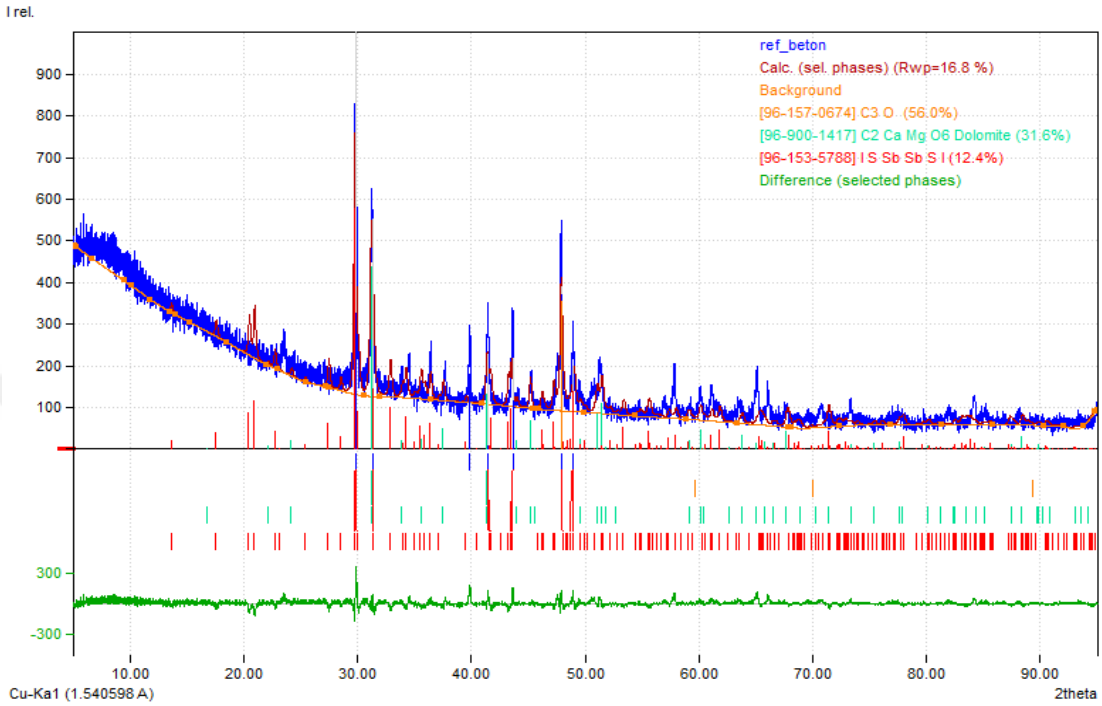


Şekil 50. CE1-MT15-AT10 numunesi SEM görüntüsü

Şekil 50 incelendiğinde 28 günlük dayanıma ulaşan CE1-MT15-AT10 numunesinin mikro yapı görüntülerinde levha görünümlü yapılar CH (Portlandit) plakaları oluşumunu göstermektedir.

3.6. XRD Analizi

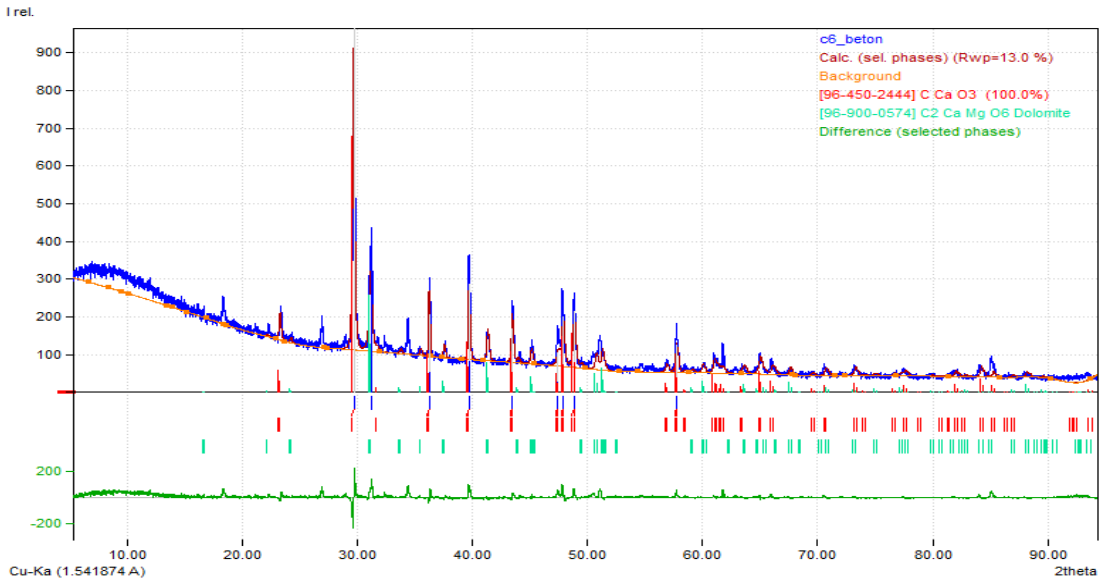
28 günlük dayanıma ulaşan numuneler üzerinde XRD analizi yapılmıştır. XRD analizlerine ait grafikler aşağıda şekillerde gösterilmiştir. Şekil 51'de referans numunesine ait XRD grafiği verilmiştir.



Şekil 51. Referans numunesi XRD analizi

Şekil 51 incelendiğinde; referans numunesinin içeriğinde %56 oranında C_3S (trikalsiyum silikat), %31.6 oranında C_2CaMgO_6 (Dolomit), %12.4 oranında Si-Sb (antimon) bileşeni bulunduğu görülmektedir.

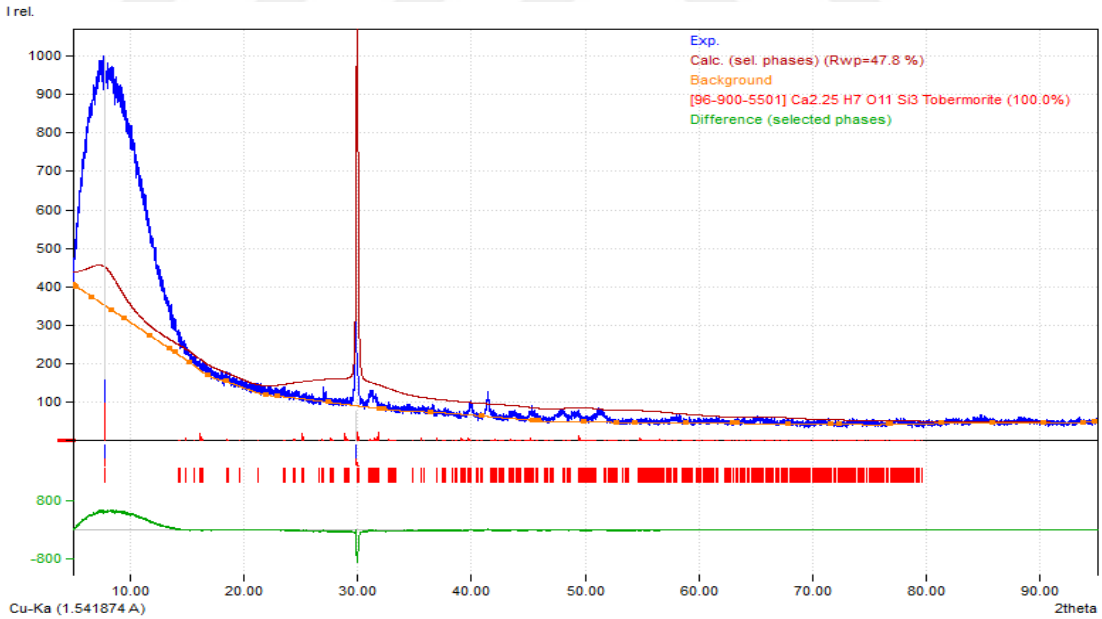
Şekil 52'de CE0.25-MT10-AT10 numunesine ait XRD analiz grafiği verilmiştir.



Şekil 52. CE0.25-MT10-AT10 numunesi XRD analizi

Şekil 52 incelendiğinde; CE0.25-MT10-AT10 numunesinde % 48 oranında O, %40 oranında Ca, %12 oranında C bileşini bulunduğu görülmektedir.

Şekil 53'de CE1-MT15-AT10 numunesine ait XRD analiz grafiği verilmiştir.



Şekil 53. CE1-MT15-AT10 numunesi XRD analizi

Şekil 53 incelendiğinde; CE1-MT10-AT10 numunesinde % 49.2 oranında O, % 25.2 oranında Ca , %23.6 oranında Si bileşini bulunduğu görülmektedir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında atık mermer tozu ve arduvaz tozunun çimento yerine kütlece %5; %10; %15; %20 oranında kullanılması, cam lif ise belirli oranlarda hacimce %0.25; %0.50; %0.75 ve %1.00 oranlarında değiştirilerek kullanılmasıyla üretilen çevre dostu beton üzerinde taze ve sertleşmiş beton deneyleri ve sülfat deneyi yapılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır.

1. Bu deneyler sonucunda genel itibariyle beton karışımında mermer tozunun %5'e kadar kullanımı, arduvaz tozunun %10'a kadar kullanımı ve cam elyafında %0.5'e kadar kullanımının sonuçlara olumlu olarak yansıdığı görülmüştür.
2. Taze beton deneylerinden slump deneyi sonucunda; %5 mermer tozu, %10 arduvaz tozu, %0.50 cam elyafın olduğu durumda en yüksek slump değerine ulaşıldığı görülmüştür. Mermer tozunun %5, arduvaz tozunun %10'a kadar çimentoyla yer değiştirilmesinin slump değerlerini artırdığı görülmüştür. %10'dan fazla kullanılması durumunda ise slump değerlerinin düştüğü gözlemlenmiştir. Cam elyaf katkısının da %0.50 oranına kadar slump değerlerini artırdığı gözlemlenmiştir. Slump deney sonucunu en çok etkileyen parametrenin mermer tozu olduğu görülmüştür.
3. Taze beton deneylerinden hava muhtevası deneyi sonucunda; %15 mermer tozu, %5 arduvaz tozu, %0.75 cam elyafın olduğu durumda minimum değere ulaşıldığı görülmüştür. Hava muhtevası deney sonucunu en çok etkileyen parametrenin mermer tozu olduğu görülmüştür.
4. Sertleşmiş beton deneylerinden 7 günlük basınç dayanımı deneyi sonucunda; %5 mermer tozu, %10 arduvaz tozu, %0.50 cam elyafın olduğu durumda en yüksek basınç dayanımına ulaşıldığı görülmüştür. Mermer tozunun %5'den fazla kullanılması durumunda basınç dayanımının düştüğü, arduvaz tozunun ise %10'a kadar çimentoyla yer değiştirilmesinin basınç dayanımını artırdığı %10'dan sonra basınç dayanımını düşürdüğü görülmüştür. Cam elyaf katkısının da %0.50 oranına kadar basınç dayanımını artırdığı görülmüştür. Basınç dayanım deney sonucunu en çok etkileyen parametrenin mermer tozu olduğu görülmüştür.
5. Sertleşmiş beton deneylerinden 7 günlük yarmada çekme dayanımı deneyi sonucunda; %15 mermer tozu, %10 arduvaz tozu, %1 cam elyafın olduğu

durumda en yüksek yarmada çekme dayanımına ulaşıldığı görülmüştür. Mermer tozunun %15, arduvaz tozunun %10'a kadar çimentoyla yer değiştirilmesinin yarmada çekme dayanımını artırdığı görülmüştür. Cam elyaf oranının arttıkça yarmada çekme dayanımının arttığı görülmüştür. Yarmada çekme dayanım deney sonucunu en çok etkileyen parametrenin cam elyaf olduğu görülmüştür.

6. Sertleşmiş beton deneylerinden 7 günlük ultrases deneyi sonucunda; %5 mermer tozu, %5 arduvaz tozu, %0.25 cam elyafın olduğu durumda en yüksek ultrases geçiş hızı değerine ulaşıldığı görülmüştür. Mermer tozu ve arduvaz tozunun %5'ten fazla kullanılması, cam elyafın da %0.25'ten fazla kullanılması durumunda ultrases geçiş hızının düştüğü görülmüştür. Ultrases geçiş hızını en çok etkileyen parametrenin cam elyaf olduğu görülmüştür.
7. Sertleşmiş beton deneylerinden 7 günlük test çekici deneyi sonucunda; %10 mermer tozu, %5 arduvaz tozu, %0.50 cam elyafın olduğu durumda en yüksek değere ulaşıldığı görülmüştür. Mermer tozunun ve cam elyafın %10'a kadar dayanımı artırdığı, arduvaz tozunun ise %5'ten sonra dayanımı düşürdüğü gözlemlenmiştir. Test çekici sonucunu en çok etkileyen parametrenin arduvaz tozu olduğu görülmüştür.
8. Sertleşmiş beton deneylerinden 28 günlük basınç dayanımı deneyi sonucunda; %5 mermer tozu, %10 arduvaz tozu, %0.50 cam elyafın olduğu durumda en yüksek basınç dayanımına ulaşıldığı görülmüştür. Mermer tozunun %5'den fazla kullanılması durumunda basınç dayanımının düştüğü, arduvaz tozunun ise %10'a kadar çimentoyla yer değiştirilmesinin basınç dayanımını artırdığı %10'dan sonra basınç dayanımını düşürdüğü görülmüştür. Cam elyaf katkısının da %0.50 oranına kadar basınç dayanımını artırdığı görülmüştür. Basınç dayanım deney sonucunu en çok etkileyen parametrenin mermer tozu olduğu görülmüştür.
9. Sertleşmiş beton deneylerinden 28 günlük yarmada çekme dayanımı deneyi sonucunda; %15 mermer tozu, %10 arduvaz tozu, %1 cam elyafın olduğu durumda en yüksek yarmada çekme dayanımına ulaşıldığı görülmüştür. Mermer tozunun %15, arduvaz tozunun %10'a kadar çimentoyla yer değiştirilmesinin yarmada çekme dayanımını artırdığı görülmüştür. Cam elyaf oranının arttıkça yarmada çekme dayanımının arttığı görülmüştür. Yarmada çekme dayanım deney sonucunu en çok etkileyen parametrenin cam elyaf olduğu görülmüştür.

10. Sertleşmiş beton deneylerinden 28 günlük ultrases deneyi sonucunda; %5 mermer tozu, %5 arduvaz tozu, %0.25 cam elyafın olduğu durumda en yüksek ultrases geçiş hızı değerine ulaşıldığı görülmüştür. Mermer tozu ve arduvaz tozunun %5'ten fazla kullanılması, cam elyafın da %0.25'ten fazla kullanılması durumunda ultrases geçiş hızının düştüğü görülmüştür. Ultrases geçiş hızını en çok etkileyen parametrenin cam elyaf olduğu görülmüştür.
11. Sertleşmiş beton deneylerinden 28 günlük test çekici deneyi sonucunda; %10 mermer tozu, %5 arduvaz tozu, %0.50 cam elyafın olduğu durumda en yüksek değere ulaşıldığı görülmüştür. Mermer tozunun ve cam elyafın %10'a kadar dayanımı artırdığı, arduvaz tozunun ise %5'ten sonra dayanımı düşürdüğü gözlemlenmiştir. Test çekici sonucunu en çok etkileyen parametrenin arduvaz tozu olduğu görülmüştür.
12. Sülfata maruz kalan referans numunesinde basınç dayanımının %20.55 oranında düştüğü, CE0.25-MT5-AT5 numunesinde basınç dayanımının %23.09 oranında düştüğü ve CE1-MT10-AT15 numunesinde basınç dayanımının %22.23 oranında düştüğü görülmüştür.
13. Sülfata maruz kalan referans numunesinde test çekici dayanımının %5.86 oranında düştüğü, CE0.25-MT5-AT5 numunesinde test çekici %3.07 oranında düştüğü ve CE1-MT10-AT15 numunesinde test çekici %4.5 oranında düştüğü görülmüştür.
14. SEM analizleri incelendiğinde C-S-H (Kalsiyum Silikat Hidrat) jelleri, CH plakları ve etrenjit oluşumu görülmektedir. C-S-H jelleri beton içerisinde gözenekleri doldurarak daha yoğun ve geçirimsiz bir yapı meydana getirir ve betonun basınç dayanımının artmasına sebep olur.
15. XRD grafiklerine bakıldığında beton bileşenlerinde C_3S (trikalsiyum silikat) olduğu görülmüştür. Bu bileşen çimento prizinden sonra ilk birkaç gün içerisinde hızlı tepkimeye girerek betonun yüksek erken dayanım kazanmasına neden olur. Yine C_3S (trikalsiyum silikat) suyla reaksiyona girerek kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jellerini meydana getirir.
16. Taguchi metoduyla yapılan analizler sonucunda optimum parametre seviyelerine göre, yapılan doğrulama deney sonuçlarıyla Taguchi analiz sonuçları mukayese edildiğinde %90-95 güven aralığında olduğu görüldüğünden Taguchi yönteminin beton deney tasarımında kullanılabilir bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada elde edilen sonuçlara göre atık mermer ve atık arduvaz tozunun belli oranlara kadar çimentoyla yer değiştirmesinin mümkün olduğu, bundan sonra yapılacak çalışmalarda başka atık malzemeler ve farklı lifler kullanılarak çevre dostu beton üretimi yapılabileceği ve karbon salınımının düşürülebileceği deneysel çalışmalarla gösterilebilir. Ayrıca çeşitli kimyasal maddelerin etkileri ve aşındırma gibi mekanik etkiler altında yeni birleşik etki mekanizmaları geliştirilerek beton veya çimento harçları sınanabilir.

KAYNAKÇA

Abbas, M. M. ve Muntean, R. (2025). Marble powder as a sustainable cement replacement: A review of mechanical properties. *Sustainability, 17*(2), 736.

Ağar, E., Öztaş, G. ve Sütaş, İ. (1998). *Beton Yollar (Rijit Yol Üst Yapıları)* (Yayın No.1594). İstanbul: İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası.

Akman, M. S. (1987). *Yapı Malzemeleri* (Yayın No. 161, 161 s.). İstanbul: İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Yayını.

Al-Akhras N.M. (2006). Durability of metakaolin concrete to sulfate attack. *Cement and Concrete Research*, 36, 1727–1734.

Alişer, B. (2013). Mermer Tozu ve Cam Elyaf Katkılı Çimento Harçlarının Sülfat Dayanıklılığının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ, (ATT 091125110).

Altun, F., Özcan, D. M., Vekli, M. ve Karahan, O. (2004). Çelik lif katkılı C20 betonun mekanik özelliklerinin deneysel araştırılması. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 4*(1-2), 45-58.

Alyamaç, K. E. ve İnce, R. (2009). A preliminary concrete mix design for SCC with Marble Powders. *Construction and Building Materials, 23*, 1201–1210.

American Concrete Institute (ACI) Committee 544. (1997). *ACI 544. 1R-96: State-of-the-art report on fiber reinforced concrete.* American Concrete Institute.

Arel, H.S. (2016). Recyclability of waste marble in concrete production. *Journal of Cleaner Production, 131*, 179-188.

Arslan, K. M. (2014). Sülfat Etkisine Maruz Kalmış Mineral ve Nano Katkılı Harçların Durabilitesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, (ATT 501101037).

Aruntaş, H.Y., Dayı M., Tekin, İ., Birgül, R. ve Şimşek, O. (2007). Kendiliğinden yerleşen beton özelliklerine atık mermer tozunun etkisi. 2. Yapı Kimyasalları Sempozyumu ve Sergisi: Kimyasal katkı maddeleri (ss. 174-180). Ankara.

Aslan, S. (2020). Cam Lif Takviyesinin Beton Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Avrasya Üniversitesi, Trabzon (ATT 626182).

ASTM. (1989). *ASTM C1012: Standard test method for length change of hydraulic-cement mortars exposed to a sulfate solution*. Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia: American Society for Testing and Materials.

Aytekin, R. (2007). Bodrum Yalıçiftlik Beldesi Alazeytin Köyü Kayrak Taşlarının Fiziko –Mekanik Özellikleri ve Değerlendirilebilirliği. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, (ATT 178974).

Bahadır, B. (2007). Liflerin beton kırılma tokluğuna etkileri. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya (ATT 216469).

Baikerikar, A. V. (2014). A review on green concrete. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (JETIR), 1*(6), 472–474.

Barbero, E. J. (1999). *Introduction to composite materials design*. Ann Arbor, MI: Edwards Brothers.

Barluenga, G. ve Hernández-Olivares, F. (2010). Self-levelling cement mortar containing grounded slate from quarrying waste. *Construction and Building Materials, 24*(9), 1601–1607. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.02.033

Baştürk Ö. (2008). Beton Yüzeylerine Sarılan Lifli Kompozitlerin Basınç Dayanımına Etkilerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Sakarya (ATT 214020).

Bayrak, O.Ü. (2007). Rijit Üstyapı Tasarımına Yeni Bir Yaklaşım. Doktora Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, (ATT 200794).

Bekem, İ., Gültekin, A. B. ve Dikmen, Ç. B. (2009). Yapı ürünlerinin "hizmet ömrü" açısından incelenmesi: Betonarme örneği. *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu Bildirileri,* 2155–2160. Kuşadası, Türkiye.

Beycioğlu, A., Başyiğit, C. ve Subaşı, S. (2008). Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe kullanımı ile geri kazanılması ve çevresel etkilerinin azaltılması. *Çevre Sorunları Sempozyumu Bildirileri,* 1386–1394. Kocaeli, Türkiye.

Bilensoy, M. (2010). Mermer Fabrikaları Toz Atıklarının Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, (ATT 283114).

Bilgin, Ö. ve Koç, E. (2013). Mermer madenciliğinde çevresel etkiler. *Madencilik Türkiye Dergisi*, 28, 68-79.

Bingöl, Ş., ve Çavdar, A. (2018). A new nomogram proposal to determine concrete compressive strength by combined nondestructive testing methods. *Research in Nondestructive Evaluation,* 29 (1), 1-17.

Biricik, H., Gündüz, A. S., Çakır, Ö. ve Sarıer, N. (2003). Doksan gün sülfat etkisinde kaldıktan sonra kalker ve silis dumanı katkılı betonların bazı özellikleri. *5. Ulusal Beton Kongresi Bildirileri,* 493–503. İstanbul, Türkiye.

Błaszczyński, T. ve Król, M. (2015). Usage of green concrete technology in civil engineering. *Procedia Engineering, 122*, 296–301. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.043

Boğa, A. R., Kürklü, G. ve Ergün, A. (2014). Mermer tozu katkılı kendiliğinden yerleşen betonların taze ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. ISEM2014: 5. Uluslararası Mühendislik Araştırmaları Sempozyumu Bildirileri, 1239–1248. Adıyaman, Türkiye.

Bornemann, R. ve Schmidt, M. (2002). The role of powders in concrete. In Proceedings of the 6th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete (pp. 863–872). Leipzig, Almanya.

Box, G. E. P. ve Bisgaard, S. (1987). The scientific context of quality improvement (pp. 54–61). Center for Quality and Productivity Improvement, University of Wisconsin–Madison.

Can, Ö., Durmuş, G., Subaşı, S., Yıldız, K. ve Arslan, M. (2009). Lif katkılı betonların aşınma direnci üzerindeki etkileri. 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (İATS'09), 2125–2128. Karabük, Türkiye.

Canpolat, F. ve Yılmaz, K. (2002). Doğal zeolit ve uçucu kül katkılı ve katkısız harçların sülfat dayanıklılığı. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 15(2), 11–24.

Ceylan, H. ve Mança, S. (2013). Mermer parça atıklarının beton agregası olarak değerlendirilmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi, 3(2), 21–25.

Çavdar, A. ve Yetgin, Ş. (2005). Doğal Puzolan Katkı Oranının Çimentonun Dayanım, İşlenebilirlik, Katılaşma ve Hacim Genleşmesi Özelliklerine Etkisi. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*,17 (4), 687-692.

Çavdar, A. (2008). Farklı puzolanik bileşime ve hamur yapısına sahip çimento harç örneklerinin, sülfat içeren ortam ve/veya aşınma etkilerine karşı dayanıklılığının incelenmesi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.

Çavdar, A. (2012). A study on the effects of high temperature on mechanical properties of fiber reinforced cementitious composites. Composites Part B: Engineering, 43(5), 2452–2463. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.10.005

Çavdar, A. (2014). Investigation of freeze–thaw effects on mechanical properties of fiber reinforced cement mortars. Composites Part B: Engineering, 58, 463–472. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.11.013

Çavdar, Ö. ve Çavdar, A. (2024). Availability of sedimentary and volcanic rock deposits on Northeastern Turkey as concrete aggregates. Physics and Chemistry of the Earth, 134, 103567. https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103567

Çavdar, Ö. ve Temizer, H. (2025). The regression analysis and determination of mechanical and physical properties on geopolymer composites under thermal and water curing. Thermal Science, 29(2), https://doi.org/10.2298/TSCI250216091C

Çavdar, Ö. ve Temizer, H. (2025). Microstructural investigation of geopolymer composites obtained from recyclable waste materials. European Mechanical Science, 9(2), 196-206. https://doi.org/10.26701/ems.1695691

Çelikten, S. ve Canbaz, M. (2021). Atık Andezit ve Mermer Tozunun Çimento Harçlarının Dayanım Özelliklerine Etkisi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi, 29*(1), 43-48.

Çetin, T. (2003). Türkiye mermer potansiyeli, üretimi ve ihracatı. *Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, *23*(3), 243–256.

Çınar, M. (2019). Atık mermer tozu ve uçucu külün birlikte kullanımıyla üretilen çimento esaslı enjeksiyon harcının taze ve sertleşmiş özelliklerinin araştırılması. Doktora Tezi, Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Gaziantep (ATT 547631).

Çitoğlu, S. ve Bayraktar, O. Y. (2018). Atık mermer tozu ve inşaat sektöründeki kullanımı ile ilgili çalışmalar. *ISAS, 3,* 1323-1330.

Dehghan, A., Peterson, K. ve Shvarzman, A. (2017). Recycled glass fiber reinforced polymer additions to Portland cement concrete. *Construction and Building Materials.*

Demirel, B. ve Alyamaç, K. E. (2018). Waste marble powder/dust. *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete,* 1, 181–197.

Dikme, D. (2010). Doğal Sülfat İçeriği Yüksek Olan Kumlarla Üretilen Harçlarda Sülfat Etkisinin İncelenmesi ve Mineral Katkıların Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul (ATT 501061028).

DPT (2001). *Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu*. Ankara: Devlet Planlama Teşkilatı.

Durmaz, B. (2007). Bölgesel Basınca Maruz Lifli Betonlarda Yatak Mukavemeti. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ (ATT 202190).

Ekincioğlu, Ö. (2002). Karma lif içeren çimento esaslı kompozitlerin mekanik davranışının incelenmesi. *Sika Teknik Bülten*, 10-11.

Erdem, R. T. ve Öztürk, A. U. (2012). Mermer tozu katkısının çimento harcı donma-çözünme özellikleri üzerine etkisi. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 1*(2), 85-91.

Erdoğdu, Ş. Ve Karataş, E. (2002). Sülfat iyonu konsantrasyonu düşük ortamlara maruz betonun durabilitesinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi. *5. Ulusal Beton Kongresi*, İstanbul, 555-566.

Eren, M.E. (2019). Atık Mermer Tozu Ve Lastik Agrega Kullanılarak Üretilmiş Çevre Dostu Betonların Dayanım Ve Dayanıklılık Özelliklerinin Belirlenmesi. Doktora Tezi, Fırat Üniversirtesi, Elazığ (ATT 618652).

Eren, Y. (2006). Metamorfik kayaçlar ve saha özellikleri. Selçuk Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Saha Jeolojisi Ders Notları, 43-44.

Ergi, E., Bilgin, S., Asan, A. ve Zeybek, S. (2007). Endüstriyel atık katkılı çimentoların beton dayanımı ve donatı korozyonuna etkileri. *Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu* (s. 312–313), Ankara.

Erkuş, T. (2021). Polipropilen Lifli Betonların Taguchi Metodu İle Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ (ATT 662868).

Ersoy, H. Y. (2003). *Kompozit Malzeme*, Literatür Yayınları. (Mimarlık Dizisi). ISBN : 975-8431-47-1.

Filiz, M. , Özel, C., Soykan, O. ve Ekiz, Y. (2010). Atık mermer tozunun parke taşlarında kullanılması. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 6*(2), 57-72.

Gücek, S. (2011). Mermer Tozu ve Uçucu Külün Kil Zeminlerin İyileştirilmesinde Kullanımı. Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, (ATT 284513).

Gül, R. ve Çelik, C. (2008). A Taguchi approach for investigation of some physical properties of concrete produced from mineral admixtures. *Building and Environment, 43*(6), 1127–1137.

Gül, R. ve Düzgün, O. A. (2005). Betonlarda çelik lif kullanılmasının etkisi. *D.S.İ. Teknik Bülten, 100*, 9-18.

Gülan, L. (2015). Atık Mermer Tozu ve Cam Elyaf Katkısının Betondaki Karbonatlaşmaya Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ (ATT 101125108).

Gümüşkaşık, M. (2023). Uçucu Kül ve Yüksek Fırın Curufunu Kullanarak Üretilen Kendiliğinden Yerleşen Betonların Mekanik Özelliklerinin Taguchi Metoduyla Analizinin Yapılması. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi, Şanlıurfa (ATT 797259).

Güner, M.S. ve Süme, V. (2001). *Yapı Malzemesi ve Beton* (s. 336). Aktif Yayınevi, İstanbul.

Gürer, C. ve Akbulut, H. (2005). Ocak atığı mermerler için alternatif bir atık değerlendirme yöntemi. *6.Ulusal Çevre Mühendisliği Kongresi*, TMMOB Çevre Mühendisleri Odası, 1-10.

Hameed, M. S., Sekar, A. S. S. (2009). Properties of green concrete containing quarry rock dust and marble sludge powder as fine aggregate. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 4*(4).

Imbabi, M. S., Carrigan, C. ve McKenna, S. (2012). Trends and developments in green cement and concrete technology. *International Journal of Sustainable Built Environment, 1*(2), 194–216.

Işık, V. (2019). Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Tektonik Araştırma Grubu, Ankara.

Karahan, O. (2006). Liflerle Güçlendirilmiş Uçucu Küllü Betonların Özellikleri. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Adana, (ATT 183626).

Khan, M. S., & Alam, R. (2025). Application of Taguchi design in sustainable concrete using marble dust and fly ash. *Cleaner Materials, 6*.

Khodabakhshian, A., Ghalehnovi, M., Brito, J., ve Shamsabadi, E. A. (2018). Mechanical, environmental and economic performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. *Construction and Building Materials, 169*, 237-251.

Kılınç, K., ve Uyan M. (2003). Beton karışım suyundaki sülfat tuzlarının çimento harcı özelliklerine etkisi. *5. Ulusal Beton Kongresi: Betonun Dayanıklılığı (Durabilite)*, İstanbul.

Kozak, M. (2003). Çelik lifli betonlar ve kullanım alanlarının araştırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi, Teknik bilimler Dergisi*, *3*(1), 26–35.

Kurt, G. (2006). Lif İçeriğini ve Su/Çimento Oranının Fibrobetonun Mekanik Davranışına Etkileri. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi İstanbul (ATT 223839).

Liu, Z., Zhang, W. ve Zhang, Y. (2023). Degradation behavior of concrete exposed to magnesium sulfate solution: Influence of cement composition and curing age. *Construction and Building Materials, 370*.

Majumdar, A. J. ve Ryder, J. F. (1968). Glassfiber reinforcement for cement products. *Glass Technology, 9*(3), 78–84.

Marinković, S., Radonjanin, V., Malešev, M., ve Ignjatović, I. (2010). Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. *Waste Management, 30*(11), 2255–2264.

Mashaly, A. O., El-Kaliouby, B. A., Shalaby, B. N., El–Gohary, A. M., ve Rashwan, M. A. (2016). Effects of marble sludge incorporation on the properties of cement composites and concrete paving blocks. *Journal of Cleaner Production, 112*, 731-741.

Mawlawizada, N. A. (2020). Atık mermer tozu kullanılarak üretilmiş çevre dostu betonların dayanım ve dayanıklılık özelliklerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ (ATT 636384).

Özel, C. (2007). Katkılı Betonların Reolojik Özeliklerinin Taze Beton Deney Yöntemlerine Göre Belirlenmesi. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, (ATT 213360).

Özyurt, N. (2000). Ultra Yüksek Dayanımlı Çimento Esaslı Kompozitlerin Mekanik Davranışı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul (ATT 100984).

Polat, H. ve Özel, C. (2012). TS EN 206-1'e göre tasarlanan ve zararlı kimyasal ortamlara maruz kalacak betonların basınç dayanımın bulanık mantık yöntemiyle tahmini, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, 8*(1), 26-35.

Postacıoğlu, B. (1987). *Beton*. Matbaa Teknisyenleri Basımevi, İstanbul.

Ramachandran, T. ve Singh, A. K. (2024). Flexural performance of hybrid fiber reinforced concrete using steel and glass fibers. *Materials Today: Proceedings, 85*, 1865–1872.

Rathod, M. P. ve Patel, D. M. (2024). Utilization of marble waste powder as partial replacement of cement in concrete: Experimental and statistical approach. *Case Studies in Construction Materials, 21*.

Sağlam, G. (2012). Çimento Üretiminde Atık Mermer Tozu Ve Atık Alçının Kullanılabilirliği. Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara (ATT 321678).

Shelke, V., Pawde, P., ve Shrivastava, R. (2012). Effect of marble powder with and without silica fume on mechanical properties of concrete. *Journal of Mechanical and Civil Engineering, 1* (1), 40-45.

Soliman, N. M. (2013). Effect of using marble powder in concrete mixes on the behavior and strength of RC slabs. *International Journal of Current Engineering and Technology, 3* (2013), 1863–1870.

Soroushian, P. ve Bayasi, Z. (2001). Fiber-type effects on the performance of steel fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal, 88* (2).

Soykan, F. ve Mutluer, M. (1996). Türkiye'de madencilik ve maden yataklarının coğrafi dağılışı. *Ege Üniversitesi, Edebiyat Fakültesi, Ege Coğrafya Dergisi, 8*, 37-57.

Soykan, O., Özel, C., ve Öcal C. (2015). Arduvaz ve Andezit'in Beton Agregası Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. *Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, Süleyman Demirel Üniversitesi, 19(1), 69-74.

Şahin, Y. (2000). *Kompozit malzemelere giriş*. Gazi Kitabevi, Ankara.

Şahmaran, M., Kasap Ö. ve Yaman İ. Ö. (2002). Tras ve uçucu kül katkılı çimentoların sülfat etkisindeki performansları. *Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 16* (2).

Şentürk, A., Gündüz, L., Tosun, Y. İ. ve Sarıışık, A. (1996). *Mermer Teknolojisi*. S.D.Ü. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Maden Mühendisliği Bölümü.

Şentürk, A., Gündüz, L., Tosun, Y.İ. ve Sarıışık, A. (1995). *Mermer Teknolojisi*. SDÜ Yayını, Isparta, 5-57.

Şimşek, S. (2019). Mermer Atıklarının Yapı Malzemesi Üretiminde Kullanım Olanakları Üzerine Bir Araştırma. Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, (ATT 589490).

Şirvancı, M. (1997). *Kalite için deney tasarımı: Taguchi yaklaşımı*. Literatür Yayıncılık.

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. (2019). Doğal Taşlar. https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Dogal-Taslar (Erişim tarihi: 2 Kasım 2024).

Taşlıgil, N. ve Şahin, G. (2016). Yapı malzemesi olarak kullanılan Türkiye doğal taşlarının iktisadi coğrafya odağında analizi. *Marmara Coğrafya Dergisi, 33,* 607-640.

Tek, M. (2022). Doğal Lif ve Uçucu Kül Kullanılarak Üretilen Köpük Betonların Mekanik Ve Bazı Durabilite Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi, Kastamonu Üniversitesi, Kastamonu, (ATT 714318).

Thakur, S. ve Singh, G. (2023). Optimization of mechanical properties of concrete with marble dust using Taguchi method. *Materials Today: Proceedings, 85,* 1732–1738.

Topçu, İ. B. ve Boğa, A. R. (2004). Prefabrik beton borularda çelik liflerin kullanımı. *Beton Prefabrikasyon Dergisi, 73,* 13-20.

Tunçel, M. U. (2018). Polipropilen Lif ve Kevlar Katkılı Yol Betonlarının Taguchı Yöntemiyle Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, (ATT 528378).

Türk Standardları Enstitüsü (TSE). (1992). TS 10513- *Çelik teller: Beton takviyesinde kullanılan*. Ankara: TSE.

Türk Standartları Enstitüsü. (2002). *TS EN 12350-2: Beton-Taze Beton Deneyleri - Bölüm 2: Çökme (Slump) Deneyi*. Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü. (2002). *TS EN 12504-2: Beton deneyleri - Bölüm 2: Sertleşmiş betonun basınç dayanımının tayini*. Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü. (2002). *TS EN 197-1: Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentolar - Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri*. Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü. (2002). *TS EN 934-2: Kimyasal Katkılar*. Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü. (2003). *TS EN 1008: Beton Karma Suyu-Numune Alma, Deneyler ve Beton Endüstrisindeki İşlemlerden Geri Kazanılan Su Dahil, Suyun Beton Karma Suyu Olarak Uygunluğunun Tayini Kuralları*. Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü. (2009). *TS 706 EN 12620+A1: Beton agregaları*. Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü. (2009). *TS 802: Beton Karışım Tasarımı Hesap Esasları*. Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü. (2010). *TS EN 12390-3: Sertleşmiş Beton Deneyleri - Deney Numunelerinde Basınç Dayanımı Tayini*. Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü. (2010). *TS EN 12390-6: Sertleşmiş Beton Deneyleri - Deney Numunelerinde Yarmada Çekme Dayanımı Tayini*. Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü. (2014). *TS EN 206-1: Beton - Bölüm 1: Özellik, Performans, İmalat ve Uygunluk*. Ankara.

Türk Standartları Enstitüsü. (2019). *TS EN 12350-7: Beton-Taze Beton Deneyleri - Bölüm 7: Hava İçeriğinin Tayini-Basınç Metotları*. Ankara.

Türk, K. ve Kına, C. (2017). Çimento esaslı kompozitlerde karma lif kullanımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23*(6), 671-678.

Uçar, G. (2022). İki Farklı Polipropilen Lifin Rijit Kaplamalarda Hibrit Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, (ATT 708102).

Uğur, İ. ve Gündüz, L. (1995). Mermer atıklarının değerlendirilebilirliği. *Türkiye I. Mermer Sempozyumu Kitabı*, 61–67.

URL-1 https://buldink.com/arduvaz-nedir/ (Erişim tarihi: 27.11.2024)

URL-2 https://bodrumdogalkayraktasi.com/kayrak-tasi-nedir/ (Erişim tarihi: 28.11.2024)

URL-3 https://iseldas.com/blog/16/cam-elyafi.html/ (Erişim tarihi: 29.11.2024)

URL-4 https://erlas.com.tr/fiberglass-endustriyel-urun-imalatı/ (Erişim tarihi: 30.11.2024)

URL-5 http://www.archprecast.org/documents/GFRC_handbook.pdf/ (Erişim tarihi: 01.12.2024)

URL-6 https://www.thbbakademi.org/surdurulebilir-insaat-yaklasimi-icin-yesil-beton/ (Erişim tarihi: 2.12.2024)

Ünal, O. (1994). Isıl İşlem Uygulamasının Lifli Beton Özelliklerine Etkisi. (Yayımlanmamış doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.

Vardhan, K., Goyal, S., Siddique, R., ve Singh, M. (2015). Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement. *Construction and Building Materials, 96,* 615–621.

Yamanel, K. (2015). Kayseri Yöresi Atık Mermer Tozu Katkılı Harçların Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri (ATT 387462).

Yazıcı, H. (1997). Accelerated Carbonation Test of Concrete. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir (ATT 77309).

Yazıcı, H. (2006). Yüksek fırın curufu katkılı harçların sülfat dayanıklılığının incelenmesi. Dokuz Eylül Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 8 (1), 51-58.

Yıldız A. H. (2008). Mermer toz atıklarının yol inşaatında değerlendirilmesi. Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta.

Yıldız, Ö. ve Eskikaya, Ş. (1995). Afyon Yöresi Toz Mermer Atıklarının Değerlendirilmesi. *Türkiye I. Mermer Sempozyumu Bildiriler Kitabı,* Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyonkarahisar, 45-52.

Yıldız, S., Bölükbaş Y. ve Keleştemur O. (2010). Cam Elyaf Katkısının Betonun Basınç ve Çekme Dayanımı Üzerindeki Etkisi. *Politeknik Dergisi, 13*(3), 239-243.

Yıldız, T. (2012). Atık Mermer Tozu ve Cam Elyaf Katkısının Birlikte Kullanımının Betonun Mekanik Özelliklerine Etkisi. Yüksek lisans tezi, Fırat Üniversitesi, Elazığ (ATT 08225102).

Zhou, Y., Liu, J. ve Wang, H. (2023). Mechanical and durability performance of glass fiber-reinforced concrete containing industrial waste. *Construction and Building Materials, 366.*

ÖZGEÇMİŞ

Elif HALAT KESGİN, ilköğretimini Gümüşhane, ortaokul ve lise eğitimini Trabzon'da tamamladı. 2008 yılında Gümüşhane Üniversitesi İnşaat mühendisliği bölümünü kazandı. 2012 yılında İnşaat Mühendisliği bölümünden dereceyle mezun oldu. 2010 yılında Harita Mühendisliği bölümünde çift anadal eğitimine başladı. 2013 yılında Harita Mühendisliğinden mezun oldu. 2015 yılında Kültür ve Turizm Bakanlığına Mühendis olarak atandı halen bu görevine devam etmektedir. 2022 yılından beri Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Ana bilim dalında yüksek lisans eğitimine devam etmektedir. Evlidir ve bir kız çocuğu bulunmaktadır.