T.C.

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

RADYASYON KALKANI ÖZELLİĞİNE SAHİP ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT KAPLAMA MALZEMESİ ÜRETİMİ

GÜLSÜM SAĞLAM ÇİTOĞLU

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

YOZGAT- 2021

T.C.

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DOKTORA TEZİ

RADYASYON KALKANI ÖZELLİĞİNE SAHİP ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT KAPLAMA MALZEMESİ ÜRETİMİ

GÜLSÜM SAĞLAM ÇİTOĞLU

Tez Danışmanı

Prof. Dr. Fuat KÖKSAL

Bu çalışma Yozgat Bozok Üniversitesi Araştırma Projeleri Birimi tarafından 6602c-MMF/20-374 kodu ile desteklenmiştir.

YOZGAT- 2021

TEZ BEYANI

Tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu tezin yazılmasında bilimsel ahlak kurallarına uyulduğunu, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezin içerdiği yenilik ve sonuçların başka bir yerden alınmadığını, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, tezin herhangi bir kısmının bu üniversite veya başka bir üniversitedeki başka bir tez çalışması olarak sunulmadığını beyan eder, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

GÜLSÜM SAĞLAM ÇİTOĞLU

15.09.2021

ÖZET

DOKTORA TEZİ

RADYASYON KALKANI ÖZELLİĞİNE SAHİP ÇİMENTO ESASLI KOMPOZİT KAPLAMA MALZEMESİ ÜRETİMİ

GÜLSÜM SAĞLAM ÇİTOĞLU

YOZGAT BOZOK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. FUAT KÖKSAL

Bu çalışmada farklı agregalar ile üretilen çimento esaslı kompozit malzemelerin kurşun madenine alternatif kaplama malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Elde edilen kaplama numuneleri, nükleer santrallerde, sığınaklarda, radyasyonla çalışılan laboratuvarların duvarlarında (X-, γ- ışını ve nötron laboratuvarı) hastanelerin radyoloji ve onkoloji servisi odalarının duvarlarında ve saldırı anında oluşabilecek olası radyasyon sızıntısından korunmak amacıyla zırh malzemesi olarak kullanılabilir. Bu amaçla barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit, limonit, silis dumanı ve vermikülit agrega olarak seçilmiş ve çimento bağlayıcı ile kaplama malzemeleri üretilmiştir. Çalışma deneme üretimi, kaplama numunelerinin üretimi, fiziksel ve mekanik kontrol deneyleri ve radyasyon geçirgenlik deneyleri olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Deneme üretimi aşamasında min. su ve min. boşluk düşünülerek karışım dizaynları yapılmış ve optimum W/C oranı tespit edilmiştir. Harç karışım kuralları dikkate alınarak harç içerisindeki agrega, çimento, su ve katkı maddesi miktarı hacimce ve ağırlıkça miktarları her bir kaplama numunesi için hesaplanarak asıl üretimlere geçilmiştir. Farklı basınçlarda tuğlaya şekil vermek amacıyla yapılan presleme yöntemi ile 22x11x5, 22x11x6, 23x12x5, 23x12x6 ve 25x25x12 cm boyutlarında kaplama harç numuneleri üretilmiştir. Üretilen kaplama numuneleri 28 gün boyunca standart küre tabi tutulduktan sonra fiziksel, mekanik, ısıl iletkenlik ve radyasyon deneylerinde kullanılmak üzere dış çapı 400 mm, diş kalınlığı 4 mm elmas soketli sulu yan kesme makinasında kesilmiştir. Belirli boyutlarda kesilerek hazırlanan kaplama numunelerine; fiziksel özellikler için birim ağırlık, su emme ve porozite, mekanik dayanımlarının belirlenmesi için basınç ve eğilme deneyleri yapılmıştır. Ayrıca kaplama numunelerinin ısı iletkenlik katsayısı (λ_h) değerleri tespit edilmiştir. Daha sonra üretilen kaplama numuneleri üzerinde 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 cm kalınlığa kadar belli enerjilerdeki nötron parçacıkları, X- ve γ -ışını için beton soğurganlıkları belirlenmiştir. X-ışını lineer zayıflatma katsayıları, X-ışını cihazının (ICM SiteX) 150 kiloVolt çalışma gerilimde ve 1 miliAmper hedef akımında yaydığı 150 keV enerjili X ışınları ve Geiger Müller (GM) tipi gazlı dedektörü bulunan doz ölçer ile ölçülmüştür. Gama ışını lineer zayıflatma katsayıları, Cs-137 radyoizotopunun yaydığı 662 keV enerjili gama ışınları ve NaI(Tl) sintilatör tipi detektör ile ölçülmüştür. Termal nötron lineer lineer zayıflatma katsayıları ise; Howitzer (Nuclear Chicago NH-3) içinde bulunan Pu-Be nötron kaynağı ($1.85x10^{11}$ Bq) kullanılarak örnekten geçen 0,025eV kinetik enerjili nötronlar He-3 nötron detektörü ile ölçümler yapılarak belirlenmiştir. Ayrıca harç içerisindeki agrega, çimento, su ve katkı maddesinin kimyasal bileşik konsantrasyon miktarları her bir harç örneği için

XCOM programına girilerek 150 keV ve 662 keV enerjiler için teorik kütle azaltma katsayıları belirlenmiş ve deneysel olarak bulunan lineer ve kütle azaltma katsayıları ile karşılaştırılmıştır. Üretilen kaplama numunelerinin fotonlar ve nötron için radyasyon demeti şiddetini onda bir ve yüzde bir değerine düşüren zırhlama malzemesine özgü kalınlığı (TVL ve 2TVL), yarı kalınlık değeri (HVL) ve 1 mm kurşun eş değerleri hesaplanmıştır. Sonuç olarak1 mm kurşun eş değeri en düşük, 150 keV X-ışını dozunu %11,4'e indirmek için %100 selestit agregası ve %10 silis dumanı ile üretilen G10 kodlu kaplama numunesinde 14,68 mmPb, 662 keV γ-ışını dozunu %88,9'e indirmek için ise %100 barit agregası ve %10 silis dumanı ile üretilen G9 kodlu numunede 5,00 mmPb olarak tespit edilmiştir. Ayrıca termal nötronlar için soğurganlık özelliği en iyi kolemanit agregası ile üretilen G3 kodlu numunelerde olduğu ifade edilmiştir.

2021, 337 SAYFA

ANAHTAR KELİMELER: Radyasyon tutuculuk, X-, γ- ışınları, Nötron parçacıkları, Kompozit malzeme

ABSTRACT

DOCTORATE THESIS

MANUFACTURING OF CEMENT BASED COMPOSITE COATING MATERIAL WITH RADIATION SHIELD FEATURE

GÜLSÜM SAĞLAM ÇİTOĞLU

YOZGAT BOZOK UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING

SUPERVISOR: PROF. DR. FUAT KÖKSAL

In this study, the usability of cement-based composite materials produced with different aggregates as an alternative coating material to lead mine was investigated. The obtained coating samples can be used as armor material in nuclear power plants, shelters, on the walls of laboratories working with radiation (X-, γ-ray and neutron laboratories), on the walls of radiology and oncology service rooms of hospitals, and to protect against possible radiation leakage that may occur during an attack. For this purpose, barite, celestite, colemanite, magnetite, hematite, limonite, silica fume and vermiculite were selected as aggregates and cement binder and coating materials were produced. The study was carried out in three stages: trial production, production of coating samples, physical and mechanical control experiments and radiation permeability experiments. At the trial production stage, min. water and min. Mixing designs were made considering the space and optimum W/C ratio was determined. Considering the mortar mixing rules, the amount of aggregate, cement, water and additives in the mortar, by volume and weight, were calculated for each coating sample and the actual production was started. Coating mortar samples of 22x11x5, 22x11x6, 23x12x5, 23x12x6 and 25x25x12 cm were produced by pressing method used to shape the brick at different pressures. After the produced coating samples were subjected to standard curing for 28 days, they were cut in a wet side cutting machine with a diamond socket with an outer diameter of 400 mm and a tooth thickness of 4 mm to be used in physical, mechanical, thermal conductivity and radiation experiments. For coating samples prepared by cutting into certain sizes ; unit weight, water absorption and porosity tests for physical properties, pressure and bending tests were carried out to determine the mechanical strengths. In addition, the thermal conductivity coefficient (λh) values of the coating samples were determined. Then, neutron particles at certain energies up to 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 cm thickness, concrete absorbances for X- and γ-ray were determined on the coating samples produced. X-ray linear attenuation coefficients were measured with X-rays with an energy of 150 keV and a Geiger Müller (GM) type gas detector with a dose meter at 150 kiloVolt operating voltage and 1 milliAmper target current. Gamma ray linear attenuation coefficients were measured with 662 keV energy gamma rays emitted by Cs-137 radioisotope and a NaI(Tl) scintillator type detector. The thermal neutron linear linear attenuation coefficients are; Using the Pu-Be neutron source (1.85x1011 Bq) in Howitzer (Nuclear Chicago NH-3), neutrons with 0.025eV kinetic energy passing through the sample were determined by making measurements with the He-3 neutron detector. In addition, the chemical compound

concentration amounts of aggregate, cement, water and additive in the mortar were entered into the XCOM program for each mortar sample, and the theoretical mass reduction coefficients were determined for 150 keV and 662 keV energies and compared with the experimentally found linear and mass reduction coefficients. The shielding material-specific thickness (TVL and 2TVL), half-thickness value (HVL), and 1 mm lead equivalents of the produced coating samples were calculated for photons and neutrons, which reduced the radiation beam intensity to one tenth and one percent. As a result, in the G10 coded coating sample produced with 100% celestite aggregate and 10% silica fume in order to reduce the X-ray dose of 150 keV to 11.4%, with the lowest 1 mm lead equivalent, 14.68 mmPb, 662 keV γ-ray dose was reduced by %. In order to reduce it to 88.9, it was determined as 5.00 mmPb in the G9 coded sample produced with 100% barite aggregate and 10% silica fume. In addition, it was stated that the best absorbency for thermal neutrons was in the G3 coded samples produced with colemanite aggregate.

2021, 337 PAGES

KEYWORDS: Radiation retention, X-, γ- rays, Neutron particles, Composite material

ÖNSÖZ

Yavuz, Alp ve Ata'ma.

Sevgilerimle.

Bu tez çalışması;
Yozgat Bozok Üniversitesi Araştırma Projeleri Birimi tarafından 6602c-MMF/20-374 nolu proje ile desteklenmiştir.

GÜLSÜM SAĞLAM ÇİTOĞLU

15.09.2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET ..... **iv**

ABSTRACT ..... **vi**

ÖNSÖZ ..... **viii**

İÇİNDEKİLER ..... **ix**

ÇİZELGELER LİSTESİ ..... **xiii**

ŞEKİLLER LİSTESİ ..... **xiv**

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ ..... **xix**

1. GİRİŞ **1**

2. KURAMSAL TEMELLER **12**

2.1. Radyasyon 12

2.2. Radyoaktivite ve Radyoaktif Bozunma 13

2.2.1. Alfa Bozunması 15

2.2.2. Beta Bozunması 17

2.2.3. Gama Bozunması 19

2.2.4. Nötron Bozunması 21

2.3. Radyasyon Kaynakları 23

2.3.1. Doğal Radyasyon Kaynakları 23

2.3.2. Yapay Radyasyon Kaynakları 25

2.4. Radyasyondan Korunma 28

2.4.1. Mesafe Kuralı 29

2.4.2. Zaman Kuralı 29

2.4.3. Zırhlama Kuralı 29

2.4.3.1. Beton 31

2.4.3.2. Kurşun Levha 32

2.4.3.3. Camlar 32

2.5. Zırhlama çin Kullanılan Cevherler 33
2.5.1. X- ve γ- Işınlarının Zırhlanması için Cevherler 33
2.5.1.1. Barit 33
2.5.1.2. Selestit 33
2.5.1.3. Manyetit 35
2.5.1.4. Hematit 35
2.5.1.5. Limonit 36
2.5.1.6. Silis dumanı: 37
2.5.2. Nötron parçacıklarının zırhlanması için cevherler 38
2.5.2.1. Kolemanit 38
2.5.2.2. Vermikülit 39
3. MATERYAL ve YÖNTEM 41
3.1. Zırhlama kaplama malzemesi ve dizaynı 43
3.1.1. Çimento 43
3.1.2. Agrega 43
3.1.2.1. Barit (B) 43
3.1.2.2. Selestit (S) 44
3.1.2.3. Kolemanit (K) 44
3.1.2.4. Manyetit (M) 45
3.1.2.5. Hematit (H) 45
3.1.2.6. Limonit (L) 46
3.1.2.7. Silis dumanı (SD) 46
3.1.2.8. Vermikülit (V) 47
3.1.3. Agrega deneyleri 47
3.1.4. Katkı maddesi 51
3.1.5. Karışım suyu 52
3.1.6. Deneme üretimi 52

3.1.6.1. Kaplama numunelerinin üretimi 65
3.1.6.2. Kaplama numunelerinin kesilmesi 75
3.1.6.3. Fiziksel deneyler 78
3.1.6.4. Isıl iletkenlik deneyleri 80
3.1.6.5. Mekanik deneyler 81
3.1.6.5.1. Eğilme ve basınç dayanımı deneyi 81
3.1.7. Analiz yöntemleri 83
3.1.7.1. XRD (X-ışını difraktometresi) 83
3.1.7.2. SEM (taramalı elektron mikroskobu) analizi 84
3.1.7.3. XRF (X-ışını floresansı) analizi 87
3.2. Radyasyon kaynağı ve radyasyon uygulamaları 88
3.2.1. Deneysel radyasyon çalışmaları 88
3.2.1.1. X-ışını radyasyon tutuculuk hesapları 89
3.2.1.2. Gama ışını radyasyon tutuculuk hesapları 92
3.2.1.3. Nötron Radyasyon Tutuculuk Hesapları 94
3.2.2. Teorik Radyasyon Çalışmaları 96
4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA 100
4.1. Fiziksel Özellikler 100
4.1.1. Porozite 101
4.1.2. Su Emme 105
4.1.3. Kuru Birim Hacim Ağırlık 109
4.1.4. Isıl İletkenlik 112
4.2. Mekanik Özellikler 119
4.2.1. Eğilme Dayanımı 120
4.2.2. Basınç Dayanımı 124
4.3. Numunelerin XRD, XRF ve SEM Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi 130
4.4. Radyasyon Geçirgenlik Özellikleri 134

4.4.1. X-Işını Tutuculuk 134
4.4.2. Gama-Işını Tutuculuk 174
4.4.3. Nötron Tutuculuk 213
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 235
5.1. Fiziksel ve Mekanik Özellikleri 236
5.2. 150 Kev X-Işını Tutuculuk 237
5.3. 662 Kev γ-Işını Tutuculuk 238
5.4. Termal Nötron Tutuculuk 239
KAYNAKLAR 241
EKLER 250
EK-1. Üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numuneleri 250
EK-2. Kesim işlemi yapılan çimento esaslı kompozit kaplama numuneleri 255
EK-3. Üretilen kompozit kaplama numunelerine ait analiz sonuçları 266
EK-4. Deneysel çalışmada kullanılan malzemelere ait XRD deney sonuçları 299
EK-5. Numunelerin teorik radyasyon hesaplarında kullanılan kimyasal bileşenleri 303
EK-6. İTÜ Enerji Enstitüsü radyasyon deney sonuç raporları 306
ÖZGEÇMİŞ ..... Error! Bookmark not defined.

ÇİZELGELER LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 3.1. CEM I 42.5 R Portland çimentosunun özellikleri 43
Çizelge 3.2. Barit cevherinin özellikleri 44
Çizelge 3.3. Selestit cevherinin özellikleri 44
Çizelge 3.4. Kolemanitin özellikleri 45
Çizelge 3.5. Manyetit cevherinin özellikleri 45
Çizelge 3.6. Hematit cevherinin özellikleri 46
Çizelge 3.7. Limonit cevherinin özellikleri 46
Çizelge 3.8. Silis dumanının özellikleri 47
Çizelge 3.9. Vermikülitin özellikleri 47
Çizelge 3.10. Agregaların fiziksel özellik deney sonuçları 51
Çizelge 3.11. Sika Viscocrete PC 61 katkı maddesinin özellikleri 51
Çizelge 3.12. Bartın 1. Organize Sanayi Bölgesi (OSB) suyunun özellikleri 52
Çizelge 3.13. Karışım bileşenlerin kullanım yüzdeleri ve karışım parametreleri 54
Çizelge 3.14. Karışım bileşenlerin teorik miktarları 56
Çizelge 3.15. Karışım bileşenlerin gerçek miktarları 58
Çizelge 3.16. Üretilen kaplama numunelerinin sıkıştırma basınç değerleri 68
Çizelge 3.17. Kaplama numune kesim hesabı 75
Çizelge 4.1. Numunelerin fiziksel özellikleri 100
Çizelge 4.2. Numunelerin ısıl iletkenlik özellikleri 112
Çizelge 4.3. Numunelerin mekanik özellikleri 119
Çizelge 4.4. 150 keV X-ışını için deneysel ve teorik zayıflatma katsayıları ile kurşun eşdeğerleri 135
Çizelge 4.5. 662 keV γ-ışını için deneysel ve teorik zayıflatma katsayıları ile kurşun eşdeğerleri 175
Çizelge 4.6. Termal nötronlar için deneysel zayıflatma katsayı, HVL, 2TVL ve 5TVL kalınlık değeri 214

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. Alfa parçacığının yayımlanması 16
Şekil 2.2. Beta (-) bozunumu 18
Şekil 2.3. Beta (+) bozunumu 18
Şekil 2.4. Gama bozunumu 20
Şekil 2.5. Maruz kalınan radyasyon kaynakları 23
Şekil 2.6. Dünya genelinde doğal radyasyon kaynaklarından alınan ortalama yıllık dozlar ve oransal değerleri 25
Şekil 2.7. Giriciliklerine göre iyonlaştırıcı radyasyonlar 30
Şekil 2.8. Farklı radyasyon tiplerinin giricilik gücü 31
Şekil 2.9. Barit cevheri 33
Şekil 2.10. Selestit cevheri 34
Şekil 2.11. Manyetit cevheri 35
Şekil 2.12. Hematit Cevheri 36
Şekil 2.13. Limonit cevheri 37
Şekil 2.14. Silis dumanı 38
Şekil 2.15. Kolemanit Cevheri 39
Şekil 2.16. Vermikülitin genleşmemiş hali, (b) genleşmiş hali, (c) parça hali 40
Şekil 3.1. Deneysel çalışma akış şeması 42
Şekil 3.2. B, S, K, M, H, L, SD ve V agrega tipi (öğütme işlemi öncesi) 48
Şekil 3.3. B, S, K, M, H, L, SD ve V agrega tipi (öğütme işlemi sonrası) 49
Şekil 3.4. Agrega fiziksel deneyler 50
Şekil 3.5. 1. grup harç numuneleri yayılma tablası deneyi 60
Şekil 3.6. 2. grup harç numuneleri yayılma tablası deneyi 61
Şekil 3.7. 3. grup harç numuneleri yayılma tablası deneyi 62
Şekil 3.8. 4. grup harç numuneleri yayılma tablası deneyi 63
Şekil 3.9. 5. grup harç numuneleri yayılma tablası deneyi 64
Şekil 3.10. 6. grup harç numuneleri yayılma tablası deneyi 65
Şekil 3.11. 7. grup harç numuneleri yayılma tablası deneyi 65
Şekil 3.12. Kaplama numunelerinin üretilmesi 69
Şekil 3.13. Kaplama numunelerinin üretilmesi 70
Şekil 3.14. Kaplama numunelerinin üretilmesi 71

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.15. Kaplama numunelerinin üretilmesi 72
Şekil 3.16. Kaplama numunelerinin üretilmesi 72
Şekil 3.17. Kaplama numunelerinin üretilmesi 73
Şekil 3.18. Kaplama numunelerine kür uygulanması 74
Şekil 3.19. Kaplama numunelerine kür uygulanması 74
Şekil 3.20. Kaplama numunelerinin kesilmesi 76
Şekil 3.21. Kaplama numunelerinin kesilmesi 77
Şekil 3.22. Kaplama numunelerinin kesilmesi 78
Şekil 3.23. Kaplama numunelerine ait fiziksel deneyler 79
Şekil 3.24. Kaplama numunelerine ait fiziksel deneyler 80
Şekil 3.25. Kaplama numunelerine ait ısıl iletkenlik deneyi 81
Şekil 3.26. Eğilme dayanımı deneyi 82
Şekil 3.27. Basınç dayanımı deneyi 82
Şekil 3.28. XRD analizi deney cihazı 83
Şekil 3.29. XRD analizi kaplama numuneleri 84
Şekil 3.30. SEM analizi deney cihazı 85
Şekil 3.31. SEM analizi kaplama numuneleri 86
Şekil 3.32. XRF analizi deney cihazı 87
Şekil 3.33. XRF analizi kaplama numuneleri 88
Şekil 3.34. X-ışını ölçüm sistemi 89
Şekil 3.35. X-ışını deney düzeneği 90
Şekil 3.36. X-ışını deney düzeneği 90
Şekil 3.37. Gama-ışını ölçüm sistemi 92
Şekil 3.38. γ -ışını deney düzeneği 92
Şekil 3.39. γ -ışını deney düzeneği 93
Şekil 3.40. Nötron ölçüm sistemi 94
Şekil 3.41. Nötron deney düzeneği 95
Şekil 3.42. G1 kaplama numunesinin XCOM programına tanıtılması 97
Şekil 3.43. G1 kaplama numunesi bileşiklerinin XCOM programına girilmesi, foton enerjilerinin 0,150-0,662 MeV olarak yazılması 98
Şekil 3.44. G1 kaplama numunesi foton enerji kütle zayıflatma katsayı ilişkisi 98

Şekil **Sayfa**

Şekil 3.45. G1 kaplama numunesi 150-662 keV total attenuation with coherent scattering (cm^2/g) değerleri 99
Şekil 4.1. Numunelerin porozite değerleri 103
Şekil 4.2. Numunelerin porozite sıralı değerleri 104
Şekil 4.3. Numunelerin su emme değerleri 107
Şekil 4.4. Numunelerin su emme sıralı değerleri 108
Şekil 4.5. Numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerleri 110
Şekil 4.6. Numunelerin kuru birim hacim ağırlık sıralı değerleri 111
Şekil 4.7. Numunelerin ısıl iletkenlik değerleri 116
Şekil 4.8. Numunelerin ısıl iletkenlik sıralı değerleri 117
Şekil 4.9. Numunelerin ısıl iletkenlik yoğunluk ilişkisi 118
Şekil 4.10. Numunelerin eğilme dayanımı değerleri 122
Şekil 4.11. Numunelerin eğilme dayanımı sıralı değerleri 123
Şekil 4.12. Numunelerin basınç dayanımı değerleri 127
Şekil 4.13. Numunelerin basınç dayanımı sıralı değerleri 128
Şekil 4.14. Numunelerin basınç dayanımı yoğunluk ilişkisi 129
Şekil 4.15. G9 numunesi XRD analizi 131
Şekil 4.16. G9 numunesi SEM görüntüsü 131
Şekil 4.17. G3 numunesi XRD analizi 132
Şekil 4.18. G3 numunesi SEM görüntüsü 133
Şekil 4.19. Numunelerin 150 keV X-ışını teorik kütle zayıflatma katsayısı değerleri 139
Şekil 4.20. Numunelerin 150 keV X-ışını teorik kütle zayıflatma katsayısı sıralı değerleri 140
Şekil 4.21. Numunelerin 150 keV X-ışını teorik lineer zayıflatma katsayısı değerleri 144
Şekil 4.22. Numunelerin 150 keV X-ışını teorik lineer zayıflatma katsayısı sıralı değerleri 145
Şekil 4.23. Numunelerin 150 keV X-ışını deneysel kütle zayıflatma katsayısı değerleri . 149
Şekil 4.24. Numunelerin 150 keV X-ışını deneysel kütle zayıflatma katsayısı sıralı değerleri 150
Şekil 4.25. Numunelerin 150 keV X-ışını deneysel ve teorik kütle zayıflatma katsayı farkı 151
Şekil 4.26. Numunelerin 150 keV X-ışını deneysel lineer zayıflatma katsayısı değerleri 156

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.27. Numunelerin 150 keV X-ışını deneysel lineer zayıflatma katsayısı sıralı değerleri 157
Şekil 4.28. Numunelerin 150 keV X-ışını deneysel ve teorik lineer zayıflatma katsayı farkı 158
Şekil 4.29. Numunelerin 150 keV X-ışını yarı kalınlık değeri (HVL) 161
Şekil 4.30. Numunelerin 150 keV X-ışını yarı kalınlık sıralı değeri (HVL) 162
Şekil 4.31. Numunelerin 150 keV X-ışını Dozu %1 e indirmek için gerekli kalınlık (2TVL) değeri 165
Şekil 4.32. Numunelerin 150 keV X-ışını Dozu %1 e indirmek için gerekli kalınlık (2TVL) sıralı değeri 166
Şekil 4.33. Numunelerin 150 keV X-ışını 1 mm kurşun eş değeri (Dozu %11.4'e indirmek için gerekli kalınlık) 170
Şekil 4.34. Numunelerin 150 keV X-ışını sıralı 1 mm kurşun eş değeri (Dozu %11.4'e indirmek için gerekli kalınlık) 171
Şekil 4.35. Numunelerin 150 keV X-ışını 1 mm kurşun eş değer kalınlığı-yoğunluk ilişkisi 172
Şekil 4.36. Numunelerin 150 keV X-ışını 1 mm kurşun eş değer kalınlığı-porozite ilişkisi 173
Şekil 4.37. Numunelerin 662 keV γ-ışını teorik kütle zayıflatma katsayısı değerleri 179
Şekil 4.38. Numunelerin 662 keV γ-ışını teorik kütle zayıflatma katsayısı sıralı değerleri 180
Şekil 4.39. Numunelerin 662 keV γ-ışını teorik lineer zayıflatma katsayısı değerleri 183
Şekil 4.40. Numunelerin 662 keV γ-ışını teorik lineer zayıflatma katsayısı sıralı değerleri 184
Şekil 4.41. Numunelerin 662 keV γ-ışını deneysel kütle zayıflatma katsayısı değerleri .. 188
Şekil 4.42. Numunelerin 662 keV γ-ışını deneysel kütle zayıflatma katsayısı sıralı değerleri 190
Şekil 4.43. Numunelerin 662 keV γ-ışını deneysel ve teorik kütle zayıflatma katsayı farkı 191
Şekil 4.44. Numunelerin 662 keV γ-ışını deneysel lineer zayıflatma katsayısı değerleri . 195
Şekil 4.45. Numunelerin 662 keV γ-ışını deneysel lineer zayıflatma katsayısı sıralı değerleri 196

Şekil **Sayfa**

Şekil 4.46. Numunelerin 662 keV γ-ışını deneysel ve teorik lineer zayıflatma katsayı farkı 197
Şekil 4.47. Numunelerin 662 keV γ-ışını yarın kalınlık değeri (HVL) 200
Şekil 4.48. Numunelerin 662 keV γ-ışını yarı kalınlık sıralı değeri (HVL) 201
Şekil 4.49. Numunelerin 662 keV γ-ışını Dozu %1 e indirmek için gerekli 2TVL kalınlık değeri 204
Şekil 4.50. Numunelerin 662 keV γ-ışını Dozu %1 e indirmek için gerekli 2TVL kalınlık sıralı değeri 205
Şekil 4.51. Numunelerin 662 keV γ-ışını 1 mm kurşun eş değeri (dozu %88,9'a indirmek için gerekli kalınlık) 209
Şekil 4.52. Numunelerin 662 keV γ-ışını sıralı 1 mm kurşun eş değeri (dozu %88,9'a indirmek için gerekli kalınlık) 210
Şekil 4.53. Numunelerin 662 keV γ-ışını 1 mm kurşun eşdeğer kalınlığı-yoğunluk ilişkisi 211
Şekil 4.54. Numunelerin 662 keV γ-ışını 1 mm kurşun eşdeğer kalınlığı-porozite ilişkisi 212
Şekil 4.55. Numunelerin termal nötron deneysel kütle zayıflatma katsayısı değerleri 217
Şekil 4.56. Numunelerin termal nötron deneysel kütle zayıflatma katsayısı sıralı değerleri 218
Şekil 4.57. Numunelerin termal nötron deneysel lineer zayıflatma katsayısı değerleri 221
Şekil 4.58. Numunelerin termal nötron deneysel lineer zayıflatma katsayısı sıralı değerleri 222
Şekil 4.59. Numunelerin termal nötron yarı kalınlık değeri (HVL) 225
Şekil 4.60. Numunelerin termal nötron yarı kalınlık sıralı değeri (HVL) 226
Şekil 4.61. Numunelerin termal nötron dozu onda bire indirmek için gerekli kalınlık değeri (TVL) 229
Şekil 4.62. Numunelerin termal nötron dozu onda bire indirmek için gerekli kalınlık (TVL) sıralı değeri 230
Şekil 4.63. Numunelerin termal nötron dozu %1'e indirmek için gerekli kalınlık değeri (2TVL) 233
Şekil 4.64. Numunelerin termal nötron dozu %1'e indirmek için gerekli kalınlık (2TVL) sıralı değeri 234

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

A	Atom ağırlığı
A	Al_2O_3 (Alümin)
akb	Atomik kütle birimi
α	Parçacık radyasyon türü (Alfa)
B	Barit
BHA	Birim hacim ağırlık
β	Parçacık radyasyon türü (Beta)
β-	Negatron
β+	Pozitron
cm	Santi metre
C	CaO (kireç)
C	Coloumb
C_2S	Dikalsiyum Silikat, 2CaOSiO2
C_3S	C3S Trikalsiyum Silikat, 3CaOSiO2
C_3A	Trikalsiyum Alimunat, 3CaOAl2O3
C_4AF	Tetrakalsiyum aluminoferrit,4CaOAl2O3Fe2O3
d	Dakika
dm^3	Desimetreküp
e	Elektron
eV	Elektronvolt
E	Enerji
F	Kuvvet
Fe_2O_3	Demir
g	Gün
g	Gram
GeV	Giga elektronvolt
GV	Giga volt
Gy	Gray
G1	Agrega kısmı %100 Barit
G2	Agrega kısmı %100 Selestit
G3	Agrega kısmı %100 Kolemanit
G4	Agrega kısmı %100 Manyetit
G5	Agrega kısmı %100 Hematit
G6	Agrega kısmı %100 Limonit
G7	Agrega kısmı %100 Silis dumanı
G8	Agrega kısmı %100 Vermikülit

G9	Agrega kısmı %100 Barit, mineral katkı %10 Silis dumanı
G10	Agrega kısmı %100 Selestit, mineral katkı %10 Silis dumanı
G11	Agrega kısmı %100 Kolemanit, mineral katkı %10 Silis dumanı
G12	Agrega kısmı %100 Manyetit, mineral katkı %10 Silis dumanı
G13	Agrega kısmı %100 Hematit, mineral katkı %10 Silis dumanı
G14	Agrega kısmı %100 Limonit, mineral katkı %10 Silis dumanı
G15	Agrega kısmı %50 Barit, %50 Selestit
G16	Agrega kısmı %50 Barit, %50 Kolemanit
G17	Agrega kısmı %50 Barit, %50 Manyetit
G18	Agrega kısmı %50 Barit, %50 Hematit
G19	Agrega kısmı %50 Barit, %50 Limonit
G20	Agrega kısmı %66 Barit, %34 Selestit, mineral katkı %10 Silis dumanı
G21	Agrega kısmı %66 Barit, %34 Kolemanit, mineral katkı %10 Silis dumanı
G22	Agrega kısmı %66 Barit, %34 Manyetit, mineral katkı %10 Silis dumanı
G23	Agrega kısmı %66 Barit, %34 Hematit, mineral katkı %10 Silis dumanı
G24	Agrega kısmı %66 Barit, %34 Limonit, mineral katkı %10 Silis dumanı
G25	Agrega kısmı %34 Barit, %33 Selestit, %33 Kolemanit
G26	Agrega kısmı %25 Barit, %25 Selestit, %25 Kolemanit, %25 Manyetit
G27	Agrega kısmı %20 Barit, %20 Selestit, %20 Kolemanit, %20 Manyetit, %20 Hematit
G28	Agrega kısmı %17 Barit, %16,5 Selestit, %16,5 Kolemanit, %16,5 Manyetit, %16,5 Hematit, %16,5 Limonit
G29	Agrega kısmı %51 Barit, %33 Selestit, %16 Kolemanit
G30	Agrega kısmı %51 Barit, %16 Selestit, %33 Kolemanit
G31	Agrega kısmı %56 Barit, %28 Selestit, %16 Kolemanit
G32	Agrega kısmı %56 Barit, %16 Selestit, %28 Kolemanit
G33	Agrega kısmı %100 Vermikülit
H	Hematit
H	Toplam hava miktarı
I	Radyasyon şiddeti
I_0	Başlangıçtaki radyasyon şiddeti
kg	Kilo gram
K	Kolemanit
K-40	Potasyum radyoizotopu
keV	Kilo elektonvolt

M	Manyetit
MeV	Mega elektonvolt
mSv	Mili Sievert
mm	Mili metre
MPa	Mega Pascal
MV	Mega volt
L	Limonit
n	Nötron
N	Çekirdekteki nötron sayısı
N_0	Başlangıçtaki çekirdek sayısı
p	Proton
P	Çekirdekteki proton sayısı
R	Röntgen
S	Selestit
S	Silis SiO_2
s	Saniye
SD	Silis dumanı
Sv	Sweart
t	Zaman sabiti
Th-232	Toryum radyoizotopu
U-238	Uranyum radyoizotopu
ν	Nötrino
V	Vermikülit
Z	Atom numarası
X	Foton radyasyon türü
W	Su hacmi
W_c	Çimento kütlesi
W_n	Agrega kütlesi
W_{sa}	Süper akışkanlaştırıcı kütlesi
γ_c	Çimento özgül ağırlığı
γ_c	Agrega özgül ağırlığı
λ	Bir radyoaktif elementin birim zamandaki bozunma katsayısı
γ	Foton radyasyon türü (Gama)
γsa	Katkı maddesi özgül ağırlığı
θ	Açı
χ	Çift oluşumun
σ	Compton soğurma katsayısı

Kısaltmalar

ASTM	Beton ve Çimento için Uluslararası standartlar
BNCT	Boron nötron yakalama terapisi
CEM I	Uluslararası 1 nolu çimento türü
DSP	Dijital sinyal işlemi
DUAGG	Aktifliği bitmiş UO2 agregası (Depleted UO_2 Aggregate)
DUCRETE	Aktifliği bitmiş $_{UO2'li}$ beton (Depleted UO_2 Concrete)
EDXRF	Enerji ayrımlı X-şını Flöresans Spektrometresi
LINAC	Hızlandırıcı (Linear Accelerator)
MCA	Çok kanallı analizör
MCNP	Monte Carlo simulasyon programı
PÇ	Portland çimento
WDXRF	Dalga boyu ayrımlı X-şını Flöresans Spektrometresi
XRF	X-ışını Floresans
TS	Türk standartları
SI	Uluslararası birim standartları (Standart International)

1. GİRİŞ

19. yüzyıl sonları ve 20. yüzyıl başlarında fizik alanında gerçekleşen önemli keşiflerden birisi de iyonlaştırıcı radyasyondur. Bu konuda yapılan çalışmalar ve keşifler, 8 Kasım 1895'te Almanya'da, Wilhelm Conrad Röntgen tarafından yapılan deneyler sonucunda X-ışınlarının bulunmasıyla başlamıştır. X-ışınlarıyla birlikte iyonlaştırıcı radyasyonun kimyasal etkilerini de ortaya çıkaran W. Röntgen bu çalışmalarıyla 1901'de, Nobel fizik ödülünü kazanmıştır. Bu araştırmada ayrıca, fotoğraf klişesindeki gümüş tozuna görünür ışık veya X ışınları gönderildiğinde benzer kimyasal etkilerin görüldüğü ortaya çıkmıştır (A.Mozumder, 1999, s. 1). Röntgen, X ışınlarının kâğıt, tahta, alüminyum, folyo gibi hafif katı maddelerden giricilik (penetrasyon) ve emilme (absorbe) özelliğinin; aynı kalınlıktaki camın içeriğindeki kurşun miktarına göre farklılaştığını ortaya koymuştur. Bunun yanında X ışınları manyetik alandan etkilenmemektedir (Turner, 2007, s. 3).

Bu araştırmayı müteakip bu alandaki çalışmalar hızlanmış, 1896'da Becquerel uranyumun ve 1898'de de Curie'ler polonyum ve radyumun radyoaktif elementler olduğunu keşfetmişlerdir (A.Mozumder, 1999, s. 1). 1899'da Rutherford uranyumun, alfa ve beta olarak adlandırdığı iki tür radyasyon yaydığını bulmuştur. 1900'de Willard, radyumdan yayılan gama ışınlarını keşfetmiştir (Turner, 2007, s. 4).

Röntgen'in X-ışınlarını keşfetmesi ile spektroskopide açılan çığır, J.J Thomson ve arkadaşlarının elektronların bağımsız varlıklarını ispat etmesiyle devam etmiştir. 1900'de Max Planck enerji kuantumu kavramını ortaya koymuştur. Devam eden yoğun çalışmalarla 1903'te Rutherford, 1905'te de Von Schweidler radyoaktif parçalanmayı keşfetmişlerdir. Bu aşamada Albert Einstein 1905'te özel görelilik kuramını ortaya koymuştur. 1919'da Rutherford'un nitrojen atomu çekirdeklerini alfa parçacıkları ile bombardıman etmesi sonucunda hidrojen atomu çekirdeklerinin yayıldığını gözlemlemesiyle proton keşfedilmiştir. 1932'de James Chadwick nötronu keşfetmiş ve böylelikle atom ve çekirdeği bugünkü modeliyle tarif edilmiştir (Bayvas, 1989, s. 2).

1907 ila 1919 yılları arasında Cameron, Ramsay, Usher, Wourtzel ve Lind tarafından radon gazıyla ilgili çok sayıda araştırma yapılmıştır. 1917'de Kailan beta ve gama ışınlarının organik moleküller üzerindeki etkilerini incelemiş; Lind, gazlar üzerinde ve 1920'lerin ortalarında radonun alfa ışınları yayması üzerinde çalışmalar yapmıştır. 2. Dünya Savaşı süresince bir yandan radyasyonun su ve sulu çözeltilerdeki etkilerine araştıran birçok araştırma yapılırken bir yandan da nükleer reaktörlerde bulunan materyaller üzerinde

araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalar sonucunda radyasyonun biyolojik etkileri ortaya çıkarılmıştır (A.Mozumder, 1999, s. 2).

Yukarıda belirtilen çalışmalar sonucunda elde edilen bilgiler neticesinde radyoaktivitenin atom çekirdeklerin kararsızlığından ileri geldiği anlaşılmış ve kararsız çekirdeklerin kararlı hale geçerken yaptıkları ışımalar nükleer radyasyon olarak tanımlanmıştır. Bu radyasyonun insan sağlığına son derece zararlı etkileri ortaya çıkarılmıştır. Günümüzde kozmik ışınlar ve yerkabuğundaki radyoaktif elementler gibi doğal radyasyonun yanı sıra dijital medya araçlarının yaydığı elektromanyetik radyasyonlar, nükleer silah denemeleri yoluyla ortaya çıkan serpintiler, nükleer reaktörlerin atıkları, hastanelerde teşhis ve tedavi amacıyla kullanılan radyasyonlar yoluyla insanlar yüksek dozda yapay radyasyona maruz kalabilmektedir. Bu bağlamda doğal ve yapay radyasyondan korunmanın gerekliliği ortaya çıkmıştır. Genel olarak radyasyondan korunmada en önemli üç faktör zaman, mesafe ve zırhlamadır. Zaman faktöründe radyasyon kaynağının yakınında ya da yanında olabildiğince az zaman geçirmek gereklidir. Mesafe yani radyasyon kaynağına olan yakınlığınız olabildiğince en uzak mesafe olmalıdır. Nükleer gibi dış radyasyondan korunma da en etkin yöntem ise maddesel ortamla korunma yani zırhlama olarak karşımıza çıkmaktadır. Zırhlama radyasyon yayan kaynak ile radyasyona maruz kalan kişi arasına radyasyon tutucu özellikte bir engel konulması olarak tanımlanabilir. Zırhlama çelik, kurşun gibi koruyuculuğu yüksek metaller ya da özel beton gibi malzemeler kullanılarak olası radyasyon etkilerinden kaçınılabilir.

Nükleer enerjinin kullanılmaya başlanmasıyla beraber nükleer reaktörlerde, nükleer savaş tehlikesine karşı sığınıklarda, hastanelerin radyasyon onkolojisi ve radyoloji bölümlerinde, radyoaktif kaynakların bulunduğu ortamlarda ve radyoaktif atıkların saklanmasında ağır betonlar radyasyon zırhlama için kullanılmaktadır (Demir, 2009, s. 1).

Radyasyon zırhlama malzemesi olarak kullanılan en etkili iki yöntem kurşun plaklar ve betondur. Kurşun plakların pahalı, şekil verebilme kabiliyetlerinin kısıtlı olması, malzeme bakımın konusundaki zorluklar nedeniyle beton günümüzde daha çok tercih edilmektedir. Beton; çimento, su, agrega (iri ve ince), kimyasal ve mineral katkı maddelerinin uygun ve belirli oranlarda homojen bir şekilde karıştırılmasıyla oluşmaktadır. Oluşan taze karışım önce plastik kıvamdadır ve istenilen şekil verilebilir. Belirli bir süre sonra bağlayıcı madde olan çimento agrega tanelerini birbirlerine bağladığı için priz almaya başlar ve beton zamanla sertleşir. Sonuç olarak sertleşmiş beton zaman içinde hedef dayanımına ulaşır (Coşkun, 2010, s. 2-3).

Radyasyon zırhlamada betonun istenen geçirimsizliği sağlayabilmesi için beton kalınlığının çok büyük olması gerekmekte bu da yapı elemanını kullanım amacından saptırabilmekte aynı zamanda yüksek maliyet oluşturmaktadır. Bu yüzden daha az kalınlıkla radyasyon soğurmayı sağlayacak "ağır beton" kavramı ortaya çıkmıştır. Ağır betonların normal betonlardan farkı birim hacim ağırlıklarının daha fazla olmasıdır. Bunun için betonda kullanılan agreganın birim ağırlığı daha fazla olmalıdır. Günümüzde ağır agrega olarak manyetit, barit, limonit, ferrofosfor ve çelik parçaları sıklıkla tercih edilmektedir (Bakırhan, 2017, s. 1-2).

Agrega; betonun mutlak hacminin yaklaşık olarak %75'ini oluşturan mineral kökenli ve çeşitli tane büyüklüklerindeki kırılmamış (doğal) veya kırılmış (yapay) tanelerin yığınına denmektedir. Özgül ve birim ağırlıklarına göre normal, hafif ve ağır agregalar olarak sınıflandırılırlar (Coşkun, 2010, s. 3).

Büyük özgül ağırlıklı agregalarla radyoaktif ışının (parçacık değil) soğurulmasını sağlamak için gerekli olan normal beton kalınlığı 1,5-2,5 kat azaltılabilmektedir. Bu şekilde zamandan ve hacimden kazanç sağlanabilmektedir (Akman 1987; Yarar 1994; Topçu ve Karakurt 2002). Betonun dayanımını arttıran ağır agregalarının özgül ağırlıkları genellikle 4000 kg/m^3'ün üzerinde olur. Barit, manyetit, hematit $BaSO_4$ ve Fe_2O_3 gibi özgül ağırlığı yüksek olan bu malzemeler beton içerisinde bu amaçla kullanılan agregalardır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılan özgül ağırlığı yaklaşık 4200 kg/m^3 olan barit cevheridir. Barit ($BaSO_4$), sülfat içermesine rağmen çok stabil olması nedeniyle betona zarar vermez (Baradan 1996).

Ağır betonlar radyoaktif maddelerin yaydığı nükleer ışınlardan özellikle, cisimlerin içine girebilen nötron, X ve gama ışınlarına karşı korumak, yani bir zırh oluşturmak için üretilen birim ağırlıkları 2800-5000 kg/m^3'ün üzerinde olan beton türüdür. Bu ağır betonların yapımında genellikle barit ve manyetit gibi özgül ağırlıkları 4000 kg/m^3'ün üzerinde olan ağır agregalar kullanılır (Artığ, 2016, s. 1). Büyük özgül ağırlıklı agregalar sayesinde radyoaktif ışının soğurulması daha düşük beton kalınlıklarıyla (normalden 1,5-2,5 kat az) mümkün olabilmektedir. Böylelikle zamandan ve hacimden kazanç sağlanabilmektedir. Ağır beton üretiminde kullanılan diğer özel agregalar manyetit (Fe_3O_4), limonit ($2Fe_2O_3H_2O$), hematit (Fe_2O_3) gibi demir cevherlerinin doğal agregaları veya demir ve çelik parçaları gibi sanayi artıklarıdır (Artığ, 2016, s. 1).

Nötron parçacıkları, X- ve γ- ışınları radyasyon tutuculuk özellikleri bakımından incelendiğinde ülkemizde ve dünyada yapılmış birçok çalışma vardır. Demir 2008 yılında X- ve γ- ışınlarını durdurmak için barit cevheri, nötron parçacıklarını durdurmak için ise

kolemanit cevheri kullanarak ağır beton üretmiştir. Bor türevli kolemanit cevheri toz halinde çimentoya eklenerek ve iri agrega olarak beton içerisine katılarak polimer ve barit malzemeleri ile birlikte kullanılarak zırhlama malzemesi üretilmiştir (Gündüz 1980; Gündüz and Usanmaz 1986). Lokan *et al.* (1971), ilmenit ve limonit agregalı katkılı farklı birim ağırlıklı betonların lineer azaltma katsayıları ve betonların yarı tabaka kalınlıklarını hesaplamıştır. Borst 1955 yılında Amerikan Patent Ofisi'den betonun radyoaktif yayılımlara karşı koruma verimliliği ile ilgili patent almıştır. Vanvor 2003 yılında yüksek seviyeli ve düşük seviyeli radyoaktif atıklardan yayılan nötron ve gama radyasyonunun daha iyi korunmasına yönelik çok bileşenli kompozit malzemeler ve tekniklerle ilgili çalışma yapmış ve patent almıştır. Tschirf (1976), Avusturya'da fotonların ve nötron parçacıklarını zırhlanması ile ilgili geleneksel ve ağır beton üzerinde çalışma yapmış ve patent almıştır. Baştürk M vd. bor cevherinin nötron parçacıklarının zırhlamada etkili bir radyasyon olduğunu tespit etmiştir. Kılınçarslan vd. (2006) çalışmasında, barit ve normal agrega kullanarak farklı dayanım sınıflarına sahip betonlar üretmiş ve betonların radyasyon azaltma katsayılarını bulmuştur. Normal agrega yerine barit kullanılması ve barit oranının artması ile lineer azaltma katsayısı arasında paralel bir ilişki kurmuştur. Meyer (1989), Almanya'da radyasyondan korunmak amacıyla ağır betonlar konusunda incelemeler yaparak bu betonların geleneksel betonlara göre daha uygun olduğunu bildirmiştir. Uçar vd. 2020 yılında rapor ettiği çalışmasında kolemanit veya üleksit içerikli betonların gama radyasyon tutuculuklarının sıradan betona göre kıyasla daha etkili olduğu sonucuna varmıştır. Makarious et. al. (1996), Mısır'daki ikinci deneysel reaktörün biyolojik korunması için ilmenit katkılı betonlar üretmiş ve bu betonların hızlı nötronların zayıflatılmasında etkili olduğunu belirtmiştir. Bashter et al. (1996a), γ-ışını ve hızlı nötron parçacıklarının zayıflatma özelliklerinin araştırılması için hematit-serpentit, ilmenit-limonit agregalı betonlar üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bashter (1997), 10 keV ile 1 GeV foton enerjisi aralığında hematit-serpantin, ilmenit-limonit, bazalt-manyetit, ilmenit, çelik-hurda ve çelik için doğrusal ve kütle zayıflatma katsayılarını hesaplamış ve deneysel olarak ölçülen ve hesaplar arasında bir karşılaştırma yapmıştır. Bashter et al. (1997), radyasyon zırhlama için çelik-manyetit veya bazalt-manyetit beton üretmiş, gama ışınları ve hızlı nötronların sızıntı değişimlerini incelemiştir. Bakos (1999), beton, kurşun ve çelik gibi zırh malzemelerinin teorik ve deneysel olarak 6 MeV-12 MeV foton enerjisine sahip γ-ışınları ile hesaplar yapmıştır. Simnad 2001 yılında hazırladığı raporunda nükleer reaktörler için zırhlama malzemelerini detaylı olarak sunmuştur. Abdo (2002), dolomit, manyetit, limonit ve barit gibi farklı yoğunluklarda malzemeler kullanarak zırhlama için beton üretmiştir. XCOM

programını kullanarak γ-ışını ve hızlı nötron parçacıkları için 10 keV'den 1 GeV'ye kadar olan enerjilerde hesaplamalar gerçekleştirmiştir. Abdo et al. (2002), barit agregalı betonun γ-ışını ve nötron parçacık radyasyonun azaltma özelliklerini tespit etmek amacıyla hem deneysel hem de XCOM programı kullanarak çalışmalar gerçekleştirmiştir. Onur (2002) çalışmasında, üretmiş olduğu beş farklı beton tipi için γ-ışını radyasyon tutuculuklarını tespit etmek amacıyla 60Co, 137Cs ve 192Ir radyoaktif kaynaklarını kullanarak farklı kalınlıklara ilişkin deneyler yapmıştır. Singh et al. (2004a), cam, beton, mermer, uçucu kül, çimento ve kireç gibi yapı malzemelerinin 10 keV ile 100 GeV arasındaki enerjilerde kütle azaltma katsayılarını hesaplamışlardır. Singh et al. (2004b), yaptıkları çalışmasında PbO – B2O3 ve Bi2O3 – PbO – B2O3 cam sistemleri için gamma ışını kütle zayıflama katsayıları deneysel olarak ölçmüş ve teorik olarak hesaplamıştır. Kılınçarslan (2004) çalışmasında, farklı yoğunluk ve dayanımlarda agrega olarak barit kullanmış ve betonlar üretmiştir. Kontrol betonlarıyla üretilen betonların mekanik özellikleri incelemiş ve baritli betonların radyasyon soğurganlıklarının daha iyi olduğu sonucuna varmıştır. Akkurt et al. (2005; 2006), beton tarafından γ-ışınlarının perdelenmesi için normal ve barit ağırlıklı agregaların farklı miktarlarını içeren betonlar üzerinde 0.66 MeV ve 1.33 MeV foton enerjilerinde ölçümler yapmış ve sonuçları XCOM programı ile elde edilen 1 keV ila 100 GeV foton enerji aralığındaki değerler ile karşılaştırmıştır. Awadallah ve Imran (2007), Ürdün'de gama radyasyonunu zayıflatmak için yapılan bazı yapıların zayıflatma katsayısı ölçümlerini HPGe dedektör kullanarak tespit etmişlerdir.

Bashter (1997)'in çalışmasında 10keV ila 1GeV foton enerjisi aralığında; yoğunlukları 2,3 ila 5,11 g cm^{-3} arasında değişen hematit-serpentit, ilmenit-limonit, basalt-manyetit, ilmenit, çelik hurdası ve çelik-manyetit betonlar için lineer soğurma katsayıları teorik olarak hesaplanmıştır. Bu değerler; enerjileri 1,5 ila 6 MeV arasında değişen gama ışınlarını soğurma katsayılarıyla karşılaştırmıştır. Ayrıca nötron zırhlaması da araştırılmıştır. Araştırma sonuçlarına göre yüksek yoğunluklu demir-manyetit betonların hem foton hem de nötronlar için etkili bir zırhlama özelliği oluşturduğu ortaya konulmuştur (Bashter, 1997).

El-Sayed Abdo (2002) tarafından yapılan çalışmada; limonit, manyetit, ilmenit ve barit kullanarak 4 farklı türden betonun gama ışını soğurganlıkları ve hızlı nötron parçacıkları için tesir kesit hesaplamaları yapmıştır. Hızlı nötronların etkin tesir kesitleri ile betonun yoğunluğu arasında bir ilişki olduğunu ve bu duruma göre artan beton yoğunluğu ile tesir kesitinin arttığı sonucuna ulaşmıştır. Foton enerjisi arttıkça soğurganlık katsayısı hızla düşmektedir (Abdo, 2002).

Akkurt ve ark. (2006), tarafından yapılan çalışmada 0.66 MeV, ve 1.33 MeV enerjili gama ışınları için normal ve barit agregalı farklı yoğunluklu betonların zırhlama kabiliyetleri araştırılmıştır. Buna göre radyasyon soğurma katsayısının gelen ışının çeşidine ve zırh malzemesinin atom numarasına değişimini inceleyerek, beton içerisindeki barit agregası arttıkça betonun yoğunluğunun arttığını ve gama radyasyonunu daha iyi soğurduğu ve radyasyona karşı zırhlama için tercih edilebileceği sonucuna varmışlardır (Akkurt, Başyiğit, Kilinçarslan, & B. Mavi, 2006).

Kaçar (2006) tarafından yapılan yüksek lisans tezi çalışmasında beton, barit agregalı beton ve kurşun malzemelerinin 0.001 Mev ila 10000 Mev enerji aralığında zırh malzemesi olarak kullanılabilirliğini araştırmış. Sonuç olarak malzemelerin yoğunlukları arttıkça zırh malzemesi kalınlığının azaldığı görülmüştür. Buna göre kurşunun kalınlığı, baritli ağır betondan daha az olacaktır (Kaçar, 2006).

Filiz vd. (2008) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, hematit agregası kullanarak radyasyona karşı kalkan bir beton üretmeyi amaçlamışlardır. Hematitin farklı oranlarda normal agrega ile %10-20-30-40-50 oranlarında yer değiştirilmesiyle ürettikleri 12x12x2cm ebatlarındaki plakların, hematit oranının artması ile betonların γ ışını yutulma katsayılarını arttırdığını ve hedefledikleri minimum basınç dayanımının üzerinde olduğunu gözlemlemişlerdir (Filiz, Gençel, Özel, & Sancak, 2008).

Yılmazer (2009) tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında, baritin radyasyon geçirgenliği, mekaniksel ve fiziksel özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Yapılan araştırmada ağır beton yapımında farklı oranlarda baritin kullanılabileceği sonucuna varmıştır (Yılmazer, 2009).

Demir (2009) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, X ve γ ışınlarını tutması için özgül ağırlığı yüksek olan barit cevheri, nötron parçacıklarını soğurmak için ise bor türevli kolemanit cevheri kullanmıştır. Araştırma sonucunda yeni karışım oranlarıyla fotonları en iyi soğuran barit agregalı betonlar, nötron tutuculuğu için ise kolemanit agregalı betonların daha iyi olduğunu ortaya koymuştur. (Demir, 2009).

Coşkun (2010) tarafından gerçekleştirilen yüksek lisans çalışmasında barit agregası kullanılan ağır betonların radyasyon zırhlama özellikleri incelenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre barit kullanımı ile hedeflenen birim ağırlık değerlerinin yakalanmasında olumlu bir artış olduğu görülmüştür. Barit miktarı artışı ile basınç dayanımında artış

olmuştur. Ayrıca en iyi soğurma katsayısı %30, 0-5 mm barit ve %20 taşunu kullanılan karışımda gerçekleşmiştir (Coşkun, 2010).

Korkut ve ark. (2010), farklı oranlarda barit ve kolemanit içeren beton numunelerinin 4.5 MeV enerjili nötronlar için zırhalama kapasitelerini ölçmüşlerdir. Araştırmaya göre beton içerisindeki kolemanit oranının artmasıyla nötron soğurma özelliğinin arttığı saptanmıştır (Korkut, et al., 2010).

Akyıldırım (2011) tarafından gerçekleştirilen doktora çalışmasında farklı agregalardan üretilmiş tek tip hafif beton, olivin kullanılmış tek tip ağır beton, farklı oranlarda barit kullanılmış iki tip ağır betonun gama radyasyonu zırhlama özellikleri incelenmiştir. Araştırma sonucuna göre hafif beton ve olivin kullanılmış betonun gama soğurma özelliklerinin barit içeren betonlara nazaran düşük olduğu sonucuna varmıştır (Akyıldırım, 2011).

Sevinç (2011) tarafından yapılan çalışmada barit, kolemanit, öğütülmüş yüksek fırın cürufu ve bazaltik pomzayı içeren harçların ve betonların dayanım ve dayanıklılığı araştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre radyasyon zırhlaması için barit katkılı harçların lineer soğurma katsayısı en yüksek değere sahipken, kolemanit katkılı harçların lineer soğurma katsayısı en düşük değere sahiptir. Pomza ve cürufun belirli oranlarda kullanılmasının da radyasyon soğurmasında etkili olduğu ortaya konulmuştur (Sevinç, 2011).

Sharifi ve arkadaşları (2012) tarafından gerçekleştirilen araştırmada barit, serpantin ve çelik-manyetit beton numunelerinin radyasyon koruyucu özellikleri incelenmiş, gama ışınları ile deneysel ölçümler almıştır. Deneysel veriler ve simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu çalışmada çelik-manyetit betonunun diğerlerine göre daha etkili bir koruyucu malzeme olduğu sonucuna varılmıştır. Baritin de çelik-manyetitten sonra tercih edilebilir bir malzeme olduğu görülmüştür. Serpantinin ise normal betona benzer sonuçlar vermesi nedeniyle gamaya karşı etkili olmadığı anlaşılmıştır (Sharifi, Bagheri, & Shirmardi, 2013).

Oto (2012) tarafından yapılan araştırmada farklı konsantrasyonlardaki barit ve manyetit cevherleri, bor minerallerinden kolemanit, tinkal, ve üleksit ile tinkal konsantratör atığı ve üleksit konsantratör atığının düşük oranlarda katkı maddesi olarak kullanılmasıyla üretilen beton numunelerinin gama radyasyonu ve hızlı nötronları soğurma özellikleri incelenmiştir. (Oto, 2012). Araştırma sonuçlarına göre üretilen beton örneklerin lineer soğurma katsayıları artan enerjiyle beraber azaldığı sonucuna varmıştır. Bu azalmanın temel

nedenini gama ışınlarının enerjilerinin artmasıyla fotoelektrik olayının etkisinin azalması ve saçılma olayının daha baskın duruma gelmesi olarak açıklamaktadır. Genel olarak beton içerisinde katkı madde oranı arttıkça radyasyon azaltma katsayılarının da azaldığını gözlemlemiştir. Barit ve manyetit cevherinin yoğunluğunun bor cevherinden yüksek olduğu için, bu cevherlerin fotonların soğurma kabiliyetleri yüksek çıkmasını bu nedene bağlamaktadır.

Topçu (2012) tarafından yapılan çalışmada, barit agregası kullanarak iki farklı çimento ile yedi farklı su/çimento oranında ürettikleri ağır betonların fiziksel ve mekanik özeliklerini tespit etmişlerdir. Araştırma sonucunda; ağır betonlar için optimum S/Ç oranının 0.40 olduğu ve 1 m^3 hacme karşılık çimento miktarının en az 350 kg olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Akkaş (2015) tarafından gerçekleştirilen doktora çalışmasında farklı tiplerde iyonizan radyasyon çeşitlerinin zırhlamasında kullanılmak üzere alüminyum-bor karbür kompozit (Al-B_4C) malzemenin davranışı incelenmiştir. Tüm malzemeler için gama, nötron ve beta radyasyonları altında üretilen malzemelerin zırhlama davranışları üzerinde çalışmalar yapmıştır.

Araştırma sonuçlarına göre Al-B_4C bileşiği içerisinde B_4C bileşiğinin tanecik çaplarının artması kompozit malzemelerin gama kaynakları kullanıldığında radyasyon zayıflatma kapasitesinin azaldığı sonucuna varmıştır. Ancak bu azalmaların düşük enerjilerde daha net göründüğü, yüksek enerji gama radyasyonu için daha düşük olduğunu vurgulamıştır. Çalışmada WC miktarının artmasıyla AL-B_4C-WC hibrit kompozit malzemesinin gama radyasyon zayıflatma kabiliyetinin de arttırdığını ifade etmektedir. B_4C bileşiğinin hacim olarak yüzde oranı ve tane çapındaki artış Al-B_4C kompozit bileşiği için nötron tutuculuğunu da arttırdığını vurgulamıştır. Sonuç olarak üretilen hibrit kompozit malzemesinde B_4C ve WC oranlarının artışı nötron tutuculuğunu arttırdığı görülmüştür (Akkaş, 2015).

Gülbiçim (2015) tarafından yapılan yüksek lisans tez çalışmasında düşük yoğunluklu saf vermikülitin gama radyasyonuna karşı zırh malzemesi olarak kullanımı incelenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre vermikülitin gama radyasyonuna karşı yeni bir zırh malzemesi olarak tercih edilebileceği ortaya konulmuştur. Bunun yanında vermikülite eşit oranda ilave edilen boraksın vermikülitin zırhlama kapasitesini artırdığı saptanmıştır (Gülbiçim, 2015).

Binici ve ark. (2015) tarafından yapılan çalışmada demir tozunun harç ve betonlar üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada harç ve beton örneklerinde kum yerine farklı oranlarda demir tozu agrega olarak tercih edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde harç ve betona demir tozu ilavesinin basınç, eğilme, aşınma gibi mekanik özelliklerini arttırdığı ve üretilen harç be betonların sülfata karşı dayanımlarının daha yüksek değerler olduğu görülmüştür (Binici, Sevinç, & Geçkil, 2015).

Artığ (2016) tarafından yapılan doktora tezi çalışmasında pandermit, kolemanit, demir cevheri (hematit, manyetit, limonit) içeren beton numunelerinin nötron parçacıkları, X ve gama ışınları için radyasyon geçirgenlikleri tespit edilmiştir. Beton numunelerinin radyasyon soğurganlıkları beton türünün yoğunluğuna, elementel bileşimine ve radyasyon enerjisine bağlı olarak değişmektedir. Çalışmada ayrıca limonit ve manyetit cevheri içeren beton numunelerinin gerek gama ve gerekse nötron radyasyonundan korunmada etkili olmanın yanı sıra betonun önemli mekaniksel özelliklerinden olan basınç dayanımına da olumlu katkılarının olduğu tespit edilmiştir. Bor minerallerinden pandermitin düşük enerjide (59.54 keV) %5 konsantrasyonu civarında katılması ile gama radyasyonu soğrulmasında etkili olduğu, diğer enerjilerde ise artan konsantrasyon ile etkisinin azaldığı, buna karşılık betonun basınç dayanımını artırdığı tespit edilmiştir. Kolemanit konsantratör atığının %5' lik konsantrasyonu geçmemek üzere katılımının gama radyasyonundan korunmada kullanılabileceği ve kolemanit konsantratör atığının beton basınç dayanımını artırdığı görülmektedir (Artığ, 2016).

Bakırhan (2017) tarafından yapılan yüksek lisans tezi çalışmasında, kurşun maden atığı kayaçlardan elde edilen agregalar ile üretilen ağır betonların radyasyon soğurma katsayıları incelenmiştir. Üretilen bu betonlarda kurşun madeni atıkları manyetit, limonit, barit gibi ağır agregalarla farklı oranlarda değiştirilerek farklı beton dayanım sınıflarında örnekler hazırlanmıştır. Araştırma sonuçlarına göre manyetit, barit, limonit ve pasa agregaları karşılaştırıldığında en yüksek radyasyon soğurma değerine manyetitin sahip olduğu görülmüştür. Bunu sırasıyla barit, pasa ve limonit takip etmiştir (Bakırhan, 2017).

Özavcı (2017)'nın yüksek lisans tez çalışmasında farklı katkılanmış 20 farklı tipte betonların radyasyon zırhlama üzerine etkileri incelenmiş ve radyasyon soğurma katsayıları ölçülmüştür. Ölçümler sonucunda sırasıyla agrega katkılı, kiremit tozu katkılı ve odun külü katkılı betonların tüm enerjilerde en yüksek soğurma katsayısına sahip olduğu saptanmıştır. (Özavcı, 2017).

Tüfekçi (2017)'nin yaptığı çalışmada silis kumu, kuvars tozu, atık demir tozu ve barit tozu kullanarak ultra yüksek performanslı kompozit (UHPC) malzemesinin fiziksel, mekanik ve radyasyon zırhlama özelliklerini incelemiştir. Ayrıca, 0,200 MeV enerjili X-ışını kaynağı ile 0,662 MeV enerjili sezyum ($_{137}$Cs) ve 1,250 MeV enerjili kobalt ($_{60}$Co) radyoizotopları olmak üzere 3 farklı enerji kaynağı için radyasyon zırhlama özellikleri deneysel ve teorik olarak belirlenmiştir. Barit agregalı serilerin lineer ve kütle zayıflatma katsayı 0,200 MeV enerji değerinde en yüksek değere ulaşmış olmasına rağmen 0,662 MeV ve 1,250 MeV enerji değerlerinde granüle atık demir tozunun kullanıldığı seriler en yüksek değere ulaşmıştır. Bu farklılığı zırhlama malzemesinin atom numarasına ve radyasyon enerjisine göre fotonların madde ile etkileşmelerinin değişmesi olarak açıklamaktadır (Tüfekçi, 2017).

Yavaşi (2018) tarafından gerçekleştirilen yüksek lisans çalışmasında öğütülmüş pirit, krom ve manyetit ilaveli harçların mekanik ve radyasyon soğurma özelliklerinin tayini amaçlanmıştır. Harçlara çimento kütlesinin farklı oranlarında standart kum, pirit, krom ve manyetit tozu ilave edilerek prizmatik harç numuneler üretilmiş ve gama ışını kullanarak kütle soğurma özellikleri incelenmiştir. Araştırma sonucuna göre manyetit tozu içeren harçların radyasyonu en iyi soğurduğu gözlenmiştir (Yavaşi, 2018).

Gökçe (2018) tarafından gerçekleştirilen doktora tezi çalışmasında barit agregalı ağır betonların gama ışını lineer soğurma katsayıları 0,145 ila 0,264 cm^{-1} aralığında; kütle soğurma katsayıları ise 0527 ila 08 cm^2/g aralığında saptanmıştır. Bunun yanında lineer soğurma katsayıları ile beton yoğunlukları arasında önemli doğrusal ilişki tespit edilmiştir (R^2>0,95) (Gökçe, 2018).

Shams ve arkadaşları (2018) tarafından yapılan çalışmada barit ve hematit agregalarının gama ışınları üzerindeki koruyucu etkisini anlamak normal agrega ile hacimce sırasıyla %50 ve %100 oranda; barit ve yine normal agrega ile hacimce sırasıyla %50 ve %100 oranda karıştırılmış, hematitten üretilmiş beton ve %50 barit %50 hematitten üretilmiş betonlar incelenmiştir. Üretilen betonlar iki katmanlı olarak incelenmiş ve barit veya hematit katmanlarının yerlerinin değiştirilmesinin gama zayıflatma etkisinde önemli bir fark olmadığı ve karışımdaki barit ve hematit oranının artmasının gama zayıflatma etkisini arttırdığı sonucuna varılmıştır (Shams, Eftekhar, & Shirani, 2018).

Bu çalışmada B, S, K, M, H, L, SD ve V tipi agrega kullanılarak optimum karışım tasarımı ile kaplama malzemesi üretilmiştir. Elde edilen kaplama numuneleri, nükleer santrallerin, sığınakların, radyasyonla çalışılan laboratuvarların duvarlarında (X-, γ- ışını ve

nötron laboratuvarı) hastanelerin radyasyona maruz kalan alanlarının zırhlanması ve saldırı anında oluşabilecek olası radyasyon sızıntısından korunmak amacıyla kullanılması hedeflenmektedir. X- ve γ- ışını soğurganlığı için yoğunluğu yüksek olan barit, selestit ve demir cevherleri, nötron parçacıklarının durdurulması için ise bor kökenli kolemanit cevheri, vermikülit ve silis dumanı kullanılmıştır. Yapılan literatür taramasına göre birim ağırlığı yüksek olan malzemenin radyasyon tutuculuğa da yüksek olacağı tespitinden sonra üretilecek olan kaplama numunelerinin hangi yöntem ve hangi deneysel metotlar kullanarak bu sonuca ulaşabiliriz üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu bağlamda malzemenin birim ağırlığını artırmak için üretilen harç karışımları min. su kullanılarak ve min. boşluk düşünülerek karışım dizaynları yapılmış ve deneme üretimleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra deneme üretimlerinde belirlenen W/C oranı ile harç karışım kuralları dikkate alınarak harç içerisindeki agrega, çimento, su ve katkı maddesi miktarı hacimce ve ağırlıkça hesaplanmıştır. Farklı basınçlarda tuğlaya şekil vermek amacıyla yapılan presleme yöntemi ile 22x11x5, 22x11x6, 23x12x5, 23x12x6 ve 25x25x12 cm boyutlarında çimento esaslı kompozit kaplama harç numuneleri üretilmiştir. Üretilen kaplama numuneleri 28 gün boyunca standart kür ortamında (suda) bekletilmiştir. Üretilen kaplama numuneleri; fiziksel özelliklerin tayini için 10x10x2 cm, mekanik kontrol deneyler için 4x4xG (G>16) cm ve radyasyon deneyleri için 10x10x(0,5-1-1-2-3) cm boyutlarında dış çapı 400 mm, diş kalınlığı 4 mm elmas soketli sulu yan kesme makinasında hazırlanmıştır. Radyasyon deneyleri için hazırlanan kaplama numuneleri 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 cm kalınlığa kadar X-, γ- ışını ve nötron soğurma katsayıları sayımları yapılmıştır. X-ışını zayıflatma katsayıları, 150 keV enerjili X ışını kaynağı ile tespit edilmiş ve ölçümler POLİMASTER marka PM1402M model dedektör ile, Gama Işınları tutulma katsayıları, Cs-137 radyoizotropunun yaydığı 662 keV gama ışınlarına karşı NaI(TI) sintilatör tipi gama ışını dedektör ile ve nötron zayıflatma katsayıları ise Pu-Be nötron (Nuclear Chicago NH-3) kullanarak He-3 nötron dedektörü ile 0.025MeV enerjili termal nötronlara karşı sayımlar deneysel olarak ölçülmüştür. Ayrıca harç içerisindeki agrega, çimento, su ve katkı maddesinin kimyasal bileşik konsantrasyon miktarları her bir harç örneği için XCOM programına girilerek 150 keV ve 662 keV enerjiler için teorik kütle azaltma katsayıları belirlenmiştir. Deneysel olarak ve XCOM teorik hesaplar sonucunda bulunan lineer ve kütle azaltma katsayıları birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Üretilen kaplama numunelerinin X-, γ- ışını ve termal nötronlar için HVL, TVL ve 2TVL kalınlık ve 1mm kurşun eş değerleri hesaplanmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Radyasyon

Radyasyon başlangıçta sadece ısı ışınlarının yayılması veya ışık ışınları ile bağlantılı bir kavram olarak düşünülürken günümüzde daha çok radyoaktif ışınların bir gösterimi olarak tanımlanmaktadır. Isı, ışık ve radyoaktif yayılmaların tümü parlayan enerji şekilleridir ve uzay boyunca bir noktadan diğerine aktarılır. Isı, ışık ve radyoaktif maddelerin çıkardığı gamma ışınları elektromanyetik radyasyonlardır. Bununla birlikte günümüzde radyoaktif maddelerin çıkardığı ışınların tümünden radyasyon adı altında bahsedilmektedir (Bayvas, 1989, s. 20).

Buna göre radyasyon; dalga, parçacık veya foton olarak adlandırılan enerji paketleri ile enerji yayımı veya aktarımı olarak tanımlanabilir. Diğer bir tanımla radyasyon; kararsız yapı gösteren doğal ya da yapay radyoaktif çekirdeklerin daha kararlı bir yapıya geçebilmek için parçalanarak dışarı yaydıkları hızlı parçacıklar ve elektromanyetik dalga şeklinde taşınan fazla enerjileridir. Parçacık radyasyonu belirli bir kütle ve enerjiye sahip çok hızlı hareket eden parçacıklardır. Bu tip radyasyon yüksek bir hızla giden mermiler gibidir ve gözle görülemeyecek kadar boyutları oldukça küçüktür. Dalga tipi radyasyon ise belirli bir enerjiye sahip fakat kütlesiz, titreşim yaparak ilerleyen elektrik ve manyetik enerji dalgalarına benzerdir. Görünür ışık çeşidi bu tip radyona örnektir. Tüm dalga tipi radyasyonlar $3x10^8$ m/s ışık hızıyla hareket eder. (Önen, 1993; Yaren & Karayılanoğlu, 2005, s. 200).

İyonlaştıran ve eksite eden olmak üzere iki tip radyasyon bulunmaktadır. Bu çalışmanın konusu daha çok iyonizan radyasyonla ilgilidir. Radyasyon, partikül denilen küçük paketler halinde yayılır. Bu partiküllerin bir kısmı yüklü, bir kısmı ise nötrdür. Yüklü partiküller ya pozitif (+) ya da negatif (-) elektrik taşırlar. Pozitif yüklü olanlar; proton, alfa partikülleri, pozitronlar; negatif yüklü olanlar ise elektronlardır. Alfa ışınları 2 proton ve 2 elektrondan oluşan helyum atomunun çekirdeklerinden ibarettir. Elektron veya pozitron hüzmelerine "beta ışınları" ve dezentegre olan yüksek enerjili radyoaktif elementlerden çıkan fotonlara "gama ışınları" denilmiştir. Hızlandırılmış elektronların ağır metallerden yapılmış bir engel veya hedefe çarpması ile meydana çıkan ve gamma ışınlarına nazaran daha düşük enerji seviyesinde ve homojen olmayan fotonlara da X ışınları denilmiştir. Yüklü partiküller yaklaştıkları veya çarptıkları maddenin zıt yüklü atomları tarafından çekilirken; aynı yüklü atomları tarafından itilirler. Böylece yüklü partiküller sahip oldukları enerjiyi

hızla tüketir ve maddenin yüzeyinden daha derinlere gidemez. Bu enerji partikülleri nedeniyle elektronlarını kaybeden moleküller iyonize hale gelir. Başta nötron ve fotonlar olmak üzere nötr partiküllerin iyonlaştırıcı etkileri ise doğrudan doğruya çarpışma nedeniyle ortaya çıkar ancak; bu partiküllerin atomun boşluklarından geçme ihtimali çarpma ihtimalinden daha yüksektir böylece çok uzak noktalara kadar ilerleme kabiliyetleri vardır (Frigerio, 1971, s. 5-7).

Yüklü partiküller çoğunlukla, atom çekirdeklerinin etrafındaki yörüngelerde dolaşan yüklü elektronlara çarparlar bunun temel sebebi elektronların atom yapısında çekirdeğe nazaran çok daha geniş bir alanı işgal etmeleridir. Fotonlar da bu elektronlara çarparlar ancak fotonlar elektronlardan çok daha hafiftir ve elektronlara çarparak geri itilir. Nötronlar ise bir hidrojen atomunun ağırlığına eşittir ve elektrik yükleri olmadığından elektron bulutunun içinden geçerek çekirdekteki protonlara çarparak atomun yapısını etkileyebilir. Bu nedenle H_2O yani su bakımdan zengin olan dokular nötronlardan en çok zarar gören sistemlerdir. Atomun çekirdeği ne kadar ağır ise meydana gelen zarar da o kadar az olacaktır (Frigerio, 1971, s. 7-8).

Elektronlar ve protonlar devamlı çarpışma ve sekmeler yoluyla giderek yavaşlarlar ve sonunda çevrelerindeki moleküllerle kimyasal reaksiyonlara uğrarlar. Pozitronlar da elektronlar gibi hızlarını kaybederlerse bir elektron tarafından yakalanır ve iki foton yayınlayarak yok olurlar. Nötronlar ise atom çekirdekleri tarafından yakalanarak yeni ve daha ağır bir takım çekirdekler meydana getirirler. Bu yeni çekirdekler daima kararsızdırlar bu yüzden "radyoaktif" olarak adlandırılır. Stabil olmayan bu çekirdekler gerek foton gerekse bir takım yüklü partiküller yayarak sonunda sabit ya da kararlı çekirdekler meydana getirirler (Frigerio, 1971, s. 8). Özetlemek gerekirse parçacık olarak tanımlanan radyasyonlar; α- parçacıkları veya He++ çekirdeği, β- parçacıkları, elektronlar (e-), pozitronlar β+ veya pozitif olarak yüklenmiş elektronlar, nötronlar (n), çoğunlukla H+ çekirdeği olan yüksek enerjili protonlar p+'dan ibaret olan primer kozmik ışınlardır. Elektromanyetik radyasyonlar ise radyoaktif bozunmaya uğrayan atomların çekirdeğinde üretilen γ-ışınları ile yüksek enerjili elektronların yavaşlatılmasıyla veya atomun iç tabakaları arasında elektron geçişiyle üretilen X-ışınlarıdır (Demir, 2009, s. 21-22).

2.2. Radyoaktivite ve Radyoaktif Bozunma

Kararsız çekirdekler taşıdıkları fazla enerjiyi parçacık çıkararak veya ışıma yaparak atarlar. Bu kendi kendine dönüşüm yapma veya ışıma olayına radyoaktivite; çekirdeğin

kendi kendine parçacık çıkararak parçalanma olayına radyoaktif parçalanma denir (Bayvas, 1989, s. 16).

Becquerel, 1896'da Uranyumlu taş ve birkaç fotoğraf filmi kullanarak Thorium (Th) ve Uranyum gibi elementlerin yavaş fakat sürekli bir şekilde parçalanmakta ve böylece sonunda Kurşun (Pb) haline gelinceye kadar alfa, beta ve gama ışınları yaydığını keşfetmiştir. Parçalanma sonunda meydana gelen kurşun en ağır sabit bir element olarak bilinmektedir (Frigerio, 1971, s. 20). Becquerel aynı radyasyonun havanın iyonlaşmasına neden olduğunu da bulmuştur. Bu buluşun ardından 1898'te Marie Curie ve eşi Pierre Curie, "radyum" ve "polonyum"'u keşfettiler. Bunu müteakip toryum, aktinyum ve diğer radyoaktif maddeler keşfedildi (Akkaş, 2015, s. 11). Rudherford 1919'da azot gazı üzerine alfa parçacıkları gönderdiğinde gazdan (+) yüklü parçacıkların salındığını gözlemledi ve bu parçacıklara proton adını verdi. Tepkime sonunda azot gazı oksijene dönüşüyordu. 1934'te İrena Curie- Frederic Juliet çifti laboratuvar ortamında alüminyumu, polonyumun radyoaktif bozunmasından o---rtaya çıkan alfa parçacıklarıyla bombardıman ederek radyoaktifliği yapay olarak elde ettiler (Çubukçu, 2018, s. 5).

1934'te diğer bir nükleer olay olan fisyon yani atomun parçalanması keşfedilmiştir. İtalyan fizikçisi Enrico Fermi, kültesi alfa taneciğinin dörtte biri olan yüksüz tanecikler olan nötronlarla uranyumu bombalayarak uranyumun radyoizotoplarını bulmuştur. Bu fisyon olayı, Otto Hahn tarafından 1938'de yorumlanarak uranyum atomunun parçalanma sonucu, yaklaşık iki eşit kütle olan baryum ve lantanlara ayrılmış olduğu keşfedilmiştir. Uranyumun nötronlarla bombalanarak çözülmesi olayı 1939'da daha ileri seviyede açıklığa kavuşmuştur. Lise Meitner'in sıvı damlası modeline göre uranyum çekirdeği nötron koparak kararlılığı bozulmakta ve iki kütleye ayrılmaktadır. Bu arada yeni ortaya çıkan çekirdeklerin birbirilerini iterek 200 MeV enerji kazanmaları mümkündür. Bu enerji fisyonda kaybolan bir miktar kütleden kaynaklanmaktadır. Buna göre bölünme ürünleri Baryum ve Kripton'dur (Şeker & Çerezci, 2000, s. 91-92).

Yerkabuğundaki ekolojiye daha az zararı olan başlıca önemli radyoaktif maddeler toryum, nükleer enerji hammaddesi olan uranyum, havadaki O_2 ve nem ile reaksiyona giren aktinyum ve uranyum-radyum dizilerindeki radyoizotoplardır. Bunlar bir dizi radyoaktif bozunma sonucunda kurşuna dönüşerek atom çekirdekleri kararlı hale gelir. Örneğin, uranyum 238'den bozunum sonucu radyum 226 ve ondan da radon 222 oluşmakta; toryum 232'den bir dizi bozunum sonucu radon 220 ortaya çıkmaktadır. Bu çeşit doğal radyoaktif maddeler hava, su, besinler yoluyla vücuda girip vücudu içten ışınladığı gibi yapı

malzemelerinde ve toprakta bulunmaları sonucu vücudu dıştan da ışınlamaktadır (Atakan, 2014, s. 17).

Bu keşifler sonrası yapılan çalışmalarda kimyasal özellikleri aynı fakat çekirdekteki nötron sayıları ve fiziksel özellikleri farklı atomlar bulunduğu anlaşılmıştır. Bu tür elementlere birbirinin izotopu denmektedir. Belirli bir elementin sabit izotoplarının sayılarının 0-9 arasında olduğu buna karşılık stabil olmayan izotopların sayısının ise hemen hemen sınırsız olduğu anlaşılmıştır. Eğer kararsız bir nüklid stabil duruma geçerken genellikle olduğu gibi yüklü partiküller yayınlayarak dezentegrasyona uğrarsa geride kalan çekirdeğin yükü ve dolayısıyla kimyasal özellikleri de değişmektedir. Örneğin Potasyumun izotoplarından K-40 dezentegrasyona uğradıktan sonunda kalsiyum meydana gelmektedir. Bir nüklidin içerisinde bulunan atomların yarısının dezentegre olması için geçmesi gereken ortalama süreye "yarı ömür" denmektedir (Frigerio, 1971, s. 20-21).

Radyoaktivitenin keşfinden sonra bu ışınlar üzerinde çeşitli yöntemlerle incelemeler yapılmıştır. Radyoaktif maddelerden çıkan ışınlar fotoğraf levhasını karartmak, uygun maddeler üzerinde flüoresan uyarmak ve havayı iyonlaştırmak gibi etkiler göstermekteydiler. Radyoaktif ışınımları anlamada en iyi sonuçlar manyetik saptırmalar sonucunda elde edilmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda radyoaktif ışınların; uygulandığı manyetik alan içerisindeki davranışlarına göre üç tipte oldukları sonucuna varılmıştır. Bu ışınlardan (Bayvas, 1989, s. 20):

- alfa ışınları, manyetik alan içinde pozitif yüklü taneciklerden meydana gelmiş ışınlar gibi saparlar,

- beta ışınları içinde negatif yüklü tanecikler gibi saparlar,

- gama ışınları, hiçbir sapmaya uğramazlar.

2.2.1. Alfa Bozunması

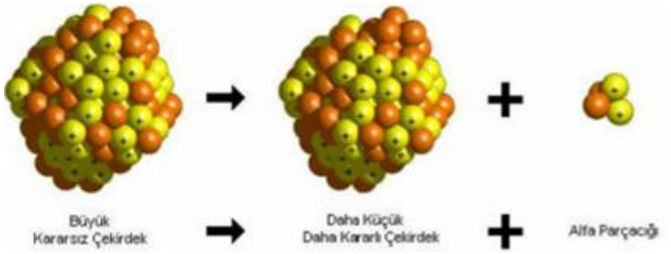
Alfa ışınlarının elektrik ve manyetik alan içinde sapmasından, kararsız bir atom yüksek bir enerjiye sahiptir ve bu yüksek enerjiden kurtulmak için çekirdeği tarafından saçılan pozitif ve "2e" elektrik yüküne eşit yükü olan parçacıklar olduğu anlaşılmaktadır. Bu parçacıkların kütleleri dört nükleon kültesine eşittir bu da helyum atomu çekirdekleri olduğunu göstermektedir. Bu parçacıklar şiddetli iyonlayıcı parçacıklardır ve havadaki yolları en fazla 1-2 cm kadardır. Basit bir şekilde kâğıt veya cilt tarafından absorbe edilebilir (TAEK, 2009, s. 7). Alfa parçacıkları iki proton ve iki nötrondan meydana gelmiştir simgesi

$_2He^4$ tür. Alfa parçacıkları çoğunlukla doğada oluşmuş ve atom ağırlıkları büyük olan polonyum, toryum, radyum, uranyum gibi kararsız izotoplardan yayılmaktadır. Bir element bir alfa parçacığı çıkardığında atom numarası iki, kütle numarası ise dört değerinde azalmaktadır (Bayvas, 1989, s. 21-22).

Çekirdeğin kararsız durumu nötron ve proton fazlalığından ileri geliyorsa iki proton ve iki nötrondan oluşan bir α-parçacığı yayımlayarak daha küçük ve kararlı bir çekirdeğe bozunur.

$$_ZX^A \rightarrow {}_{Z-2}Y^{A-4} + {}_2He^4\ (\alpha) + Q$$

Yukarıdaki eşitliğe göre $_ZX^A$, kararsız olarak bulunan ana çekirdek, $_{Z-2}Y^{A-4}$, kararlı olan ürün çekirdek, $_2He^4$ (α), α-parçacığı ve Q ise parçalanma enerjisidir, α-parçacığı iki elektronunu kaybetmiş bir Helyum atomudur. Bir parçacığın başka bir parçacığa dönüşmesi ile nedeniyle açığa çıkan enerjinin büyük bir bölümünü, momentumun korunumu yasasına göre küçük kütleye sahip olan α-parçacığı alır. α-parçacıkları yüksek enerjiye sahip olsa da ağır kütlesi nedeni ile yer değiştirme mesafeleri çok kısadır. Fakat havada yoğun iyonlaşmaya sebep olurlar (Kaçar, 2006, s. 5).



Şekil 2.1. Alfa parçacığının yayımlanması
Kaynak (Demir, 2009, s. 22):

Alfa parçacıkları ağır yüklü olduklarından, malzeme ile etkileşmeleri, soğurucu atomların yörünge elektronları ile kendi pozitif yükleri arasında oluşan Coulomb kuvvetiyle gerçekleşmektedir. Ağır yüklü parçacıkların madde içerisindeki enerji kaybından esas itibariyle inelastik çarpışmalar sorumludur. Bu etkileşmelerde, gelen parçacığın kinetik enerjisi atomun iyonlaşma enerjisinden yeterince büyük ise, enerjisini yolu üzerindeki atomları iyonlaştırarak maddeye aktarmaktadır (Çevikbaş, 2014, s. 11).

Alfa parçacıkları doğal veya yapay radyoaktif maddelerden salınabilirler. Alfa ışınlarının en enerjik olanları 9 MeV civarında bir enerjiye sahiptirler. Havada ve diğer

maddeler içerisindeki yolları kısadır. Ağır ve iyonlayıcı parçacıkları olduklarından giricilikleri az olsa da yüksek iyonlayıcı olma özelliklerinden dolayı tehlikeli ışınlardır. Vücut dışından alındıklarında deri tarafından tutulurlar (Bayvas, 1989, s. 22).

Alfa parçacıkları ince bir kâğıt tabaka gibi ince materyallerle durdurulabilir çünkü diğer radyasyon tiplerine nazaran, sahip oldukları elektrik yükleri daha büyüktür. Bu da alfa parçacıklarının herhangi bir madde içerisinden geçerken yolları üzerinde yoğun bir iyonlaşma meydana getirmelerine ve bu yüzden de enerjilerini hızlı bir şekilde kaybetmelerine neden olmaktadır. Bu hızlı enerji kaybı da alfa parçacıklarının erişim mesafesini oldukça kısaltmaktadır. Bu nedenle alfa parçacıkları dış radyasyon tehlikesi yaratmazlar; ancak mide, solunum ve yaralar vasıtasıyla vücuda girdiklerinde tehlikeli olabilirler (Togay, 2002, s. 37).

2.2.2. Beta Bozunması

Radyoaktif maddeler tarafından salınan diğer bir ışın olan beta ışınları parçacık karakteri gösterirler. Çekirdekteki enerji fazlalığı $E= mc^2$ formülüyle açıklanan bir kütle yarattığından bu kütle çekirdekteki fazla yükü alarak dışarıya beta ışını olarak çıkar. Yük ve kütleleri elektron yük ve kütlesine eşittir yani beta parçacıkları aslında pozitif veya negatif yüklü elektronlardır. Pozitif yüklü elektronlar "β" ile, negatif yüklü iyonlar ise "β-" simgesi ile ifade edilir (Togay, 2002, s. 37). Bu parçacıkların salınması çekirdekteki proton veya nötronların kararlılığına göre fazlalığından ileri gelmektedir. Çekirdekten nötron fazlalığından dolayı salınan parçacıklar negatif yüklüdürler ve bunlara beta ışını denir. Bu parçacıklara negatron da denir. Buna karşılık çekirdekteki proton fazlalığından kaynaklanan bir beta yayınlanması mevcutsa parçacık pozitif yüklüdür ve pozitif yüklü parçacıklara pozitron denir. Radyoaktif parçalanma sonucunda pozitif işaretli betalardan ziyade negatif işaretli beta ışınları yayınlanmaktadır (Bayvas, 1989, s. 22).

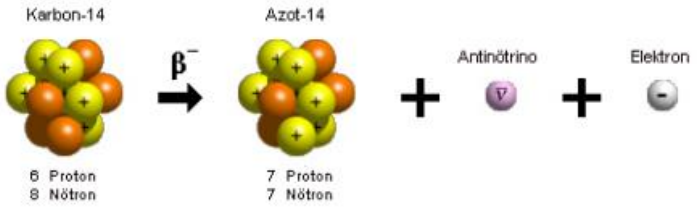
Çekirdeğin kararsızlığı nötron fazlalığından kaynaklanıyorsa, çekirdek içinde bir nötronun bozunuma uğrayarak bir protona bir elektrona ve ayrıca kütlesi sıfır olan antinötrinoya dönüşür.

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{v} \qquad (2.2)$$

veya,

$$ZXA \rightarrow Z+1YA + e^- + \bar{v} \qquad (2.3)$$

Eşitlik (2.2)'de n, nötronu; p, protonu; $\bar{\nu}$, antinötrinoyu, denklem (2.3)'de ise ZXA, kararsız ana çekirdeği; Z+1YA ise kararlı ürün çekirdeği ifade etmektedir (Kaçar, 2006, s. 6).



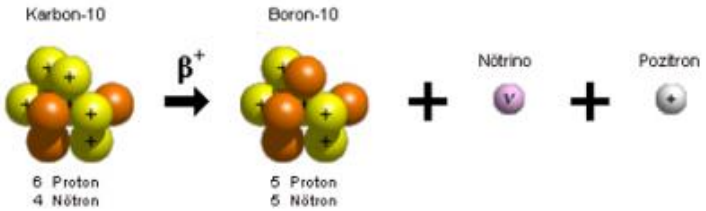
Şekil 2.2. Beta (-) bozunumu
Kaynak: (Kaçar, 2006, s. 6)

Buna karşılık atomun kararsızlığı nötron azlığından veya proton fazlalığından kaynaklanıyorsa protonlardan biri nötrona ve yükü pozitif olan elektrona dönüşür.

$$p \rightarrow n + \beta + + \nu \qquad (2.4)$$

Nötron çekirdekte kalır, pozitif yüklü pozitron ise dışarı fırlatılır. Böylece pozitron yayımlayan çekirdeğin proton sayısı bir eksilerek kendinden bir önceki elementin atomuna dönüşür, fakat kütle sayısı değişmez.

$$_{Z}X^{A} \rightarrow {}_{Z-1}Y^{A} + e^{-} + \nu \qquad (2.5)$$



Şekil 2.3. Beta (+) bozunumu
Kaynak: (Kaçar, 2006, s. 6-7)

Beta parçacıkları da alfa parçacıkları gibi yük ve kütleye sahip olduğundan madde içerisinden geçerken yolları üzerinde iyonlaşmaya neden olurlar ancak bu iyonlaşma alfa parçacıklarının oluşturduğundan daha azdır. Bunun nedenini beta parçacıkları alfa parçacıklarından daha hafif ve 100 kat daha girici olması olarak açıklanabilir. Bu parçacıklardan korunmak için çok düşük kalınlıklarda alüminyum levhadan yapılmış bir zırh malzemesi yeterlidir (Togay, 2002, s. 37).

Beta parçacıkları hafif olduklarından aynı enerjili ağır yüklü parçacıklara göre, hızları daha yüksektir. Bu yüzden bir çekirdek alanından geçtiklerinde, radyasyon yolu ile

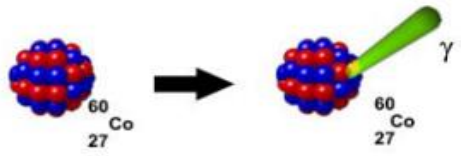
enerji kaybına uğrayabilirler. Bu enerji Bremsstrahlung ya da frenleme radyasyonu şeklinde görülmektedir. Bu radyasyon, elektronun ivmelenmesinden dolayı ortaya çıkmakta ve çekirdeğin elektriksel çekimi yüzünden izlediği yolda sapma meydana gelmektedir. Beta parçacıkları enerjilerinin büyük bir kısmını, ortamın yörünge elektronları ile yaptıkları çarpışmayla kaybetmektedirler. Bu olay Moller ve Bhabha saçılması olarak nitelenmektedir. Moller saçılması elektronun ortamdaki atomun elektronları ile esnek olmayan saçılmasını, Bhabha saçılması ise pozitronların atomun elektronları ile esnek olmayan saçılmasını ifade etmektedir. Bu saçılmalar sonucunda beta parçacıklarının izledikleri yol, alfalar gibi ağır yüklü parçacıkların izledikleri düz yolun aksine, zikzaklı olabilmektedir. Bu sebeple, beta parçacıklarının yolları alfa parçacıklarının yollarına göre daha uzun olmaktadır (Çevikbaş, 2014, s. 12).

Beta parçacıkları alfa parçacıklarından çok daha küçüktür bu yüzden doku veya malzemeler içinde daha fazla nüfuz ederler. Bunun yanında plastik, cam veya metal tabakalar tarafından tamamen soğurulabilirler. Normalde cildin üst tabakasından öteye geçmezler ancak yüksek enerjili beta yayınlayıcılar ile aşırı derecede ışınlanma ile cilt yanıklarına neden olabilirler (TAEK, 2009, s. 7).

2.2.3. Gama Bozunması

Gama ışınları elektromanyetik özelliğe sahip olup elektrik ve manyetik alanlarda sapmazlar. X ışınlarına benzerler ancak onlardan daha giricidirler. Radyoaktif bir çekirdek alfa veya beta yayınlamasından sonra çoğu zaman kararlı halde kalmayabilir yani radyoaktif parçalanmadan sonra geride kalan çekirdek uyarılmış halde kalabilir. Bu çekirdek oluştuğundan çok kısa bir süre sonra bir veya birkaç gama ışını yayınlayarak üzerindeki fazla enerjiyi atarak kararlı hale gelir. Çekirdek ne kadar yüksek enerji seviyesinde uyarılmış olarak kalmışsa, çıkacak gama ışınları o kadar yüksek enerjili olacaktır. Böylece radyoaktif çekirdekler binlerce hatta milyonlarca elektron volt enerjili gama ışınları yayınlayabilirler (Bayvas, 1989, s. 23).

Bu şekilde bozunan yarı kararlı nüklidin atom ve kütle sayılarında bir değişme olmaz, bu nedenle izomerik bozunma adı verilmiştir. Gama yayınlanmasının yarı ömrü¸ diğer bozunumlarla kıyaslandığında çok kısadır, genellikle 10^{-9} saniyeden daha küçüktür, ancak saat, hatta gün mertebesinde yarı ömürlü¸ gama yayınlanması da vardır. Enerji spektrumları ise kesiklidir (Kaçar, 2006, s. 8).



Şekil 2.4. Gama bozunumu
Kaynak: (Kaçar, 2006, s. 8)

Gama radyasyonu çoğunlukla aynı anda beta parçacığı yayınlayan kararsız atom çekirdeğinden çıkan çok yüksek enerjili fotondur. Madde içerisinden geçerken öncelikle elektronlarla etkileşmelerden dolayı atomlarda iyonlaşmaya neden olmaktadır. Gama radyasyonu çok girici olup sadece kurşun ya da çelik gibi yoğunluğu oldukça yüksek ve kalın malzemeler iyi bir zırhlama sağlayabilir (TAEK, 2009, s. 8).

Gama ışınları (γ), beta ışınlarından daha yüksek enerjili ve dolayısıyla daha girici (nüfuz edici) ışınlardır. Gama ışınlarının, alfa ve beta parçacıklarına göre madde içine nüfuz etme kabiliyetleri çok daha fazla, iyonlaşmaya sebep olma etkileri ise çok daha azdır. Birkaç santimetre kalınlığındaki kurşun tuğlalarla ve sadece belli bir kısmı durdurulabilir. Madde içerisinden geçerken üstel bir fonksiyon şeklinde bir şiddet azalmasına uğrarlar (Togay, 2002, s. 37).

Gama ışınları kütlesiz ve yüksüz olduklarından kütleli ve yüklü olan diğer radyasyonlara göre çok daha derinlere nüfuz edebilirler. Yüksüz olduklarından dolayı da elektrik ve manyetik alandan etkilenmez, sapma göstermezler. Gama ışınları fotonlar aracılığıyla taşınırlar (Kalyon, 2019, s. 13).

Gama ışınları çok girici ışınlar olup madde içinde uzun yollar kat edebilirler. Bu ışınları durdurmak için 28-30 cm kalınlığında kurşun tabakaların gerektiği durumlar olabilir. Gama ışınlarının en enerjik olanları uranyum-232'nin 2.8 MeV enerjili gamaları ve sodyum-24'ün 2,754 MeV'lik gamalarıdır (Bayvas, 1989, s. 25).

Gama ışınlarının koruyucu zırh ile etkileşmesinin sonucunda μ ile gösterilen toplam zayıflatma katsayısı adı verilen parametre ortaya çıkar. Fotonlar içinde bulundukları ortamdaki maddelerle üç farklı şekilde etkileşebilir. Bu etkileşim türleri fotoelektrik olay Compton saçılması ve çift oluşumudur. Bunlardan fotoelektrik olay ve çift oluşumu fotonların soğurulmasına dayanırken, Compton saçılması, saçılmaya dayanmaktadır. Bu etkileşme enerjileri fotona ve fotonun etkileştiği zırh malzemesine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bunun yanında her bir etkileşmenin zayıflatma katsayıları farklıdır. Fotoelektrik

olayın zayıflatma katsayısı τ ile ifade edilirken, Compton saçılmasının σ ve çift oluşumunun κ ile ifade edilir. Toplam zayıflatma katsayısı μ bu üçünün toplamına eşittir (Kalyon, 2019, s. 13-14).

Yüksek yoğunluğa sahip; barit, manyetit ve limonit cevherleri gama radyasyonu zırhlamasında kullanılan başlıca madenlerdir (Oto, 2012, s. 30). Vermikülit doğal olarak oluşmuş bir magnezyum alüminyum silikat minerali olması ve içerisindeki Si miktarının oldukça yüksek olması, gama radyasyonunun zırhlanması açısından uygun olabileceği ortaya konulmuştur (Gülbiçim, 2015, s. 6).

2.2.4. Nötron Bozunması

Nötronlar fotonlar gibi ışık hızı ile hareket eden küçük parçacıklardır. Beta bozunmasında enerji ve momentumun korunumu gereği yayınlandıkları anlaşılmıştır ve beta bozunmasında enerji dağılımının sürekliliğini sağlarlar (Bayvas, 1989, s. 34). Nötronların kütlesi $1{,}67 \times 10^{-27}$ kg olup protonun kütlesine çok yakındır. Yüksüz olması sebebiyle maddelerin içine nüfuz edebilmeleri ve atomlarla etkileşmeleri kolaydır. Kendileri doğrudan iyonizasyon yapmazlar ancak atomlarla etkileşmeleri alfa, beta, gama veya x ışınlarının yayınlanmasına neden olabilirler. Nötronları durdurmak için su, kalın beton duvar veya parafin kütleleri kullanılır. Maruziyeti halinde sağlık açısından büyük risk oluşturur (Taşkın, 2018, s. 6).

Radyoaktif maddelerin yayınladığı alfa ışınları ile hafif elementler bombardıman edildiğinde oluşan reaksiyon sonucu nötronların meydana geldiği gözlenmiştir. Örneğin berilyumun alfa ışınlarıyla bombardımanı sonucu nötron açığa çıkmaktadır. Bunun yanı sıra çekirdek bölünmeleri sonucunda da çok miktarda nötron yayınlanmaktadır (Bayvas, 1989, s. 32).

Çoğu ağır nüklid kendiliğinden parçalanma olasılığına sahiptir ve her bir parçalanma olayında da pek çok hızlı nötron yayınlanır, bu yüzden böyle bir radyonüklid numunesi basit ve uygun bir izotopik radyasyon kaynağıdır. Diğer parçalanma ürünleri, parçalanma γ-ışınlarını oluşturan daha önce tanımlanmış ağır parçalanma ürünleridir ve parçalanma ürünlerinin β-parçacığı ve γ-ışını aktivitesi numune içinde toplanır. Nötron kaynağı olarak kullanıldığında, izotop genellikle kaynaktan sadece hızlı nötronların ve γ-ışınlarının yayınlanması için yeterince kalın bir kalıp içinde muhafaza edilir (Demir, 2009, s. 32).

Nötronlar yüksüz parçacıklar olduğundan çok giricidirler, herhangi bir madde içerisine kolaylıkla nüfuz edebilirler ancak; doğrudan bir iyonlaşmaya neden olmazlar. Bununla birlikte, atomlarla etkileşmeleri, iyonlaşmaya neden olan alfa, beta, gama veya X ışınlarının ortaya çıkmasına neden olabilir. Nötronlar sadece kalın beton, su veya parafin kütleleriyle durdurulabilirler (Togay, 2002, s. 37).

Nötronlar kalın kurşun, demir, beton gibi maddelerin arasından geçebilirler. Ağır atom numaralı elementler nötronlar için geçirgendir ancak, hidrojen ve hidrojenli maddeler aracılığıyla yavaşlatılabilirler. Nötronlar bu maddelerin atom çekirdekleriyle çarpışmaları sonucu enerjilerini onlara aktarmak suretiyle yavaşlarlar. Nötronları yavaşlatmak için kullanılan maddelere yavaşlatıcı veya moderatör denir (Bayvas, 1989, s. 33).

Nötronların yavaşlatılıp soğurulması nükleer reaktörler için önemli bir problemdir. Nükleer reaktörlerde absorbsiyon tesir kesitleri küçük olan hızlı nötronlar moderatör adı verilen elastik çarpışma tesir kesiti yüksek olan yani yüksek yavaşlatma gücüne sahip olan malzemeler tarafından yavaşlatılmaktadırlar. Hidrojen, döteryum, helyum, lityum, berilyum, karbon ve grafit gibi düşük atom numaralı çekirdekler moderatör olarak en sık kullanılan malzemelerdir (Oto, 2012, s. 32-33).

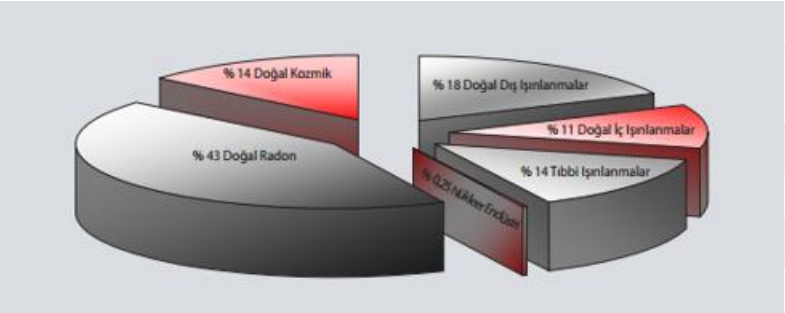
Nötron zırhlama işleminde ikinci aşama nötronun soğurulmasını sağlamaktır. Soğurulabilir duruma kadar yavaşlatılan nötron bir atom tarafından yakalandığı zaman yüksek enerjili elektromanyetik radyasyon yayınlayan bir radyoizotopa dönüşür. Bu şekilde açığa çıkan elektromanyetik radyasyon yeni bir zırhlama problemini beraberinde getirmektedir. Bu nedenle nötron parçacıklarının zırhlanmasında γ-ışını yayınlamalarının düşük olması istenir. Bunu için en uygun olan element bordur. Hem hidrojen içerdiği için hem de farklı bor cevherleri agrega olarak kullanılabildiği için beton iyi bir zırh malzemesi olarak kullanılabilir (Oto, 2012, s. 33).

Limonit ve manyetit cevheri katkılı beton numunelerinde katkı maddesinin konsatrasyonun artması ile beton numunesinin nötron soğurmasının daha etkili duruma geldiği görülmektedir. Manyetit ve limonit cevherlerinin yüksek yoğunluğa sahip olmaları, beton üretiminde bir katkı maddesi olarak kullanılması ile elde edilen beton numunelerinin yoğunluklarını artırmakta, bu da artan konsantrasyonla artan hızlı nöton soğurma tesir kesitlerine sahip olmasına ve normal betondan daha etkili bir zırh malzemesi durumuna getirmektedir. Hızlı nötronlar için zırh malzemesi olarak kullanılacak numunelerin yeterince

durdurucu materyal içermeleri ve yüksek yoğunluğa sahip olmaları gerekmektedir (Artığ, 2016, s. 127).

2.3. Radyasyon Kaynakları

Aşağıdaki şekilde radyasyon kaynakları oransal olarak gösterilmektedir. Buna göre insanların maruz kaldığı radyasyonun yaklaşık yarısı evlerdeki radon bozunum ürünlerinden kaynaklanmaktadır. Toplamın %14'ünü tıbbı ışınlamalar; %1'den daha azını ise radyoaktif serpinti, mesleki ışınlama, nükleer endüstri ve tüketici ürünleri oluşturmaktadır (TAEK, 2009, s. 14).



Şekil 2.5. Maruz kalınan radyasyon kaynakları
Kaynak: (TAEK, 2009, s. 14)

2.3.1. Doğal Radyasyon Kaynakları

Kaynağı doğa olan radyasyonlar; güneşten ve yıldızlardan gelen kozmik ışınlar ile yer kabuğunda (kayaçlarda, taşta, toprakta, havada, suda, bitkilerde ve tüm canlılarda) bulunan doğal radyoaktif maddelerden yayılan ışınlardır. Güneş ve yıldızlardan kaynaklanan yüksek enerjili kozmik ışınların %93'ü hızlı protonlardan ve %6,3'ü ise alfa parçacıkları ve bir miktar da trityum ve karbon 14 çekirdeklerinden oluşmaktadır. Kozmik ışınlar atmosferdeki hava molekülleri ve atomlarla çarpışarak yeni çekirdekler üretip, enerjilerini giderek bunlara aktararak azaltır ya da yitirirler. Bunun sonucunda kozmik ışınlardan ikincil ve daha sonraki bir dizi tepkimelerle üretilen protonlar, nötronlar, elektronlar, mezonlar, gamalar gibi daha pek çok ışınlar yeryüzüne ulaşır (Atakan, 2014, s. 14).

Doğal radyasyon uzay kaynaklı kozmik radyasyon ve yer kabuğundaki radyoaktif izotoplardan gelen karasal radyasyon olmak üzere iki ana kaynaktan gelmektedir. Elektronlar, protonlar, helyum çekirdekleri ve daha az oranda olmak üzere yüksek enerjili fotonlar kozmik radyasyon kaynaklarıdır. Bu radyasyon tipleri enerjilerine bağlı olarak

atmosfer bileşenleriyle etkileşerek X ışını, müon, proton, alfa tanecikleri ve nötronlar gibi ikincil radyasyonlar meydana getirirler. Bunların yanı sıra atmosferde elementsel mutasyon yoluyla; ^{3}H, ^{7}Be, ^{14}C, ^{22}Na, ^{32}P, ve ^{33}S gibi yeni çekirdekler oluştururlar. (Akyıldırım, 2011, s. 3).

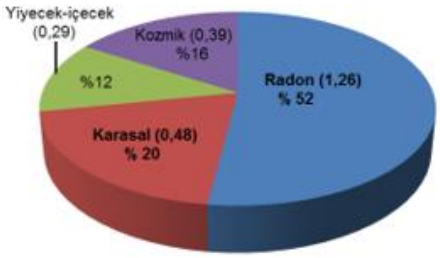
Dış kaynaklardan gelen doğal çevre radyasyonları; kozmik ışınlar, toprakta bulunan Potasyum-40, Toryum-232 ve Uranyumdan çıkan gama ışınlarıdır. Uranyumdan çıkan yüklü partiküllerle, kozmik ışınların etkisiyle yeryüzünden devamlı az miktarda oluşan C-14 ve H-3'den yayınlanan ışınlar havaya ve deriye girebilirler. Vücudumuzda bulunan potasyum, karbon ve hidrojen miktarları oldukça yüksektir. Toryum ve Uranyum da vücuda girerek burada dezentegrasyona uğrayarak kurşuna dönüşürken birçok radyoaktif element meydana getirirler. Radyoaktif çözülme sırasında ortaya çıkan bu ara ürünlerin pek çoğu vücuttan hızla geçip giderler ancak, bu ara elementlerden biri olan radyum kimyasal yönden kalsiyuma çok benzemektedir ve kemiklerde birikme eğilimindedir (Frigerio, 1971, s. 31).

Özetlemek gerekirse kozmik ışınların etkisiyle havadaki azot, oksijen, argon ve karbondioksit gibi maddelerden trityum ve C 14 gibi radyoizotoplar oluşmakta bunlar havadaki aerosollarla birlikte yeryüzüne serpilerek bitkiler ve hayvanlar yoluyla ya da doğrudan insana ulaşmaktadır. Diğer yandan topraktaki doğal potasyumdaki potasyum 40 radyoizotopu besinler yoluyla insan vücuduna girerek insanı içten ışınlamaktadır. Bunların yanında yerkabuğundaki Uranyum ve Toryum dizilerinden radyoaktif bozunum yoluyla oluşan radon ve toron asal gazları içindeki Rn 222 ve Rn 220 radyoizotopları atmosferde yükselerek yine radyoaktif bozunumla kuruşun ve bizmut gibi uzun yarılanma ömrü olan radyoizotoplara dönüşmektedir. Bunlar da havadaki taneciklere tutunarak tekrar yeryüzüne yağış ya da kuru serpintilerle inerek besinler yoluyla ya da doğrudan insanı ışınlamaktadır (Atakan, 2014, s. 17).

Yeryüzündeki bu doğal radyoaktivite konsantrasyonları bölgeden bölgeye değişmektedir. Özellikle fay kırıklarının olduğu ve termal suların bulunduğu çevrelerde doğal radyoaktivite konsantrasyonları daha yüksektir. Yerkabuğundaki doğal radyoaktivite düzeyi, toprağın jeolojik kökenine, toprak ve kayaçlardaki granit yapı miktarına ve volkanik alanlara göre değişiklik göstermektedir. Doğal radyonüklidler daha çok granit, volkanik, tortul ve fosfat kayalarda yüksek konsantrasyonlarda bulunmaktadır. Volkanik kayaların aktiviteleri tortul kayalardakinden daha fazladır (Kuş, 2017, s. 14).

Topraktaki radyoaktivite, bulunduğu yer ve toprak derinliğine göre önemli farklılıklar göstermektedir. Topraktaki doğal radyoizotoplar (^{238}U, ^{232}Th, ^{40}K ve ^{226} Ra) toprakta bulunma oranlarına bağlı olarak, o çevrenin doğal radyasyon temel seviyesini belirlemekte ve belli oranlarda insanların doğal radyasyona maruz kalmalarına sebep olmaktadır (Kuş, 2017, s. 15).

Doğal radyasyon kaynakları içerisinde maruz kalınan yıllık ortalama dozun yarısından fazlası (%52) radon gazından kaynaklanmaktadır. Diğer radyasyon kaynakları sırasıyla; karasal gama radyasyonları, kozmik radyasyonlar ile yiyecek ve içeceklerden kaynaklanan radyasyondur. Aşağıdaki şekilde doğal kaynaklardan alınan yıllık efektif dozlar ve oransal değerleri görülmektedir (Taşkın, 2018, s. 11).



Şekil 2.6. Dünya genelinde doğal radyasyon kaynaklarından alınan ortalama yıllık dozlar ve oransal değerleri
Kaynak: (Taşkın, 2018, s. 11)

2.3.2. Yapay Radyasyon Kaynakları

Doğal radyasyonların yanında hızla ilerleyen teknolojinin getirdiği insan yapısı (yapay) radyasyon kaynakları da mevcuttur. Bunlardan en önemlileri; nükleer bomba denemelerinden kaynaklanan radyoaktif serpintiler, nükleer reaktörlerin işletilmesi sırasında ortaya çıkan radyoaktif maddeler, tıpta uygulanan iyonlaştırıcı radyasyon kaynakları, çeşitli aygıtlarda kullanılan radyoaktif kaynaklar (Gece görünür saatler, yangında duman uyarıcılar gibi)'dır (Atakan, 2014, s. 21).

Gündelik yaşamımızda kullandığımız çeşitli ürünlerde radyasyon kaynakları bulunabilmektedir. Bunlardan bazıları fosforlu saatler, tütün, televizyonlar, floresan lambaların başlatıcıları, x-ışını güvenlik sistemleri, gaz ve kömür gibi yakıtlar, fener mantoları, yapı ve yol inşaat malzemeleri olarak sayılabilir. Bu ürünlerdeki radyasyon

miktarı medikal kaynaklarla kıyaslandığında sebep oldukları radyasyon maruziyeti yok denecek kadar azdır (Demiryuğuran, 2018, s. 22).

Yapay radyasyon kaynakları arasında; nükleer endüstrinin radyoaktif atıklarının salımı, endüstriyel gama ışınları, tıpta kullanılan x ışınları, bilgisayarlı tomografi aletleri, nükleer silah denemelerinden kaynaklanan atmosferdeki radyoaktif serpintiler ve bazı tüketici ürünleri sayılabilir (TAEK, 2009, s. 13). Tüplü televizyonlarda tüplerdeki filamandan çıkan elektronlar bir elektrik voltajı etkisiyle hızla ileri atılırlar ve televizyon tüpünün fosforla kaplı olan iç yüzüne çarparak görülebilir resim meydana getirirler. Bu sistem aynı röntgen tüpü gibi çalışmaktadır; ancak, voltajın düşük olması, meydana gelen zayıf X ışınlarının plastik ve cam cidarlardan geçerek daha da hafiflemesi ve nihayet televizyonu seyredenlerin uzakta bulunması insanların alabileceği X ışınları miktarını oldukça önemsiz seviyelere düşürmektedir. Cep, kol ve duvar saatlerinin kadranlarını karanlıkta görünür hale getirmek için uzun yıllar radyum içeren çeşitli boyalar kullanılmıştır. Bunun yanında günlük hayatta kullanılan uranyum bileşikleri içeren sır maddeleri ile kaplanmış banyo, lavabo vs. takımları da radyasyon içermektedir (Frigerio, 1971, s. 34-35).

Radyoaktif serpintinin başlıca tehlikesi alınan total dozdan çok serpintiyi meydana getiren nüklidlerin özellik ve çeşitleri ile ilgilidir. Nüklitlerin her biri normal olarak vücutta bulunan elementler gibi hareket ederek kritik organ ve dokulara yerleşirler ve ortalama dozların yapacağı etkiden çok daha büyük ölçülerde zarara neden olurlar. Örneğin, Sr-89 ve Sr-90 özellikleri bakımından kalsiyuma benzer ve aynı kalsiyum gibi kemiklere yerleşme eğilimi gösterirler. I-131 de kararlı veya sabit İyot gibi tiroid ve tükürük bezlerine yerleşir. Pu-239, yine çok önemli doku ve organlara ve kemiklere yerleşir. Carbon-14 de normal karbon gibi davranarak vücudumuzdaki hücrelerin nükleusundaki kritik DNA molekülleri içerisine yerleşir (Frigerio, 1971, s. 37).

1945 ila 1989 yılları arasında dünyada yaklaşık 420 adet yerüstü ve 1050 kadar da yeraltı nükleer bomba denemesi yapılmıştır. Nükleer bombalar atom çekirdeklerinin parçalanması ya da çekirdeklerin çok yüksek sıcaklıkta kaynaştırılması olaylarına dayanmaktadır. Atom bombasında uranyum 235 veya plütonyum 239 çekirdekleri bölünürken ortaya çıkan nötronlar başka çekirdekleri parçalayarak zincirleme tepkimeler sonucunda çok büyük bir enerji, ışın, ısı ve basınç dalgası şeklinde yayılmaktadır. Çekirdek bölünmesinde ortaya çıkan birçok radyoizotoptan alfa, beta, gama iyonlaştırıcı ışınlar salınmaktadır. Çekirdek kaynaşmasında ise döteryum veya trityum nötronlarla kaynaşarak helyuma dönüşmektedir. Yerüstü nükleer bomba denemeleri sırasında ortaya çıkan

radyoizotoplar atmosfere ulaştıktan sonra hava akımlarıyla dünyanın çeşitli bölgelerine yağışlarla veya kuru serpintilerle inerler. Bunlar yeryüzündeki toprak ve sulara bulaşarak solunum ve besinler yoluyla insan vücuduna girdiği gibi; dıştan da Zr 95, Ru 103, Ba 140 gibi radyoizotoplarla çok daha uzun yarılanma süreli Cs 137, ve Sr 90 gibi olanlardan kaynaklanan gama ve beta ışınları yoluyla etkilemektedir (Atakan, 2014, s. 21-22).

Birçok farklı endüstride radyasyon kaynakları sıklıkla kullanılmaktadır. Sözgelimi, çelik ve kâğıt üretiminde kalınlığı ayarlamak için radyonüklit kalınlık iğneleri kullanılmaktadır. Çimento ve kâğıt üretiminde büyük kütleli karışımların kontrolünde, otomotiv sektöründe parça aşınmaları ilgili testlerde, kömür endüstrisinde kömürde bulunan asit yağmurlarına neden olan kükürt ve azot miktarlarının ölçülmesinde, inşaat sektöründe kabloların taşıdığı beton köprülerde mukavemet ölçümleri için radyonüklitler kullanılmaktadır. Bunların yanında nükleer ölçüm aygıtları kayaların yoğunluk ve kimyasal elementlerini saptamakta kullanılmaktadır. Benzer aygıtlarla petrol ve maden aramaları da yapılmaktadır. Çok farklı uygulamalarda, mesela fosillerin yaşının belirlenmesinde, Karbon-14 ile yaş tayini yöntemi uygulanmaktadır (Demiryuğuran, 2018, s. 20).

Tarım sektöründe, radyoaktif çekirdekler sıklıkla ve çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Söz gelimi, gübreleme miktarının en uygun hale getirilmesi için radyonüklitler kullanılmaktadır. Radyoaktif çekirdekler eklenmiş gübrelerin takibi ile her bitkiye gerektiği kadar gübre verilmesi olanaklı hale gelmiştir. Sulama düzeni için de tarım arazisindeki toprağın su ihtiyacı nötron kaynakları kullanılarak belirlenmektedir. Tarımda kullanılan kimyasalların miktarının uygunluk kontrolü için radyoaktif izotoplar kullanılmaktadır. Bazı tarıma zararlı böcek türlerinin erkek cinsleri ışınlanarak çoğalmalarının önüne geçilmektedir. Üretim kalitesini artırmak adına tohumların mutasyon geçirmeleri sağlanmaktadır. Bu amaçla en çok kullanılan radyasyon tipleri x-ışını, gama ışını ve hızlı nötronlardır. Yiyeceklerin üretilmesinden sonra korunması için de radyasyon kullanılır. Dünyada birçok ülkede, bozulmalarının önüne geçmek için farklı besinler radyasyonla ışınlanmaktadır (Demiryuğuran, 2018, s. 21).

Tıpta da tanı amacıyla vücudun belli bir organı veya bölgesi röntgen ışınlarına tabi tutulmaktadır. Röntgen ışınları maddenin yoğunluğuna göre az ya da çok geçirgen olduklarından örneğin bir akciğer röntgeninde kaburga kemiklerinde daha çok tutulan ışınlar arkadaki bir filmde çevrelerindeki daha az yoğunluktaki et dokulara oranla daha açık, silik bir görüntü oluşturur. Böylelikle ilgili organdaki önemli bir bozukluk veya hasar ortaya çıkarılabilir. Tıpta tedavi amacıyla da radyasyon kullanılmaktadır. Vücut dokularında ortaya

çıkan kötü huylu belirli bir ur, röntgen ışınlarına, yüksek enerjili gama ışınlarına ya da çok hızlandırılmış atom çekirdeklerine tutularak ortadan kaldırılabilir (Atakan, 2014, s. 22-23).

2.4. Radyasyondan Korunma

Günümüzde radyoaktif maddelerin kullanılması yaygın bir gelişme göstermekte ve bu maddelerin uygulama alanlarına sürekli yenileri de eklenmektedir. Bugün için radyoaktif izotoplardan tıp, endüstri, tarım, hayvancılık, arkeoloji gibi birçok alanda faydalanılmaktadır. Bunların yanı sıra dünyada gün geçtikçe artan enerji ihtiyacını karşılamak için de nükleer enerjinin kullanımı artmaktadır. Bunun sonucu insanlar ve diğer canlılar giderek daha fazla çeşitli radyasyonlara maruz kalmaktadır. Radyasyon iyonlaşmalar ve diğer olaylar neticesinde ciddi ölçüde biyolojik etkiler yaratmaktadır (Bayvas, 1989, s. 68).

Radyasyonun etkilerinden bir kısmı herhangi bir eşik dozu almadan meydana gelebilmektedir, bu tür radyasyon etkilerine stokastik etkiler denir. Bununla beraber, belirli bir eşik dozunun üzerinde radyasyona maruz kalınmasına ve ciddiyeti radyasyon dozuna bağlı olarak değişen radyasyon etkilerine belirleyici etkiler denilmektedir. Radyasyondan korunmanın amacı deterministik radyasyon etkilerinin meydana gelmesini önlemek, stokastik etkilerin meydana geliş olasılıklarını ise kabul edilebilir bir düzeye indirmektir (Gülbiçim, 2015, s. 13).

Nükleer radyasyondan korunmada en önemli üç temel faktör; zaman, yani radyasyon kaynağı yakınında çok az zaman geçirmek; mesafe yani radyasyon kaynağından olabildiğince uzaklaşmak ve maddesel ortamla korunma yani zırhlamadır (Şeker & Çerezci, 2000, s. 123).

Yüklü radyasyon partiküllerine karşı bir zırh (kalkan) aracılığı ile korunma oldukça kolaydır çünkü yüklü partiküllerle cisimler arasında karşılıklı etki çok tesirlidir. Gerçekten ince metal levhalar, kâğıt hatta hava ekseriya radyasyonları tamamen engeller veya tutar. Buna karşılık X ışınları, gama fotonları ve nötronları durumu farklıdır. Bu ışınların madde tarafından tamamen tutulması ve yutulması mümkün olmadığından belirli bir radyasyon için zırh maddesinin kabiliyeti, yarı kalınlık değeri denilen bir terimle ifade edilmektedir (Frigerio, 1971, s. 29-30).

2.4.1. Mesafe Kuralı

Yüklü olan α ve β radyasyonlarının havada aldıkları ortalama serbest yol çok kısadır. Yüksüz olan nötron ve γ ise çok daha uzun yol alabilirler fakat şiddetlerinde azalma görülür. Bu kural da temelde kaynağa olan uzaklığın arttırılarak mümkün olduğunca az radyasyona maruz kalınmasını sağlamaktır (Kalyon, 2019, s. 10).

Bir radyasyon alanının şiddeti uzaklığın karesi ile ters orantılı olarak azalır. Bu yüzden mesafe etkin bir koruma yöntemidir. Küçük kaynaktan 2,3, 4, 5, vs. mesafelerde ölçülen radyasyon dozu sırasıyla orijinal kaynaktan bir metre mesafeden ölçülen doza nazaran 1:4, 1:9, 1:16, 1:25 şeklinde azalmaktadır (Frigerio, 1971, s. 29). Söz gelimi, bir iyonlaştırıcı radyasyon kaynağı 1 metre mesafede 1 R'lik radyasyon oluşturuyorsa 4 metre mesafede 0,13 değerine düşer. Yani şiddeti 1/16 kat azalır (Şeker & Çerezci, 2000, s. 130).

R yarıçaplı bir kürenin merkezinde saniyede n sayıda foton yayınlayan bir nokta kaynak varsa kürenin yüzeyindeki akı kaynaktan olan uzaklığın karesiyle ters orantılıdır. Ters kare olarak bilinen bu kanun kaynağın nokta kaynak olması durumunda yani kaynağın boyutlarının, kaynakla nokta arasındaki uzaklık ile karşılaştırıldığında ihmal edilecek kadar küçük olması durumunda geçerlidir. Belirli bir uzaklıktaki doz hızı değeri biliniyorsa boşluk veya havadaki başka bir uzaklık için doz hızı değeri uzaklığın kareleriyle ters orantılı olarak hesaplanır (Karakuza, 2007, s. 26).

2.4.2. Zaman Kuralı

Radyasyonla yapılan işlemlerde alınan doz; doz hızı ile zamanın çarpımıdır. Zaman ne kadar çok artarsa alınan dozda o kadar artar. Bu bağıntıdan radyasyon alanında ne kadar az süre kalınırsa o kadar az doz alınmaktadır. Radyoaktif kaynağın ve cihazın yanında ne kadar kısa sürede işlem tamamlanırsa alınan doz o kadar az olacaktır. Doz hızının önceden bilinmesi ile bu bölümde çalışacak personelin ne kadar zaman çalışmasına izin verileceği belirlenir (Kaçar, 2006, s. 24).

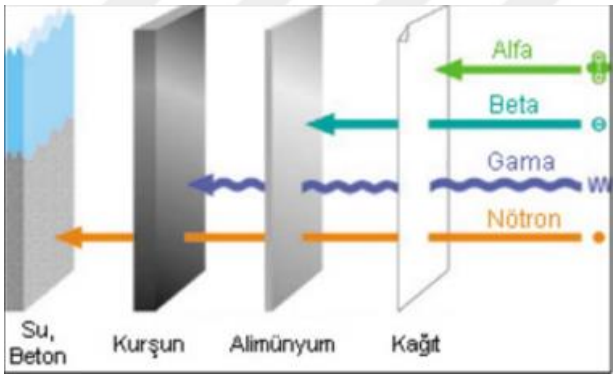
2.4.3. Zırhlama Kuralı

Zırhlama, korunmak istenen canlı veya cansız sistem ile radyasyon kaynağı arasına yerleştirilen engel olarak ifade edilmektedir. Burada amaç radyasyonu durdurmak ya da makul seviyelere indirmektir. Zaman ve mesafe çeşitli zorunluluklardan dolayı belirli bir

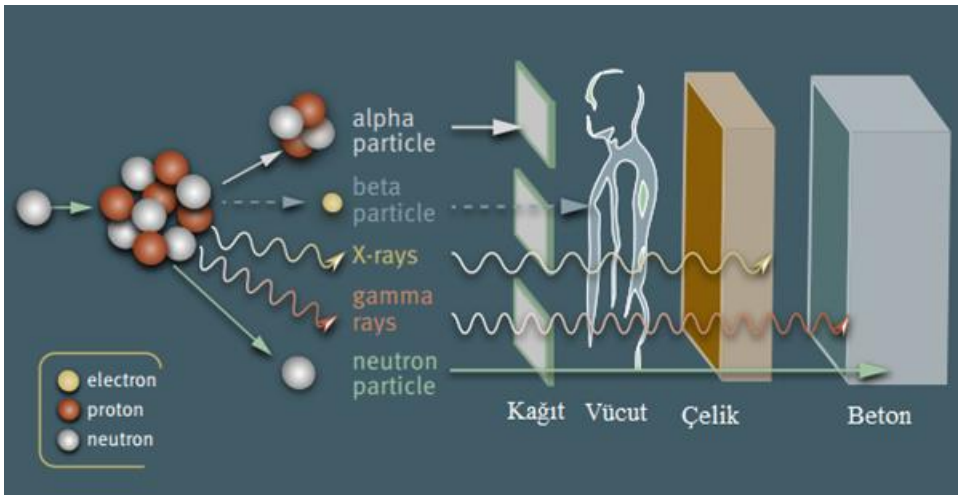
seviyenin altına indirilemez. Bu noktada değiştirilebilecek tek faktör zırh malzemesidir. Bu yüzden iyi bir zırh malzemesi geliştirmek oldukça önemlidir. Radyasyon zırhı olarak kullanılan malzemeler incelendiğinde özellikle; beton, kurşun levha ve camlar gibi üç malzeme grubu öne çıkmaktadır (Akıllı, 2019, s. 16-17).

Zırh maddesinin radyasyonu tutma veya yutma kabiliyeti yarı kalınlık değeriyle ifade edilmektedir. Bir maddenin yarı kalınlık değeri, gelen radyasyon şiddetini yarı yarıya azaltmak için gerekli kalınlıktır. Bir maddenin zırh kalınlığı iki misline çıkarılırsa zırh maddesinin öte yanına geçebilen radyasyon 1:4, üç misline çıkarılırsa radyasyon şiddeti 1:8, dört misline çıkarılırsa 1:16 oranında zırhlanmış veya tutulmuş olur. Kobalt-60'dan çıkan gama ışınlarına karşı kurşunun yarı kalınlık değeri yaklaşık olarak 1 cm'dir. Aynı ışınlara karşı toprak ve suyun yarı kalınlık değerleri ise yine yaklaşık olarak 5 cm'dir (Frigerio, 1971, s. 30).

Kişisel korunmanın sağlanabilmesi için genellikle kurşun içeren önlükler kullanılması gerekir. Bu önlükler, kurşun tozu içeren plastik malzemelerden ve genellikle 0.3mm ile 0.5mm arasında değişen kalınlıklardaki kurşun eş değerinde üretilirler (Helvacı, 2011, s. 28).



Şekil 2.7. Giriciliklerine göre iyonlaştırıcı radyasyonlar
Kaynak: (Kalyon, 2019, s. 12)



Şekil 2.8. Farklı radyasyon tiplerinin giricilik gücü
Kaynak: (UNEP, 2016, s. 9)

Zırhlama sonrası radyasyon şiddetindeki değişim zırhlama öncesi şiddetle ve zırh malzemesinin kalınlığıyla doğru orantılıdır ve azaldığı için negatif işaretlidir. Radyasyon zırhlamasında kullanılan malzemenin önündeki yani kaynaktan gelen radyasyonun şiddetinin, malzemenin arkasındaki radyasyon şiddetinden büyük olması sağlanır. Bu durum radyasyonun çeşidinden bağımsız üstel bir ifade olan Beer-Lambert yasasıyla ifade edilir (Kalyon, 2019, s. 12-13).

2.4.3.1. Beton

Genel olarak beton çimento, agrega (ince ve iri), su ve mevcut özelliklerini iyileştirmek amacıyla gerektiğinde katkı malzemelerinin belirli oranlarda homojen bir şekilde karıştırılmasıyla elde edilen kompozit bir yapı malzemesidir. Betondan beklenen en önemli özellik dayanımından ziyade mukavemettir olarak arşımıza çıkmaktadır. Beton gevrek bir malzemesi olduğu için dayanıklılık değeri içinde en yükseği basınç, en düşüğü ise çekmedir. Basınç dayanımı, betonun diğer tüm pozitif özellikleriyle paralellik içerisindedir. Basınç dayanımı yüksek olan beton dolu, sert, dış etkilere karşı dayanıklı, su geçirmez ve aşınmazdır. Basınç dayanımı, numunenin şekli ve boyutları, numunenin yaşı ve su-çimento oranı gibi faktörlere bağlıdır. Basınç dayanımı, 15 cm çapında, 30 cm yüksekliğinde standart silindirler ile veya 15 cm kenar uzunluğuna sahip küpler ile belirlenir. Betonun sınıfı üretimden 28 gün sonraki mukavemet ile belirlenir. Minimum 3 numunenin basınç mukavemeti ortalaması alınarak elde edilen değer, beton sınıflarının mukavemet değerleri ile karşılaştırılarak betonun sınıfı belirlenir (Kalyon, 2019, s. 18).

Betonlar yoğunluklarına göre hafif ya da ağır beton olarak sınıflandırılmaktadır. Hafif betonlar yoğunlukları 800 kg/m^3 ile 2000 kg/m^3 arasında olan betonlardır. Hafif beton, birim hacim ağırlığı (yoğunluğu) az, yüksek yalıtımlı, yeterli dayanıma sahip ve yanmaz bir madde olup gelecek için mimari açıdan çok önemlidir. Normal betondan farklı olarak sağladığı ısı yalıtımı ile beraber hafif olmasını sağlayan boşluklara sahiptir. Bu boşluklar, boşluklu agrega (bims, ponza taşı, cüruf, perlit vb.) kullanılmasından, içyapıda boşluk oluşturulmasından ya da harçta gaz kabarcıkları oluşturulmasından kaynaklıdır (Topçu, 2006, s. 183-185).

Beton iyi bir radyasyon zırhlama özelliği gösterdiği için radyasyonla çalışan yerlerde yapı malzemesi olarak sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle gama ve X-ışını zırhlamasında zırh malzemesinin yoğunluğu ne kadar yüksek olursa zırhlama özelliği de o derece artmaktadır. Bu nedenle, zırh malzemesi olarak kullanılan betonlar ağır beton olmalıdır. Bunu sağlamak için de bu tür betonlarda yüksek yoğunluklu agrega kullanılmaktadır. Böylece geleneksel betonla aynı zırhlama derecesinde çok daha ince kalınlıklar sağlanabilmektedir.

2.4.3.2. Kurşun Levha

Yüksek atom numarası ve yüksek yoğunluğa sahip olan kurşun radyasyona karşı en iyi koruyucu elementlerden biridir. Aynı zamanda da düşük maliyeti de yaygın kullanımında önemli bir faktördür. Bununla birlikte son yıllarda artan sağlıkla ve çevreyle ilgili kaygılar kurşunun bir zırh malzemesi olarak kullanımının kısıtlanması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır (Akıllı, 2019, s. 17).

2.4.3.3. Camlar

Camlar, radyasyon kalkanı olarak kullanılan, kurşun ve betona alternatif malzemelerdir. Camların beton ve kurşuna göre en büyük avantajları saydam olmaları ve böylelikle radyoaktif ortamda içeriyi görebilen bir pencere oluşturma fırsatı sunabilmeleridir. Camların aynı zamanda gözlük, ekran camı, kamera lensi şeklinde de kullanılabilir. Camların bir diğer avantajı ise çok bileşenli olarak hazırlanabilmeleridir. Cam sisteminin içine eklenebilecek farklı bileşenler sayesinde, camın istenilen özellikleri (optik, fiziksel, ısıl, kimyasal, zırhlama vb.) geliştirilerek zırhlama özellikleri ön plana çıkartılabilir (Akıllı, 2019, s. 17).

2.5. Zırhlama çin Kullanılan Cevherler

2.5.1. X- ve γ- Işınlarının Zırhlanması için Cevherler

2.5.1.1. Barit

Barit (BaSO4) baryum sülfattan oluşan en çok bilinen baryum mineralidir. Özgül ağırlığı 4,5 g/cm3, sertliği ise 2,5-3,5 arasındadır. Beyaz, opak veya yarı şeffaf görünümlüdür. İçerdiği demirden dolayı kırmızı ve kahverengi, karbonlu maddelerden dolayı siyah, sarı, kırmızı ve mavi renklerde görülebilir. Barit doğada kristal ve amorf yapılı olmak üzere iki şekilde bulunmaktadır. Bileşiminin % 94'ünü genellikle saf BaSO4, geri kalan kısmı ise silis, demir oksit ve prit teşkil etmektedir. (Artığ, 2016, s. 33-34).

Barit genelde beyaz renklidir bunun yanında farklı renklere de rastlamak mümkündür. Kimyasal simgesi $BaSO_4$ olup %65,7 Ba, %34, 30 oranında SO_3 içermektedir. Erime noktası 1580^0C olan element suda hemen hemen hiç erimemektedir. Soğuk asit içinde erimez ancak, kaynayan sülfürik asit içinde erime özelliği gösterebilir. (Coşkun, 2010, s. 17).

Metalik olmayan mineraller içinde en ağırı olan barit yüksek yoğunluğu, az aşındırıcı olması, yüksek ısı, sıcaklık ve basınçta kimyasal yapısının bozulmaması ve manyetik özelliklere sahip olmaması, su ve asidik ortamlarda çözünürlüğünün düşük olması, düşük ve uygun maliyetlerde elde edilebilir olması gibi özellikleri ile birçok endüstri kolunda yaygın olarak kullanılmaktadır (MTA, 2019).



Şekil 2.9. Barit cevheri
Kaynak:(http://www.fabreminerals.com/LargePhoto.php?FILE=specimens/s_imagesG3/MT98G3f.jpg&CODE=MT98G3&NAME=Barite&LANG=EN)

2.5.1.2. Selestit

Metalik stronsiyum ve stronsiyum karbonat (SrCO3), stronsiyum nitrat (Sr(NO3)2), stronsiyum klorür (SrCl2), stronsiyum hidroksit (Sr(OH)2) gibi stronsiyum kimyasalları, selestit (SrSO4) ve stronsiyanit (SrCO3) adı verilen minerallerden üretilmektedir. Selestitin eş anlamlısı selestindir ve Uluslararası Mineraloji Derneği tarafından onaylanmış bir kristal

ismi olarak da selestin kullanılmaktadır. Stronsiyanit cevherinde Sr minerali oranı daha yüksektir. Ancak stronsiyanitin içerisinde kalsiyumun varlığı endüstriyel olarak kullanımını kısıtlamaktadır. Selestit cevherinin ekonomik değerinin yüksek olması düşük safsızlık içeriğine dayanmaktadır. Selestitin endüstriyel açıdan kullanılması için en az %90 oranında SrSO4 minerali içermesi gerekmektedir. Saf selestit renksizdir ve ona rengini veren kristallerdeki diğer minerallerin safsızlıklarıdır. (Habashi 1997; Carrillo 1995; De Buda 1987). Türkiye ve Dünya'da selestit zenginleştirme işlemleri genellikle fiziksel ve fizikokimyasal yöntemlerle yapılmaktadır (Ober 2002).

Türkiye, İspanya ve Kanada'da bulunan selestit rezervleri tenör açısından %90'dan daha yüksek SrSO4 içermektedir. Ülkemizde selestitin en yoğun rezevleri Sivas ilinde bulunur ve İstanbul Barit Maden Türk Şirketi tarafından sallantılı masa, sarsıntılı elek sistemi gibi fiziksel yollarla zenginleştirilerek endüstriyel alanlarda kullanmak üzere %95-96 tenör oranında SrSO4 içeren selestit piyasaya sürülmektedir (Sezer 2017).

Selestit cevherinin yoğunluğu 3.90-4.00 g/cm3 aralığında olup sertliği Mohs skalasına göre 3-3.5 arasındadır. Selestit cevherlerine ait maden yatağı oluşumları çoğunlukla sedimanter kökenlidir ve genellikle kaya tuzu ve jips ile birlikte bulunmaktadır (Bulatovic 2007).

Stronsiyum bileşikleri günümüzde en çok manyetik malzemelerin üretiminde kullanılmaktadır. Stronsiyanitin (SrCO3) kullanım alanı renkli televizyon tüpleri, seramik ferrit mıknatıs üretiminde ve çinko elektrolitin saflaştırılmasında kullanılır. Bununla birlikte; elektronik, seramik, elektrokimya, radyo-opak cam, hava fişek, mastır alaşım, fosforesans malzeme ve korozyona dirençli boya üretiminde, şeker ve yağ sanayisinde kullanılmaktadır. Ayrıca çinko çözeltilerinin rafinasyonunda ve seramik sırlarında parlaklık arttırıcı olarak da kullanılmaktadır (Carrillo 1995; Rapor 2001; Ober 2006; Han et al. 2008; Zorağa 2009).



Şekil 2.10. Selestit cevheri
Kaynak: (http://baritmaden.com/urun/selestit/)

2.5.1.3. Manyetit

Manyetit magma (Fe3O4), Fe+2 ve Fe+3 iyonlarını birlikte içeren doğada en çok oksitli olarak bulunan ferromanyetik bir mineraldir. Manyetitin kristal sistemi kübik, kristal biçimi çoğunlukla oktahedral kristalli ve yoğunluğu 5.175-5.197 g/cm³'tür. Demir siyahı, grimsi siyah ve opak şeklindedir (Bakırhan, 2017, s. 18). En yaygın olarak çıkarılan ve yaklaşık olarak %72 ile en yüksek demir içeriğine sahip cevherdir. Ancak 570oC'den sonra bu manyetik özelliğini kaybeder (Coşkun, 2010, s. 16).

Demirin indirgenmesi oksitli halde bulunan maddelerin demirden daha yüksek oksijen yakınlığı olan CO, H_2 C gibi bazı indirgeyiciler yardımıyla yapısındaki oksijeni azaltarak alt oksitlerine ya da tamamen metalik hale dönüşmesi ile gerçekleşir (Işıkgül, 2012). Manyetit havada serbest halde bulunan nem ve oksijen sayesinde kolayca oksitlenir (Artığ, 2016, s. 34). 5,5 ve 6,5 derecesinde sertliğe ve 5,2 kg/dm^3, özgül ağırlığa sahip olan manyetit cevheri metalik parlaklığındadır. Manyetit demir cevherleri arasında en yüksek yoğunluğa ve en yaygın kullanıma sahip olan önemli bir madendir (Coşkun, 2010, s. 16).



Şekil 2.11. Manyetit cevheri
Kaynak: (Bakırhan, 2017, s. 18)

2.5.1.4. Hematit

Hematit yaklaşık olarak %70 demir içeriği ile doğada yaygın bulunan, ağır ve sert oksit minerali olan ferrik oksit (Fe2O3) diye bilinen bir demir cevheridir. Manyetik duyarlılıkları zayıftır. Hidrotermal damarlarda ve magmatik kayalarda aksesuar minerali olarak bulunabilir. Volkanik kayalarda, birçok metaformik kayada, kontakt metamorfik yataklarda, birincil veya ikincil olarak sedimanter kayalarda yaygın olarak oluşabilir. Yoğunluğu 5,26 g/cm3 ve sertliği 5-6 arasındadır. Çelik grisi, siyahi opak renge metalik parlaklığa sahiptir (MTA, 2019). Saf mineral içinde 5,26 kg/dm3 özgül ağırlığa sahip olan hematit açık kırmızıdan sönük kırmızıya hatta griye kadar faklı renklerde olabilir (Coşkun, 2010, s. 16). Doğada yaygın olarak bulunan esmer hematitler bileşiminde ortalama %60

oranında demir bulunan hidratlı oksitlerdir; kızıl hematitler ise genellikle karbonatlarla karışmış halde bulunur (Larousse, 1969, s. 5/767).



Şekil 2.12. Hematit Cevheri
Kaynak: (Artığ, 2016, s. 35); (Bakırhan, 2017, s. 17)

Hematit demir cevheri farklı endüstri kollarında farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Maliyetinin düşük, yoğunluğunun yüksek ve kristal bir yapıya sahip olmasından dolayı sondaj sıvılarında kullanılmaktadır. Ayrıca metalleri birleştirmek için elektrik ark kaynaklarında, atık su kimyasallarında demir oksit için arıtıcı olarak, demir eritme endüstrisinde, radyoaktif ve fotonlara karşı izole edilmiş bölme duvarlarda ve diğer birçok alanda kullanımı görülmektedir.

2.5.1.5. Limonit

Limonit demir cevherinin oksitli grubunda yer alır. Genellikle hematit ve götit gibi önemli miktarda demir oksit içeren v-bir cevherdir. Koyu kahverengi ile siyah renkli, mat, camsı parlaklıkta, çizgi rengi sarımsı kahverengi, yarı saydam amorf yapılı, manyetik, gevrek bir mineraldir. Sertliği 5-5,5 ve özgül ağırlığı 3,8-4,3 g/cm3' tür. Demir içeriği en çok %62,3'tür. Çoğu kez hematitle, kil mineralleri ve manganez oksitlerle karışık haldedir (Artığ, 2016, s. 34).

Limonit, dış hava şartlarına karşı çok dayanıklıdır ve genellikle artık tortu olarak biriken bir mineraldir. Manyetik duyarlılıkları zayıftır. Yapılan bazı araştırmalarda limonit, doğal olarak oluşan ve kristal olmayan ancak demir mineralleri içeren sulu demir oksitlerden oluşan bir mineraloid olarak tanımlanır. Genellikle sıcak ve nemli hava şartlarına sahip bölgelerin toprağı olan lateritik topraklarda görülür ve ana demirin renklendirici formu olarak karşımıza çıkmaktadır. Limonit genellikle hematit, manyetit, pirit ve diğer demir içeren malzemelerin ayrışmasından oluşan ikincil bir malzeme olarak ortaya çıkar (Limehouse, 2021).



Şekil 2.13. Limonit cevheri
Kaynak: (Bakırhan, 2017, s. 16)

2.5.1.6. Silis dumanı:

Silis dumanı silisyum metalinin veya ferrosilisyum alaşımların üretiminde bir yan ürün olarak elde edilen endüstriyel bir atıktır. Silis dumanı amorf silis içeren çok ince taneli bir yapıya sahip bir tozdur. Çok ince taneli oluşu ve gevşek birim ağırlığının azlığı sebebiyle taşıma, depolama ve harmanlama gibi işlemlerde özel dikkat gerektirir. Bunun yanında boşaltma sırasında toz halinde etrafa kolayca yayılabilir. Bu yüzden silis dumanı su ile harmanlanarak hamur halinde piyasaya arz edilerek amaca uygun kullanılabilir (Yeğinobalı, 2009, s. 7;13). Gri tonlarında farklı renklerde karşımıza çıkabilir. İçerdiği demir oksit oranına göre kahverengi gibi farklı renklerde de görülebilir (Keçeci, 2018, s. 26).

Silis dumanı inşaat sektöründe yüksek dayanımlı katkılı çimento ve betonların üretiminde sıklıkla kullanılan bir maddedir. Silis dumanı katkılı çimento ve betonlar yüksek dayanım ve dayanıklılık performansı gerektiren üst ve alt yapılar, barajlar, köprüler gibi özel dizayn gerektiren farklı amaçlar için kullanılmaktadır (Yeğinobalı, 2009, s. 3;8). Silis dumanı katılan çimento hamurunda belirli bir kıvam için gerekli su ihtiyacı, yapışkanlık, viskosite, terleme ve özellikle agrega ara yüzeyindeki içyapı değişikliğe yol açması sebebi ile kullanımı önem kazanmaktadır. Silis dumanının beton basınç dayanımına ve aderansa olan etkileri deneysel çalışmalarla desteklenmiş, basınç dayanımı için optimum silis oranının %15 olduğu ortaya konulmuştur (Keçeci, 2018).

Silis dumanı kullanımının avantajları (Sofyalı, 2015, s. 24):

- Yüksek basınç dayanımı sağlaması,
- Yüksek çekme dayanımı ve elastiklik modülü sağlaması,
- Tokluğu arttırması,
- Yüksek bağlayıcılık sağlaması,
- Gelişmiş durabilite özelliği, düşük geçirgenlik,

- Aşınma direncini arttırması,
- Klor, asit, nitrit ve sülfat gibi kimyasallara karşı üstün direnç.



Şekil 2.14. Silis dumanı
Kaynak: (Mutlu, 2020, s.25)

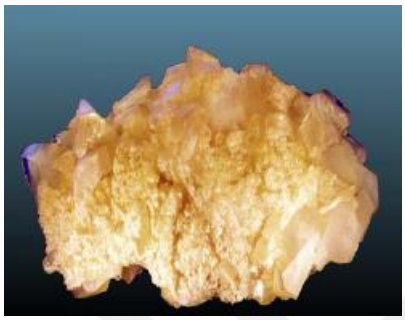
2.5.2. Nötron parçacıklarının zırhlanması için cevherler

2.5.2.1. Kolemanit

Bor, ısıl nötronları soğurmada yani nötron zırhlamasında en etkin ve en çok kullanılan malzemelerin başında gelmektedir (Akkaş, 2015, s. 39). Yerkabuğunda 51. yaygın element olarak boratlar ve borosilikatlar halinde yer alan Bor (B) elementinin atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 ve özgül ağırlığı 2.3-2.46'dır. Elementin amorf bir toz halindeki rengi koyu kahverengi ve çok gevrek; sert yapılı monoklinik kristal halinin rengi ise sarımsı kahverengidir. Ergime noktası yaklaşık olarak 2300 ^{0}C'dir (Özkan, Çebî, Delice, & Doğan, 1997, s. 224). Elektrik iletkenliği ısı ile çok artar, periyodik cetvelin üçüncü sırasında ametal olarak yalnız bor bulunur. Kimyasal özellikleri bakımından, karbon silisyum ve alüminyum gibi bazı metallere benzemektedir ametaller içinde en çok elektro pozitif olandır.

Bor cevherlerine örnek olarak kolemanit, üleksit ve tinkal cevherleri örnek olarak verilebilir. Hızlı nötronları kolemanitin etkisi içerdiği hidrojen nedeniyle olmaktadır, elementlerin hızlı nötron sormasında ise bor çekirdekleri, ancak nötron yavaşlaması, arttıkça etkili olmaktadır (Demir, 2009, s. 15;17-18). Türkiye dünya bor rezervlerinin %60'ına ve dünyadaki en büyük kolemanit yataklarına sahiptir (Topçu 2006). Türkiye tinkal, üleksit ve kolemanit konsantreleri üretip, Dünyaya satmaktadır. Türkiye bu satışlar ile dünya konsantre satışlarının (387.000 B_20_3) yaklaşık 80'nini karşılamaktadır. Diğer bir ifadeyle, Dünya üleksit ve kolemanit konsantresi talebinin hemen hemen tamamını Türkiye karşılamaktadır ve bu satışlar ile 85-90 milyon US $ gelir elde edilmektedir (Sapmaz 2001).

Ham bor ürünlerinden biri olan kolemanit konsantre ve öğütülmüş piyasata sunulmaktadır. Ham bor ürünleri % 90 dolayında borik asit, boraks penta ve dekahidrat gibi rafine bor ürünleri üretiminde kullanılmaktadır (Güyagüler 2001). Bunun yanısıra, çeşitli amaçlara yönelik cam elyafı (fiberglas), borosilikat cam, nükleer uygulamalar ve metalürjide kullanılmaktadır. Özellikle, kolemanit borlu çelik yapımında ve çelik üretiminde fluorit yerine tercih edilmeye başlanmıştır.

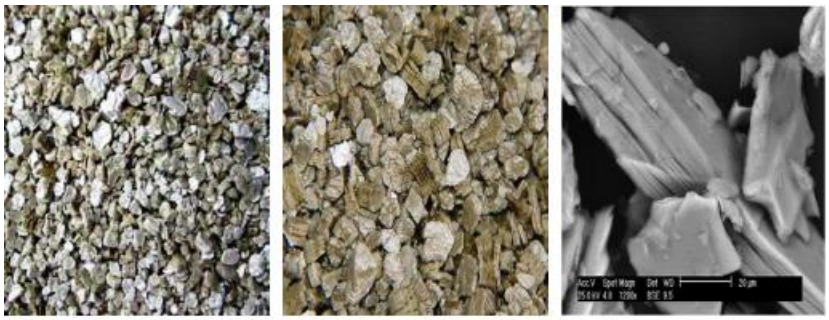


Şekil 2.15. Kolemanit Cevheri
Kaynak: (Mineral News, 2021)

2.5.2.2. Vermikülit

Vermikülit, mika grubundan flogopit türü inorganik bir mineraldir. Isıtılınca su kaybeder, hacmi çok artar ve solucanımsı bir şekil alır. Bu niteliklerinden dolayı termik yalıtkan olarak kullanılır (Larousse, Vermikülit, 1969, s. 12/577). Vermikülit, volkanik aktiviteler sonucu oluşan son derece hafif, çevreye zararsız, doğal bir mineral olup fiziksel olarak, mika grubu mineralleriyle benzer şekilde, elastik olmayan, ince esnek, levhalara ayrılabilen tipik bir klivaj yapısına sahiptir. Değişik oranlarda demir, magnezyum ve alüminyum içeren hidratlaşmış bir tabaka silikatıdır. Vermikülitin birim hücresinde su tabakasının bulunması nedeniyle ticari niteliğe sahiptir. Teorik olarak, saf vermikülit ilk hacminin 30 katına kadar genleşebilir (Gülbiçim, 2015, s. 23). Vermikülit, yeşil, sarımsı kahve ve hatta siyah renklerde olabilir ve düzenli bir dizilime sahiptir. Monoklinik sistemde kristallenir. Vermikülitin sertliği Mohs ölçeğine göre 1,2 ile 2,0 arasında değişirken, özgül ağırlığı ise 2,4-2,8 gr/cm3 aralığında değişmektedir (Nazlı, 2018, s. 12).

Vermikülitin yapı endüstrisinde yangına karşı ve ses, gürültüyü azalmak için izolasyon, sıva ve dolgu malzemesi olarak kullanılır. Tarım alanında hafif olması, nem ve hava dolaşımını sağlaması gibi birçok amaç için tercih edilmektedir.



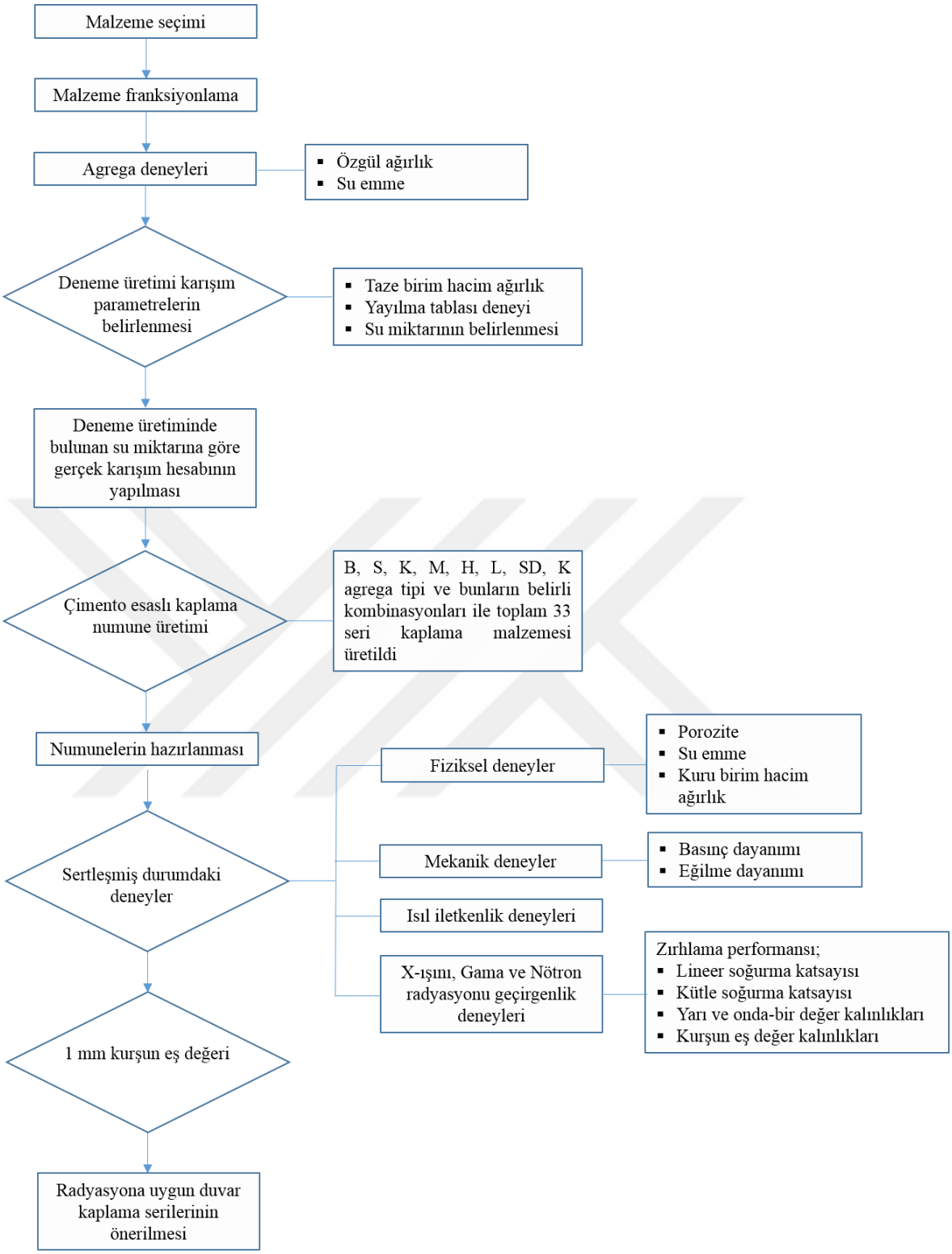
Şekil 2.16. Vermikülitin genleşmemiş hali, (b) genleşmiş hali, (c) parça hali
Kaynak: (Gülbiçim, 2015, s. 24)

3. MATERYAL ve YÖNTEM

B, S, K, M, H, L, SD ve V tipi agrega kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin radyasyon kalkanı özelliklerinin araştırılması amacıyla yapılan bu deneysel çalışma üç ana kısma ayrılmıştır. Birinci kısım deneme üretimi zırhlama amaçlı kullanılacak harç bileşenleri, dizaynı, üretimi, taze ve sertleşmiş mekanik özellikleri, ısıl iletkenlik katsayısının tespit edilmesi, ikinci kısım üretilen kaplama harçlarının radyasyon zayıflatma katsayılarının deneysel ve NISTXCOM programı ile teorik olarak elde edilmesi ve üçüncü aşama ise deney sonuçlarının analizini kapsamaktadır. Bu deneysel çalışmaya ait akış şeması Şekil 3.1'de verilmiştir.

Çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin üretiminde kullanılan çimentonun tipi, kimyasal katkı, agrega tipi ve tane boyutu, kullanılan agregaların oranı, üretim esnasında sıkıştırma yöntemi gibi birçok karışım parametresi vardır. Yapılan literatür taramasına göre birim ağırlığı yüksek olan malzemenin radyasyon tutuculuğa da yüksek olacağı tespitinden sonra üretilecek olan kaplama numunelerinin hangi yöntem ve hangi deneysel metotlar kullanarak bu sonuca ulaşabiliriz üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Bu bağlamda malzemenin birim ağırlığını artırmak için üretilen harç karışımları min. su ve min. boşluk düşünülerek karışım dizaynları yapılmıştır. Üretilen harç örnekleri tuğla üretiminde tuğlaya şekil vermek amacıyla yapılan presleme yöntemi ile yapılmasına karar verilerek üretim aşamasına geçilmiştir.

Çalışmada kullanılan agregalara fiziksel deneyler, üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerin sertleşmiş durumda birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilme dayanımı, ısıl iletkenlik ve radyasyon geçirgenlik özellikleri belirlenmiştir. Ayrıca üretilen her grubun oksit cinsinden element bileşenleri ve yüzdesi XCOM bilgisayar programına girilerek kaplama numunelerinin radyasyon soğurma özellikleri hesaplanmıştır. Son olarak üretilen numunelerin 1 mm kurşuna eş değer kalınlıkları belirlenmiştir.



Şekil 3.1. Deneysel çalışma akış şeması

3.1. Zırhlama kaplama malzemesi ve dizaynı

3.1.1. Çimento

Çalışmada Bartın Çimento Sanayi ve Ticaret A.Ş'nin 2020 Ekim ayında üretmiş olduğu CEM I 42,5 R Portland Çimentosu kullanılmıştır. Çimentoya ait fiziksel, kimyasal ve mekanik deneyler Bartın Çimento A.Ş. Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Çimentonun fiziksel ve mekanik özellikleri, kimyasal analiz sonuçları Çizelge 3.1'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. CEM I 42.5 R Portland çimentosunun özellikleri

Kimyasal		Fiziksel		
Oksit	Değer (%)	Deney adı		Değer
Toplam SiO_2	-	Özgül ağırlık, g/cm^3		3,1
Çözünmeyen kalıntı	-	Hacim genleşmesi, mm		1
SiO_2	19,94	S/Ç oranı, %		29,2
Al_2O_3	5,11	Priz süresi, dk	Başlama	270
Fe_2O_3	3,56		Bitiş	330
CaO	60,49	İncelik	Özgül yüzey, cm^2/g	3860
MgO	2,79		45 µ Elek, %	3
SO_3	3,49		90 µ Elek, %	0,1
Na_2O	0,38			
K_2O	0,92	Basınç dayanımı		Değer (MPa)
Cl-	0,032	1. gün		-
LOI	3,69	2. gün		32,7
Na_2O Eq,	-	7. gün		44,7
Serbest kireç	-	28. gün		56,5

3.1.2. Agrega

Bu deneysel çalışmada B, S, K, M, H, L, SD, V olmak üzere toplam 8 farklı agrega tipi kullanılmıştır. Harç üretiminde kullanılan B, S, M, H, L, V agregaları 0-1 mm boyutunda; SD baca tozu halinde ve K ise -0,75 mikron öğütülmüş olarak harç içerisinde kullanılmıştır.

3.1.2.1. Barit (B)

Çimento esaslı kaplama üretiminde kullanılan barit 0-10 mm boyutunda Isparta Şarkiağaç'ta üretim yapan Başer Madencilik Sanayi ve Ticaret A.Ş' den temin edilmiştir. Barite ait fiziksel ve kimyasal deneyler Yozgat Votorantim Çimento Fabrikası Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Barit cevherinin özellikleri

Kimyasal		Fiziksel	
Oksit	Değer (%)	Deney adı	Değer
SO_3	37,15	Yoğunluk, g/cm^3	3,15
Al_2O_3	0,26	Parçacık büyüklüğü, mm	0-3
CaO	9,82		
MgO	0,22		
Fe_2O_3	0,32		
Na_2O	0,044		
SiO_2	1,14		
SrO	46,18		
BaO	1,66		
Cr_2O_3	<0,010		
K_2O	0,058		
MnO	0,017		
P_2O_5	<0,010		
TiO_2	<0,010		
LOI	3,03		

3.1.2.2. Selestit (S)

Çalışmada kullanılan selestit 0-5 mm boyutunda Barit Maden Türk A.Ş. Sivas Konsantre Tesisi'nden temin edilmiştir. Selestite ait fiziksel ve kimyasal deneyler Argetest Cevher Zenginleştirme, Ar-Ge ve Analiz Hizmetleri Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 3.3'te verilmiştir.

Çizelge 3.3. Selestit cevherinin özellikleri

Kimyasal		Fiziksel	
Oksit	Değer (%)	Deney	Değer
SO_3	37,15	Yoğunluk, g/cm^3	3,15
Al_2O_3	0,26	Parçacık büyüklüğü, mm	0-1
CaO	9,82		
MgO	0,22		
Fe_2O_3	0,32		
Na_2O	0,044		
SiO_2	1,14		
SrO	46,18		
BaO	1,66		
Cr_2O_3	<0,010		
K_2O	0,058		
MnO	0,017		
P_2O_5	<0,010		
TiO_2	<0,010		
LOI	3,03		

3.1.2.3. Kolemanit (K)

Deneysel çalışmada kullanılan öğütülmüş kolemanit -75 mikron boyutunda Etimaden Balıkesir Bigadiç Bor İşletme Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Selestite ait fiziksel ve kimyasal deneyler Argetest Cevher Zenginleştirme, Ar-Ge ve Analiz Hizmetleri Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Sonuçlar Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Kolemanitin özellikleri

Kimyasal		Fiziksel	
Oksit	Değer (%)	Deney	Değer
SO_3	0,36	Yoğunluk, g/cm^3	2,44
Al_2O_3	0,26	Elek analizi	
CaO	59,56	Elek no	Değer (µm)
MgO	4,43	600	0
Fe_2O_3	0,14	250	0
Na_2O	0,35	150	0
SiO_2	7,73	-75	93,93
SrO	2,34	-45	77,73
BaO	0,082		
Cr_2O_3	<0,010		
K_2O	0,04		
MnO	0,025		
P_2O_5	0,02		
TiO_2	<0,010		
LOI (1050 °C)	24,63		

3.1.2.4. Manyetit (M)

Çalışmada kullanılan manyetit 0-10 mm boyutunda Sivas Erdemir Madencilik San. ve Tic. A.Ş. Divriği Sahası'ndan temin edilmiştir. Manyetite ait fiziksel ve kimyasal deneyler Yozgat Votorantim Çimento Fabrikası Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Deneysel sonuçlar Çizelge 3.5'te verilmiştir.

Çizelge 3.5. Manyetit cevherinin özellikleri

Kimyasal		Fiziksel	
Oksit	Değer (%)	Deney	Değer
SiO_2	22,86	Yoğunluk, g/cm^3	4,00
Al_2O_3	7,42	Parçacık büyüklüğü, mm	0-1
Fe_2O_3	55,04	Rutubet, %	1,80
CaO	2,27		
MgO	3,79		
Na_2O	0,32		
K_2O	3,22		
SO_3	0,05		
LOI	3,03		

3.1.2.5. Hematit (H)

Çimento esaslı kaplama üretiminde kullanılan hematit Hekimhan Madencilik İth. İhr. San. ve Tic. A.Ş. Karakuz Maden Sahası'ndan temin edilmiştir. Hematite ait fiziksel ve kimyasal deneyler Yozgat Votorantim Çimento Fabrikası Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Deneysel sonuçlar Çizelge 3.6'da verilmiştir.

Çizelge 3.6. Hematit cevherinin özellikleri

Kimyasal		Fiziksel	
Oksit	Değer (%)	Deney	Değer
SiO_2	19,68	Yoğunluk, g/cm^3	3,06
Al_2O_3	3,96	Parçacık büyüklüğü, mm	0-1
Fe_2O_3	65,19	Rutubet, %	2,50
CaO	0,38		
MgO	0,41		
Na_2O	0,18		
K_2O	1,26		
SO_3	0,03		
LOI	6,19		

3.1.2.6. Limonit (L)

Deneysel çalışmada kullanılan limonit Hekimhan Madencilik İth. İhr. San. ve Tic. A.Ş. Hekimhan Maden Sahası'ndan temin edilmiştir. Limonite ait fiziksel ve kimyasal deneyler Yozgat Votorantim Çimento Fabrikası Laboratuvarı'nda yapılmıştır. Deneysel sonuçlar Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.7. Limonit cevherinin özellikleri

Kimyasal		Fiziksel	
Oksit	Değer (%)	Deney	Değer
SiO_2	13,87	Yoğunluk, g/cm^3	3,05
Al_2O_3	3,43	Parçacık büyüklüğü, mm	0-1
Fe_2O_3	61,9	Rutubet, %	3,64
CaO	0,61		
MgO	0,00		
Na_2O	0,18		
K_2O	0,87		
SO_3	0,62		
LOI	11,63		

3.1.2.7. Silis dumanı (SD)

Çalışmada kullanılan Silis Dumanı Antalya Eti Elektrometalurji A.Ş.'den baca tozu halinde temin edilmiştir. Silis dumanına ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 3.8'de verilmiştir.

Çizelge 3.8. Silis dumanının özellikleri

Kimyasal		Fiziksel		
Oksit	Değer (%)	Deney	Değer	
SiO_2	77,30	Yoğunluk, g/cm^3	2,38	
Al_2O_3	7,27	İncelik, cm^2/g	15274	
Fe_2O_3	2,61	Rutubet, %	0,20	
CaO	1,01	Elek analizi		
K_2O	0,88	Elek no	Kule (%)	Baca (%)
MgO	13,52	+0,250	9,49	0,18
Na_2O	1,86	+0,125	37,53	0,73
SO_3	0,23	+0,074	27,82	0,57
LOI	-	+0,044	21,63	1,14
		-0,044	3,53	97,38

3.1.2.8. Vermikülit (V)

Çimento esaslı kaplama üretiminde kullanılan vermikülit Agrikal Tarım Ve Sanayi Mineralleri Ltd. Şti. Antalya Serik ilçesinden temin edilmiştir. Vermikülit termikal T0-1'e ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 3.9'da verilmiştir.

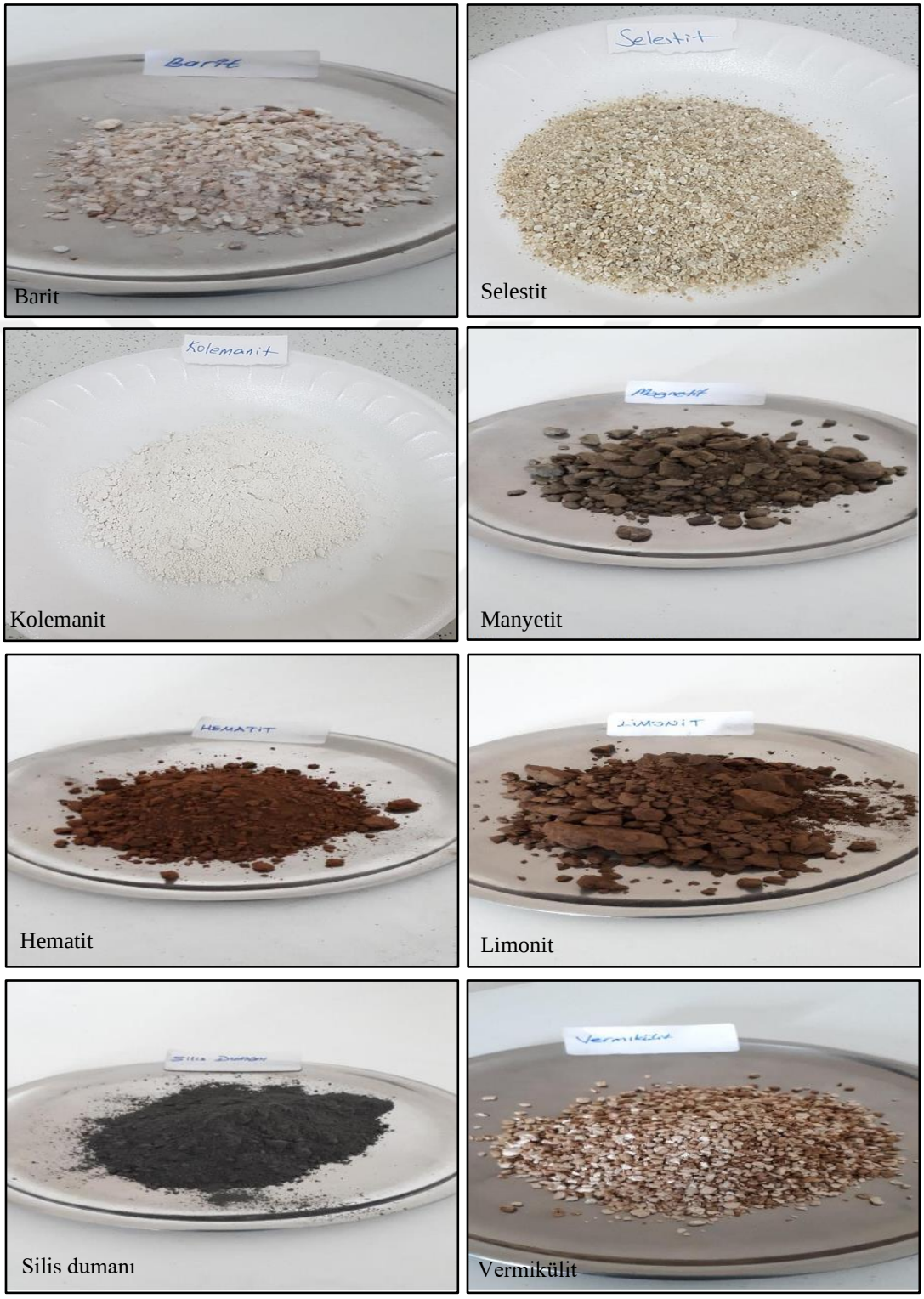
Çizelge 3.9. Vermikülitin özellikleri

Kimyasal		Fiziksel		
Oksit	Değer (%)	Deney	Değer	
SO_3	0,12	Yoğunluk, g/cm^3	2,60	
Al_2O_3	11,02	Renk	altın	
CaO	2,08	Şekil	akordeon	
MgO	26,47	Su tutma kapasitesi	Hacimce (%)	Ağırlıkça (g)
Fe_2O_3	6,05		20-50	5200-325
Na_2O	0,32	Katyon değişim oranı, me/100 g	50-150	
SiO_2	34,14	Isıl iletkenlik, watt/m/ °C	0,065-0,062	
SrO	0,038	Geçirgenlik, %	95	
BaO	0,042	Sintering point, °C	1150-1250	
Cr_2O_3	0,013	Ateşe dayanım	yanmaz	
K_2O	0,16	Özısı, Kcal/kg/ °C	0,20-0,26	
MnO	0,1	Elek analizi		
P_2O_5	0,17	Analiz parametreleri		
LOI	18,00	0,1-0,2 mm arası	0,72	
		0,2-0,5 mm arası	26,08	
		0,5-1 mm arası	62,40	
		1-2 mm	10,80	
		2<mm	0,00	

3.1.3. Agrega deneyleri

Çalışmada B, S, K, M, H, L, SD ve V olmak üzere toplam sekiz farklı malzeme ve bunların kendi aralarındaki kompozisyonları ile toplam 33 çimento esaslı kaplama harç numunesi üretilmiştir. Çalışma öncelikle kaplama malzemelerinin deneysel olarak elde edilmesi için ilk aşama olan deneme üretimi safhasıyla başlamıştır. Deneme üretimlerinde

yapılan ilk işlem ocaktan temin edilen iri agregalar (B, S, M, H, L) Argetest Cevher Zenginleştirme, Ar-Ge ve Analiz Hizmetleri Laboratuvarı'nda standartlara uygun bir şekilde 0-1 mm boyutuna getirilmiştir.



Şekil 3.2. B, S, K, M, H, L, SD ve V agrega tipi (öğütme işlemi öncesi)



Şekil 3.3. B, S, K, M, H, L, SD ve V agrega tipi (öğütme işlemi sonrası)



Şekil 3.4. Agrega fiziksel deneyler

TS EN 1097-6/ Mart 2002 (Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 6: Tane Yoğunluğu ve Su Emme Oranı Tayini) standardına göre agregaların yoğunluk ve su emme değerleri aşağıdaki eşitliklerden yararlanılarak hesaplanmıştır.

Görünür tane yoğunluğu:

$$\rho a = \frac{M4}{M4 - (M2 - M3)} \tag{3.1}$$

Etüvde kurutulmuş tane yoğunluğu:

$$\rho rd = \frac{M4}{[M1 - (M2 - M3)]} \tag{3.2}$$

Doygun ve yüzeyi kurutulmuş (DYK) tane yoğunluğu:

$$\rho ssd = \frac{M1}{[M1 - (M2 - M3)]} \tag{3.3}$$

Su emme oranı:

$$WA24 = \frac{M1 - M4}{M4} x100 \tag{3.4}$$

Burada:

M1: Doygun ve havada yüzeyi kurutulmuş agreganın kütlesi. g,

M2: Doygun agrega numunesini ihtiva eden piknometrenin kütlesi. g,

M3: Sadece su ile doldurulmuş piknometrenin kütlesi. g,

M4: Etüvde kurutulmuş deney numunesi kısmının kütlesi. g,

Çalışmada kullanılan agregaların incelik, boyut, yoğunluk, görünür yoğunluk ve su emme oranları tayini deney sonuçları Çizelge 3.10'da verilmiştir.

Çizelge 3.10. Agregaların fiziksel özellik deney sonuçları

Agrega	İncelik/Boyut	Yoğunluk (kg/m^3)		Görünür Yoğunluk (kg/m^3	Su Emme Oranı (%)
		Etüv Kur.	DYK		
Barit	0-1 mm	4,06	4,08	4,15	0,54
Selestit	0-1 mm	3,50	3,53	3,59	0,66
Kolemanit	Öğütülmüş	1,68	1,81	1,93	7,71
Manyetit	0-1 mm	3,49	3,52	3,61	0,97
Hematit	0-1 mm	3,54	3,69	4,19	4,41
Limonit	0-1 mm	2,91	3,09	3,54	6,02
Silis dumanı	Baca Tozu	-	-	2,52	-
Vermikülit	0-1 mm	0,33	1,08	1,45	233,33

* Deney sıcaklığında suyun yoğunluğu 1.00×103 kg/m^3 varsayılarak hesaplanmıştır.
** Su sıcaklığı 20 °C'ye göre hesaplanmıştır.

3.1.4. Katkı maddesi

Çalışmada kullanılan yüksek performanslı süper akışkanlaştırıcı Sika Viscocrete-PC 61 katkı maddesi Sika Yapı Kimyasalları A.Ş. Tuzla'dan temin edilmiştir. Yüksek oranda su azaltma özelliği ile yoğun, yüksek dayanımlı ve su geçirimsiz beton ve harç katkısıdır. PC 61 katkı maddesine ait fiziksel ve kimyasal özellikler Çizelge 3.11'de verilmiştir.

Çizelge 3.11. Sika Viscocrete PC 61 katkı maddesinin özellikleri

Özellik	Değer
Homojenlik	Homojen
Renk	Kahverengi likit
Efektif bileşen	-
Yoğunluk, g/cm³ (20°C)	1,0936
Katı madde yüzdesi, %	44,33
Ph, (%10'luk Çözelti)	2,92
Suda çözünebilen klor yüzdesi,%	0,016
Alkali yüzdesi, %(Na_2O'e ekivalendir,)	0,32
Korozyon davranışı	Etkisi yoktur

3.1.5. Karışım suyu

Deneysel çalışmada kullanılan karışım suyu Bartın 1. Organize Sanayi Bölgesi (OSB) içme-kullanma suyu kullanılmıştır. Bartın Halk Sağlığı Laboratuvarı ve Çevre Endüstriyel Analiz Laboratuvar Hizmetleri Tic. A.Ş. tarafından yapılan analiz sonuçları Çizelge 3.12'de verilmiştir.

Çizelge 3.12. Bartın 1. Organize Sanayi Bölgesi (OSB) suyunun özellikleri

Parametreler	Bulgu
Toplam organik karbon, mg/L	<1
Amonyum, mg/L	<0,02
Aluminyum, µg/L	<10
Demir, µg/L	<30
Sodyuım, mg/L	7,7
Mangan, µg/L	<3
Sülfat, mg/L	31
Klorür pH, mg/L	4,8
pH (25 °C)	7,25
Bulanıklık, NTU	<0,2
Renk, Pt-Co	<3
Permanganat indeksi, mgO_2/L (oksitlenebilirlik)	0,84
Toplam sertlik, $MgCaCO_2/L$	24,1
Toplam sertlik, °Fr (Fransız sertliği)	24,1
Toplam sertlik, °dH (Alman sertliği)	13,5
Koku	Kokusuz
Tat	Tatsız
İletkenlik, µS/cm (20 °C)	427

3.1.6. Deneme üretimi

Kaplama malzemesi üretiminde kullanılan agregaların kullanım yüzdesi karışım dizaynı Çizelge 3.13'te verilmiştir. Deneme üretimi için karışım hesapları TS 802 (Ocak 1985) beton karışım hesabı, TS EN 196-3 çimento harç deneyleri ve beton karışım literatürlerine uygun olarak hesaplanmıştır.

TS EN 12350-5/Nisan 2001 Taze Beton Deneyleri Yayılma Tablası Deneyi Ankara Oyak Beton Tesisleri'nde otomatik çimento mikserinde TS EN 196-1 çimento deney metoduna göre deneme üretimleri gerçekleştirilmiştir. 7 grupta toplam 33 farklı karışım bileşenleri dikkate alınmış ve her bir harç numunesi birbirinden bağımsız bir şekilde hazırlanmıştır.

Her bir kaplama harç numunesi için 0,5 dm^3 karışım hazırlanmış ve harçların yayılma değerleri 10-12 cm olacak şekilde karışıma su eklenmiştir. Yayılma değeri 10-12 cm'den fazla olan örnekler için su miktarı değiştirilerek deney tekrar edilmiştir. Burada yayılma

tablası deney sonucuna göre elde edilen su miktarı asıl hesaplarda kullanılmak üzere not edilmiştir. Üretilen çimento esaslı kaplama numunelerinin yayılma tablasındaki harç kıvamları Şekil 3.5 ile Şekil 3.11 arasında gösterilmiştir.

Karışımda kullanılan agregaların kullanım yüzdesi, karışım parametreleri, S/Ç oranı ve yayılma miktarı Çizelge 3.13'te verilmiştir. Yapılan ön deneme üretimlerine göre harcın yayılma değeri 10-12 cm aralığında olması için S/Ç oranı 0,35 olarak seçilmiştir. Üretilen kaplama numuneleri karışımda kullanılan malzemelerin teorik ve gerçek miktarları (kg), yayılma değerleri (mm), gerçek ve teorik BHA (kg/m^3) Çizelge 3.14 ve Çizelge 3.15'te verilmiştir.

Çizelge 3.13. Karışım bileşenlerin kullanım yüzdeleri ve karışım parametreleri

Karışım Grubu	Karışım Kodu	Karışım Bileşenleri	Karışımda Kullanılan Agrega Tipi Oranı (%)								Toplam	Kimyasal Katkı (%)	Mineral Katkı SD (%)	Hava Miktarı (dm^3)	S/Ç Oranı	Yayılma (mm)
			B	S	K	M	H	L	SD	V						
1. grup	G1	B	100	-	-	-	-	-	-	-	100	1,51	-	1	0,35	100-120
	G2	S	-	100	-	-	-	-	-	-	100	1,51	-	1	0,35	100-120
	G3	K	-	-	100	-	-	-	-	-	100	2,0	-	1	0,35	100-120
	G4	M	-	-	-	100	-	-	-	-	100	1,51	-	1	0,35	100-120
	G5	H	-	-	-	-	100	-	-	-	100	1,51	-	1	0,35	100-120
	G6	L	-	-	-	-	-	100	-	-	100	1,51	-	1	0,35	100-120
	G7	SD	-	-	-	-	-	-	100	-	100	2,0	-	1	0,35	100-120
	G8	V	-	-	-	-	-	-	-	100	100	1,51	-	1	0,35	100-120
2. grup	G9	B+%10SD	100	-	-	-	-	-	-	-	100	0,51	10	1	0,35	100-120
	G10	S+%10SD	-	100	-	-	-	-	-	-	100	1,02	10	1	0,35	100-120
	G11	K+%10SD	-	-	100	-	-	-	-	-	100	1,56	10	1	0,35	100-120
	G12	M+%10SD	-	-	-	100	-	-	-	-	100	1,02	10	1	0,35	100-120
	G13	H+%10SD	-	-	-	-	100	-	-	-	100	1,02	10	1	0,35	100-120
	G14	L+%10SD	-	-	-	-	-	100	-	-	100	1,02	10	1	0,35	100-120
3. grup	G15	B+S	50	50	-	-	-	-	-	-	100	1,51	-	1	0,35	100-120
	G16	B+K	50	-	50	-	-	-	-	-	100	2,0	-	1	0,35	100-120
	G17	B+M	50	-	-	50	-	-	-	-	100	1,51	-	1	0,35	100-120
	G18	B+H	50	-	-	-	50	-	-	-	100	1,51	-	1	0,35	100-120
	G19	B+L	50	-	-	-		50	-	-	100	1,51	-	1	0,35	100-120

Çizelge 3.13. (devam) Karışım bileşenlerin kullanım yüzdeleri ve karışım parametreleri

Karışım Grubu	Karışım Kodu	Karışım Bileşenleri	Karışımda Kullanılan Agrega Tipi Oranı (%)								Toplam	Kimyasal Katkı (%)	Mineral Katkı SD (%)	Hava Miktarı (dm^3)	S/Ç Oranı	Yayılma (mm)
			B	S	K	M	H	L	SD	V						
4. grup	G20	B+S+%10SD	67	33	-	-	-	-	-	-	100	0,51	10	1	0,35	100-120
	G21	B+K+%10SD	67	-	33	-	-	-	-	-	100	1,16	10	1	0,35	100-120
	G22	B+M+%10SD	67	-	-	33	-	-	-	-	100	0,62	10	1	0,35	100-120
	G23	B+H+%10SD	67	-	-	-	33	-	-	-	100	0,73	10	1	0,35	100-120
	G24	B+L+%10SD	67	-	-	-	-	33	-	-	100	0,62	10	1	0,35	100-120
5. grup	G25	B+S+K	33,4	33,3	33,3	-	-	-	-	-	100	1,8	-	1	0,35	100-120
	G26	B+S+K+M	25	25	25	25	-	-	-	-	100	1,8	-	1	0,35	100-120
	G27	B+S+K+M+H	20	20	20	20	20	-	-	-	100	1,8	-	1	0,35	100-120
	G28	B+S+K+M+H+L	17,0	16,6	16,6	16,6	16,6	16,6	-	-	100	2,0	-	1	0,35	100-120
6. grup	G29	B+S+K	50,2	33,2	16,6	-	-	-	-	-	100	1,8	-	1	0,35	100-120
	G30	B+S+K	50,2	16,6	33,2	-	-	-	-	-	100	2,0	-	1	0,35	100-120
	G31	B+S+K	57,1	28,6	14,3	-	-	-	-	-	100	1,91	-	1	0,35	100-120
	G32	B+S+K	57,1	14,3	28,6	-	-	-	-	-	100	2,0	-	1	0,35	100-120
7. grup	G33*	V	-	-	-	-	-	-	-	100	100	1,51	-	1	0,35	100-120

*: Bu grup sıkıştırılmadan üretilecek.

Çizelge 3.14. Karışım bileşenlerin teorik miktarları

Karışım Grubu	Karışım Kodu	Karışım Bileşenleri	B	S	K	M	H	L	SD	V	Çimento (kg)	Katkı (kg)	Su (kg)	Yayılma (mm)	Teo. BHA (kg/m^3)
1. grup	G1	B	2864	-	-	-	-	-	-	-	450	6,80	158	100	3479
	G2	S	-	2174	-	-	-	-	-	-	450	6,80	158	100	2789
	G3	K	-	-	1679	-	-	-	-	-	450	9,00	158	100	2296
	G4	M	-	-	-	2761	-	-	-	-	450	6,80	158	100	3376
	G5	H	-	-	-	-	2112	-	-	-	450	6,80	158	100	2727
	G6	L	-	-	-	-	-	2105	-	-	450	6,80	158	100	2720
	G7	SD	-	-	-	-	-	-	1638	-	450	9,00	158	100	2255
	G8	V	-	-	-	-	-	-	-	1794	450	6,80	158	100	2409
2. grup	G9	B+%10SD	2881	-	-	-	-	-	45	-	450	2,30	158	105	3536
	G10	S+%10SD	-	2180	-	-	-	-	45	-	450	4,60	158	100	2838
	G11	K+%10SD	-	-	2769	-	-	-	45	-	450	7,00	158	100	3429
	G12	M+%10SD	-	-	-	2254	-	-	45	-	450	4,60	158	110	2912
	G13	H+%10SD	-	-	-	-	2118	-	45	-	450	4,60	158	100	2776
	G14	L+%10SD	-	-	-	-	-	2111	45	-	450	4,60	158	100	2769
3. grup	G15	B+S	1432	839	-	-	-	-	-	-	450	9,00	158	100	2888
	G16	B+K	1428	-	622	-	-	-	-	-	450	4,50	158	100	2663
	G17	B+M	1432	-	-	1380	-	-	-	-	450	6,80	158	100	3427
	G18	B+H	1432	-	-	-	1056	-	-	-	450	6,80	158	105	3103
	G19	B+L	1432	-	-	-	-	1052	-	-	450	6,80	158	100	3099

Çizelge 3.14. (devam) Karışım bileşenlerin teorik miktarları

Karışım Grubu	Karışım Kodu	Karışım Bileşenleri	B	S	K	M	H	L	SD	V	Çimento (kg)	Katkı (kg)	Su (kg)	Yayılma (mm)	Teo. BHA (kg/m^3)
4. grup	G20	B+S+%10SD	1861	722	-	-	-	-	45	-	450	2,30	158	110	3238
	G21	B+K+%10SD	1853	-	557	-	-	-	45	-	450	5,20	158	100	3068
	G22	B+M+%10SD	1859	-	-	916	-	-	45	-	450	2,80	158	100	3431
	G23	B+H+%10SD	1858	-	-	-	700	-	45	-	450	3,30	158	105	3214
	G24	B+L+%10SD	1859	-	-	-	-	698	45	-	450	2,80	158	110	3213
5. grup	G25	B+S+K	955	723	560	-	-	-	-	-	450	8,10	158	100	2854
	G26	B+S+K+M	715	543	420	689	-	-	-	-	450	8,10	158	100	2983
	G27	B+S+K+M+H	715	543	420	689	527	-	-	-	450	8,10	158	100	3510
	G28	B+S+K+M+H+L	747	534	413	678	518	517	-	-	450	9,00	158	100	4024
6. grup	G29	B+S+K	1435	720	279	-	-	-	-	-	450	8,10	158	100	3050
	G30	B+S+K	1434	360	557	-	-	-	-	-	450	9,00	158	100	2968
	G31	B+S+K	1631	620	240	-	-	-	-	-	450	8,60	158	100	3108
	G32	B+S+K	1631	310	480	-	-	-	-	-	450	9,00	158	100	3038
7. grup	G33*	V	-	-	-	-	-	-	-	1794	450	6,80	158	100	2409

*: Bu grup sıkıştırılmadan üretilecek.

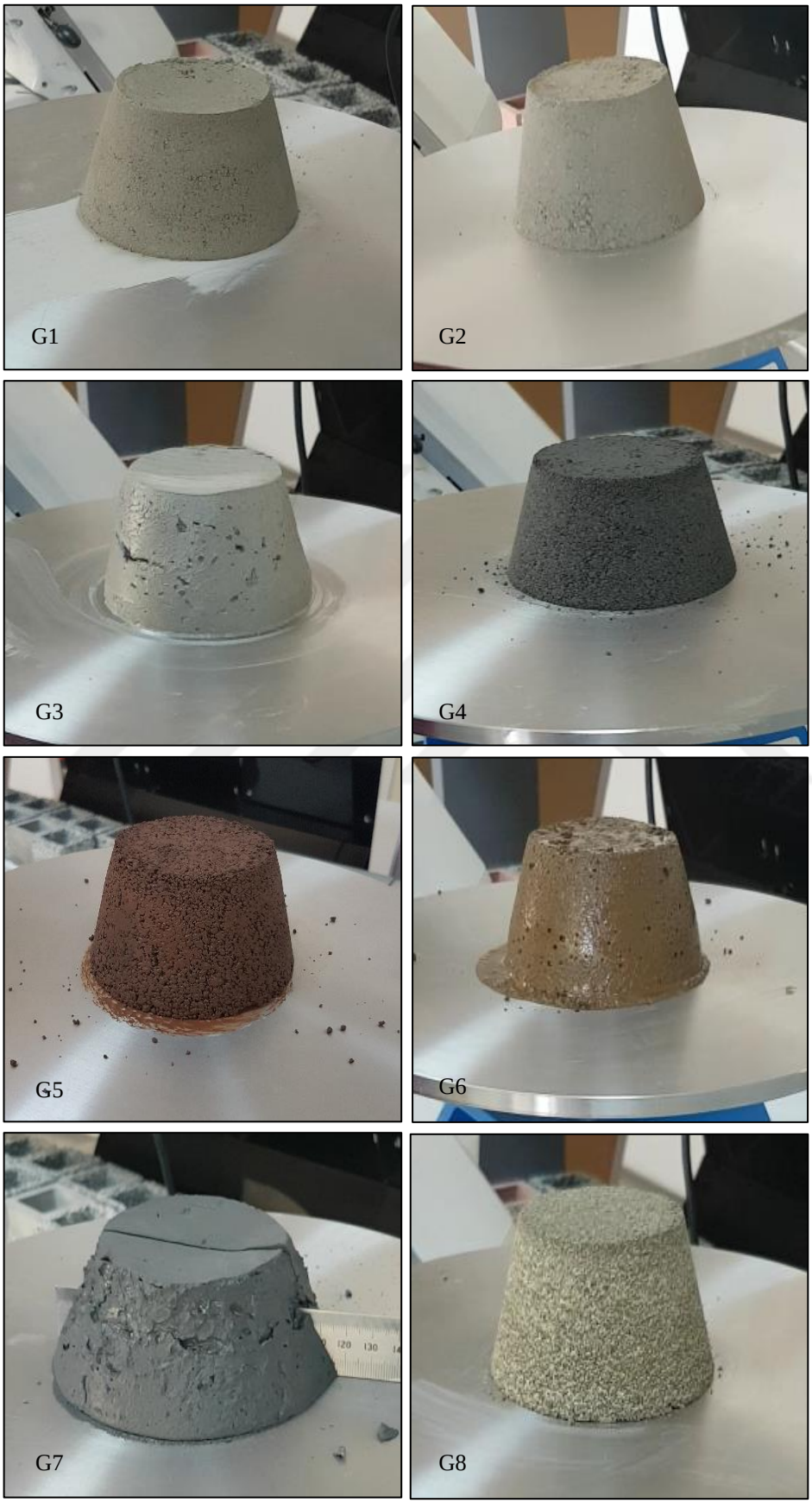
Çizelge 3.15. Karışım bileşenlerin gerçek miktarları

Karışım Grubu	Karışım Kodu	Karışım Bileşenleri	B	S	K	M	H	L	SD	V	Çimento (kg)	K.Katkı (kg)	M.Katkı (kg)	Su (kg)	Kull, Su (kg)	BHA (kg/m^3)
	G1-1d	B	2725,23	-	-	-	-	-	-	-	486,97	7,35	-	170,44	100,00	3110
	G1-2d	B	2725,23	-	-	-	-	-	-	-	486,97	7,35	-	170,44	100,00	3180
	G2	S	-	2185,31	-	-	-	-	-	-	523,54	7,91	-	183,24	41,50	3060
	G3	K	-	-	1238,18	-	-	-	-	-	738,56	14,77	-	258,49	195,50	1890
1. grup	G4	M	-	-	-	2637,23	-	-	-	-	533,12	8,05	-	286,59	53,00	2920
	G5	H	-	-	-	-	1726,89	-	-	-	925,29	13,97	-	323,85	227,50	2970
	G6	L	-	-	-	-	-	1546,86	-	-	831,55	12,56	-	291,04	270,00	2450
	G7	SD	-	-	-	-	-	-	179,89	-	1492,05	29,84	-	522,22	368,75	1780
	G8	V	-	-	-	-	-	-	-	301,89	1430,74	21,6	-	500,76	321,40	920
	G9	B+%10 SD	2638,85	-	-	-	-	-	-	-	592,746	3,02	5,93	207,46	100,00	3100
	G10	S+%10 SD	-	1989,69	-	-	-	-	-	-	591,38	5,91	5,91	206,98	110,00	2990
	G11	K+%10 SD	-	-	1462,01	-	-	-	-	-	1030,82	16,08	10,31	360,79	194,70	880
2. grup	G12-1d	M+%10 SD	-	-	-	2139,46	-	-	-	-	525,86	5,36	5,26	184,05	100,00	2890
	G12-2d	M+%10 SD	-	-	-	2139,46	-	-	-	-	525,86	5,36	5,26	184,05	100,00	2930
	G13	H+%10 SD	-	-	-	-	1521,92	-	-	-	947,37	9,66	9,47	331,58	167,50	3050
	G14	L+%10 SD	-	-	-	-	-	1411,31	-	-	985,76	10,05	9,86	345,02	297,10	2550

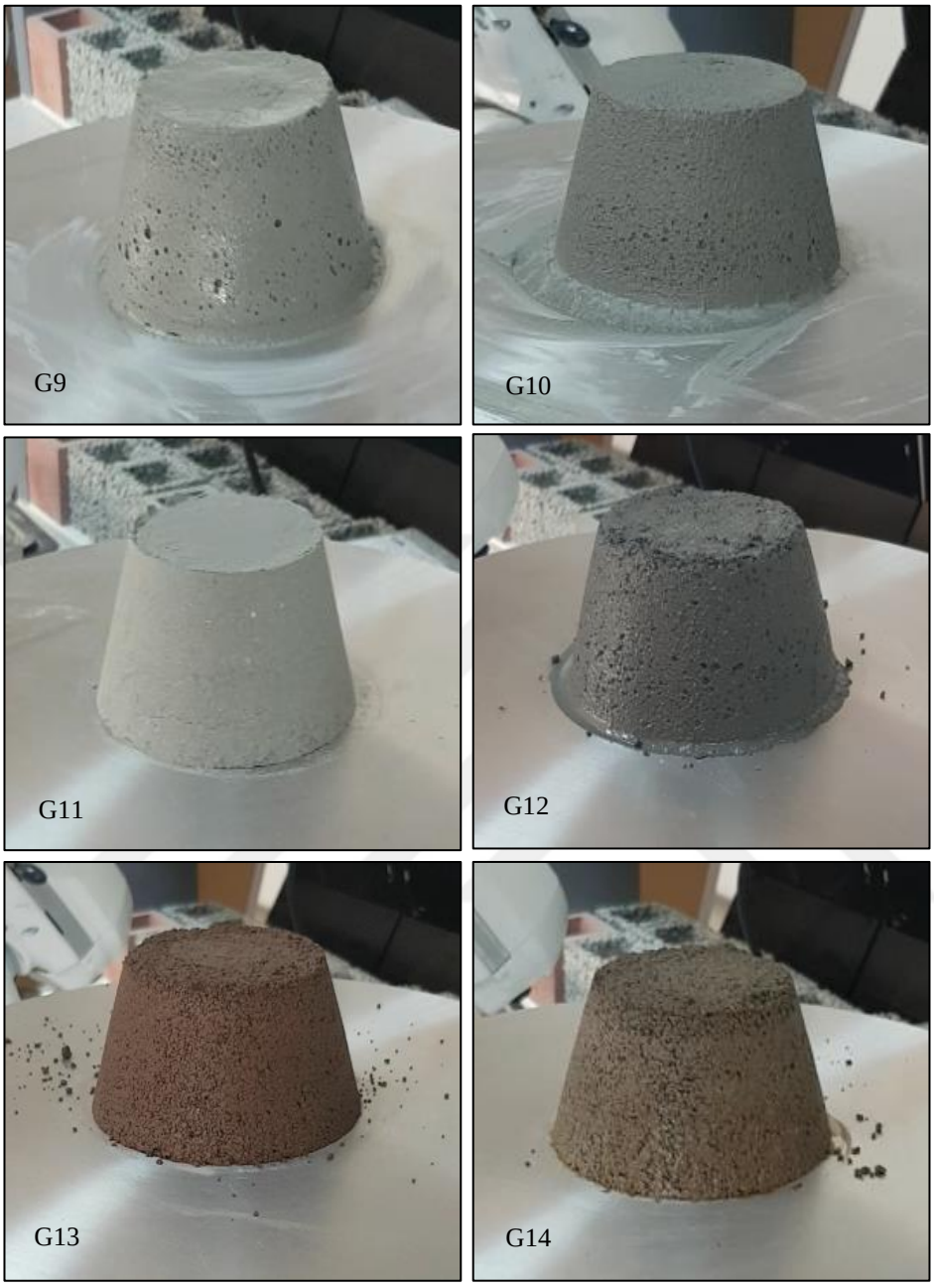
Çizelge3.15. (devam) Karışım bileşenlerin gerçek miktarları

Karışım Grubu	Karışım Kodu	Karışım Bileşenleri	B	S	K	M	H	L	SD	V	Çimento (kg)	K.Katkı (kg)	M.Katkı (kg)	Su (kg)	Kull, Su (kg)	BHA (kg/m^3)
3,grup	G15-1d	B+S	1343,38	1019,67	-	-	-	-	-	-	488,57	7,38	-	171	130,00	3200
	G15-2d	B+S	1343,38	1019,67	-	-	-	-	-	-	488,57	7,38	-	171	130,00	3260
	G16	B+K	1120,56	-	658,83	-	-	-	-	-	562,49	11,25	-	196,87	164,70	2520
	G17	B+M	1259,6	-	-	1214,07	-	-	-	-	466,14	7,04	-	165,15	120,00	3000
	G18-1d	B+H	1269,95	-	-	-	936,39	-	-	-	1353,26	10,22	-	236,82	205,30	3000
	G18-2d	B+H	1269,95	-	-	-	936,39	-	-	-	2706,52	10,22	-	236,82	205,30	3110
	G19	B+L	1175,25	-	-	-	-	863,74	-	-	667,36	10,08	-	233,58	172,20	2890
4. grup	G20	B+S+%10SD	1685,73	653,85	-	-	-	-	-	-	586,34	2,99	5,86	205,22	188,40	3130
	G21	B+K+%10SD	1617,01	-	485,83	-	-	-	-	-	686,18	7,96	6,86	240,16	197,30	2790
	G22	B+M+%10SD	1573,89	-	-	775,2	-	-	-	-	556,96	3,45	5,57	194,94	159,00	3050
	G23	B+H+%10SD	1604,14	-	-	-	604,43	-	-	-	710,47	5,19	7,10	248,67	230,00	2940
	G24	B+L+%10SD	1570,66	-	-	-	-	589,88	-	-	716,92	4,44	7,17	250,92	169,40	3060
5. grup	G25	B+S+K	903,71	683,89	529,74	-	-	-	-	-	614,52	11,06	-	215,08	151,90	2700
	G26	B+S+K+M	642,12	487,39	377,54	618,91	-	-	-	-	564,35	10,16	-	197,52	141,20	2660
	G27	B+S+K+M+H	634,62	481,7	373,13	611,68	467,94	-	-	-	625,68	11,26	-	218,99	193,70	2770
	G28	B+S+K+M+H+L	650,88	464,98	360,18	590,46	451,7	450,22	-	-	677,06	13,54	-	236,97	215,90	2730
6. grup	G29	B+S+K	1295,07	650,12	251,79	-	-	-	-	-	521,22	9,38	-	182,43	174,50	2860
	G30	B+S+K	1253,57	314,64	487,45	-	-	-	-	-	568,13	11,36	-	198,85	174,30	2670
	G31	B+S+K	1536,86	584,29	226,3	-	-	-	-	-	535,06	10,22	-	187,27	178,40	2840
	G32	B+S+K	1452,16	276,04	427,65	-	-	-	-	-	550,47	11,01	-	192,67	174,80	2790
7. grup	G33*	V	-	-	-	-	-	-	-	301,89	1430,74	21,60	-	500,76	321,40	950

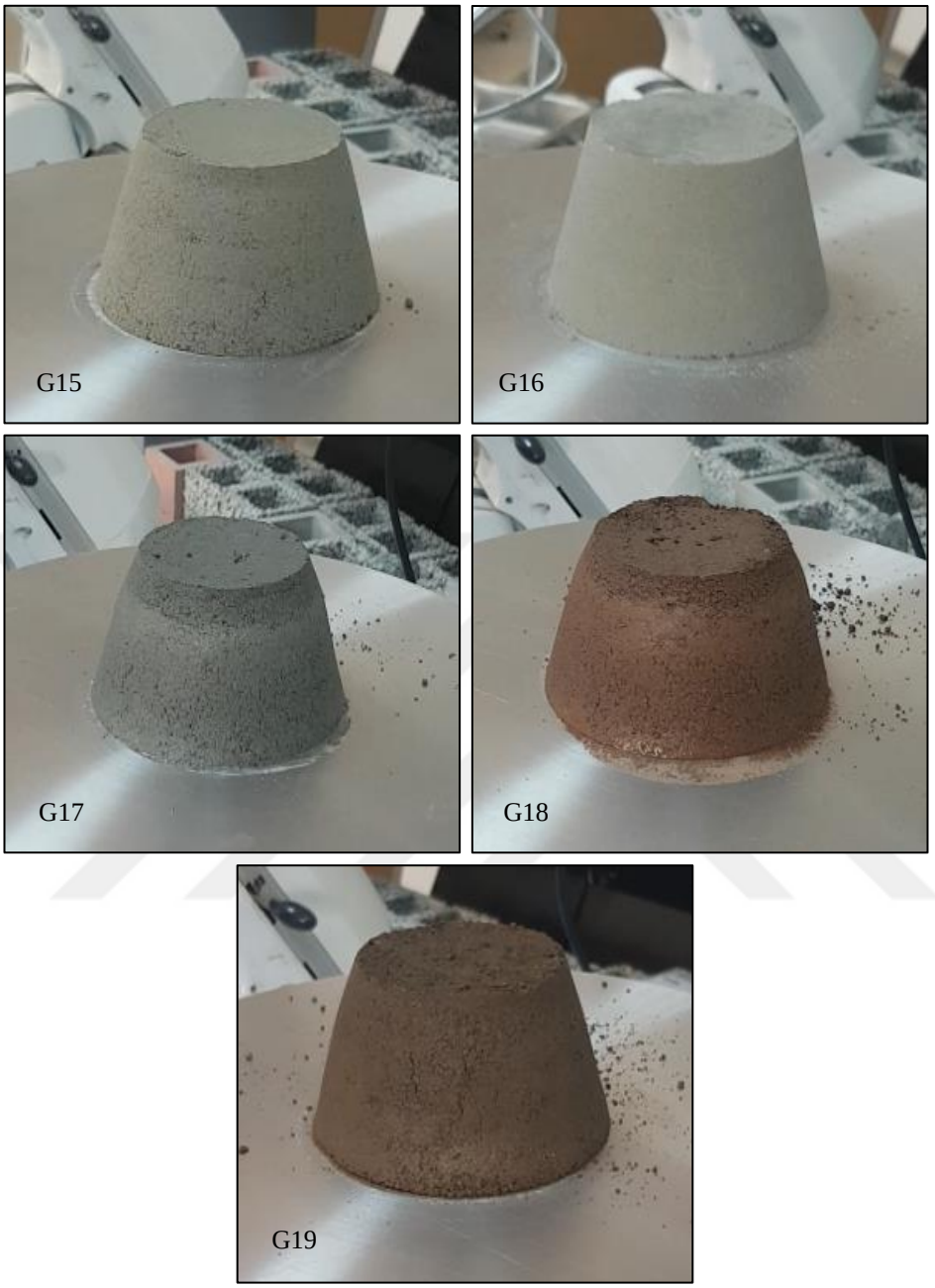
*: Bu grup sıkıştırılmadan üretilecek



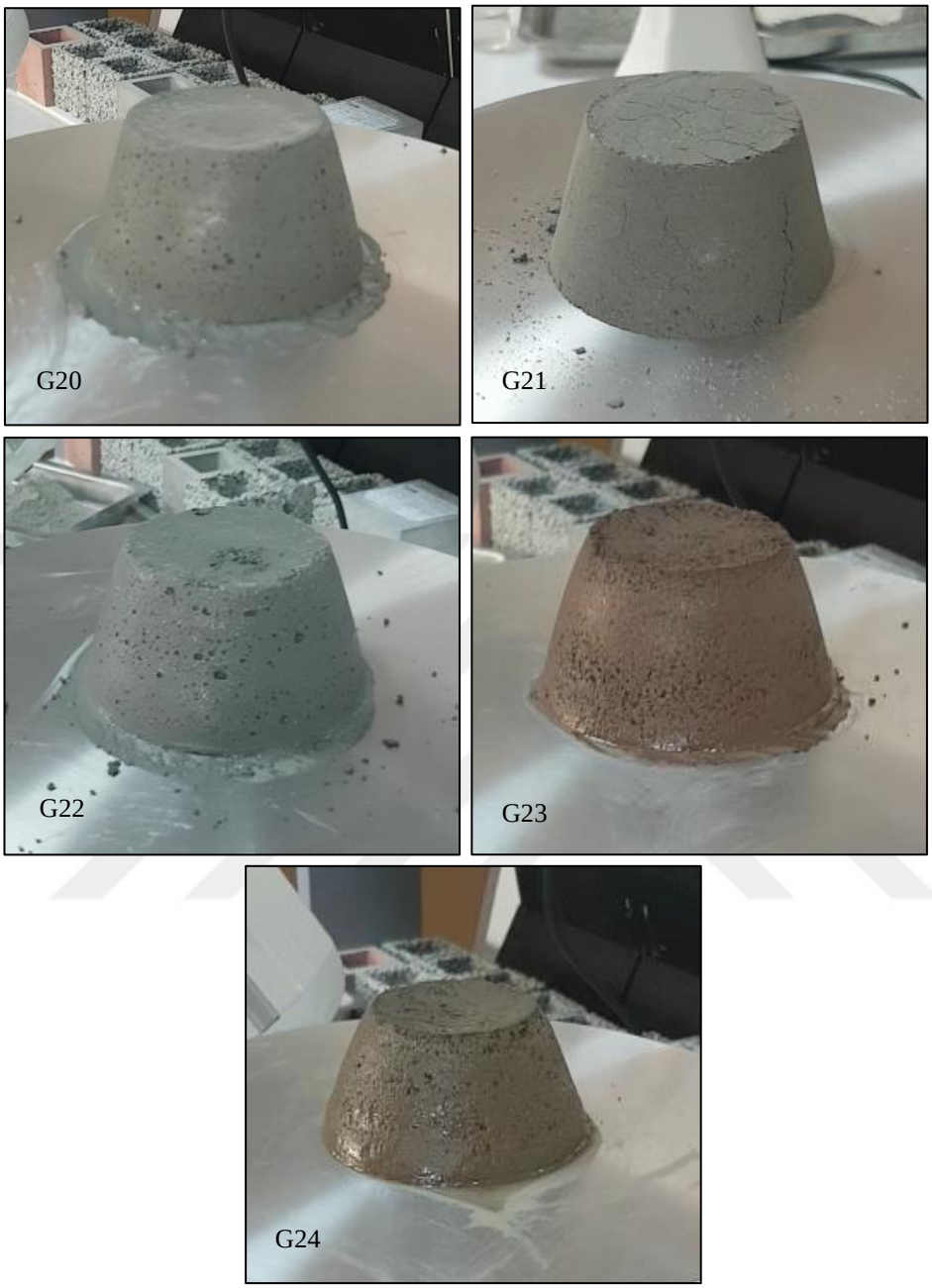
Şekil 3.5. 1. grup harç numuneleri yayılma tablası deneyi



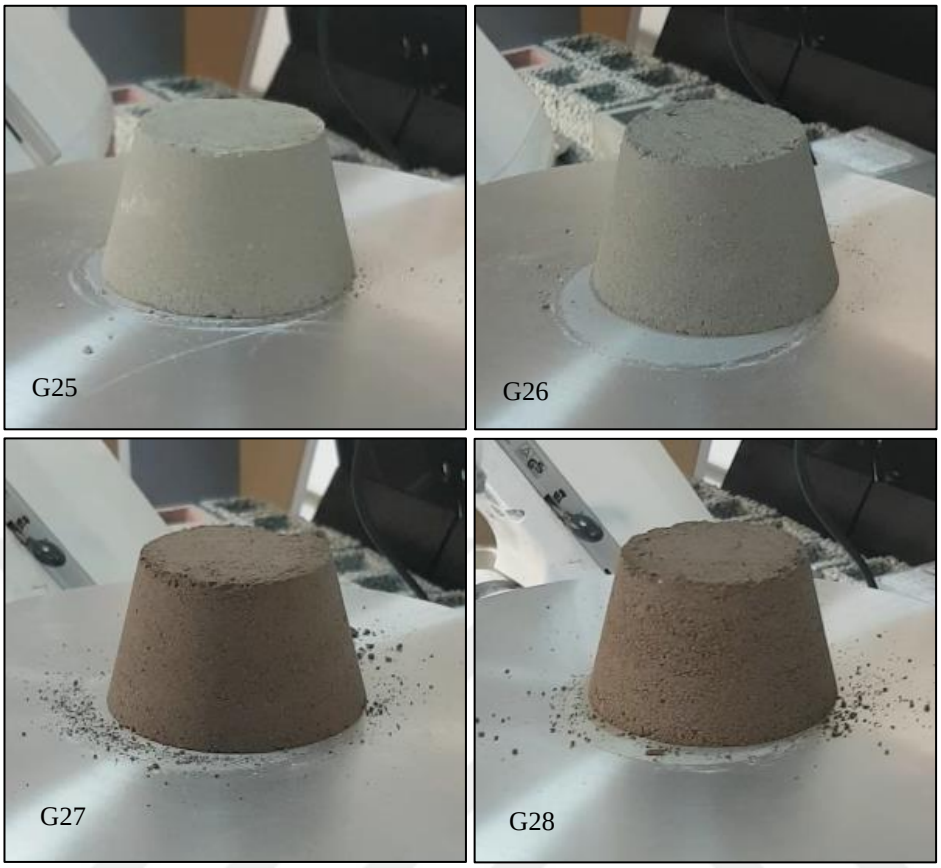
Şekil 3.6. 2. grup harç numuneleri yayılma tablası deneyi



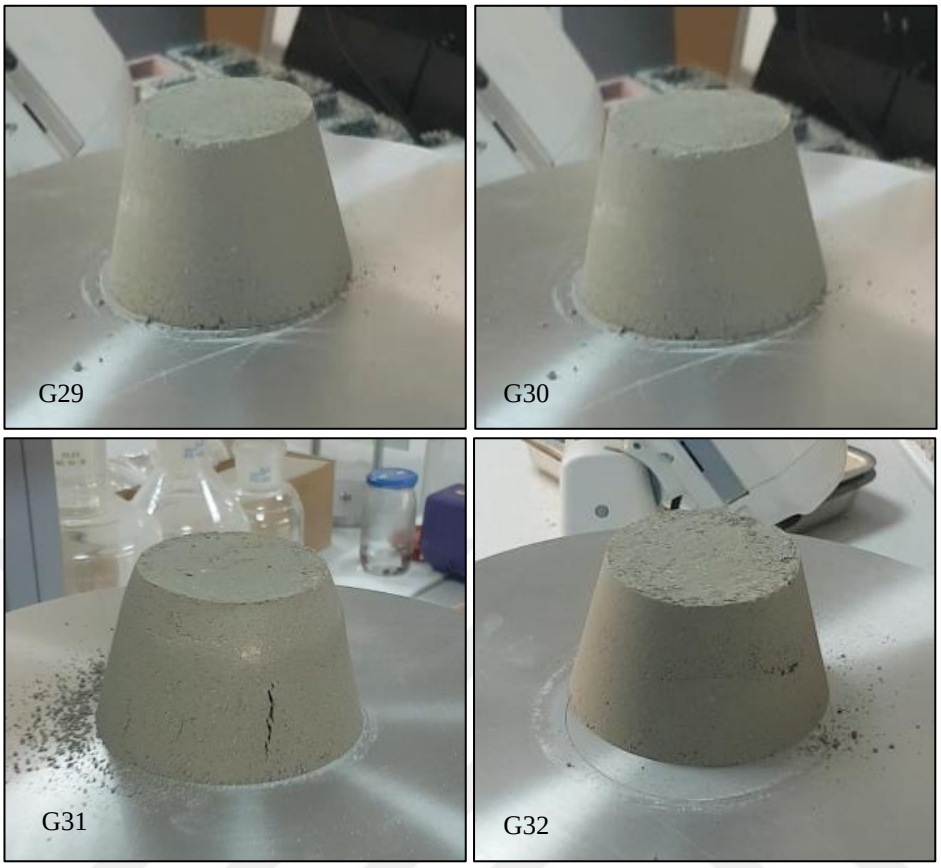
Şekil 3.7. 3. grup harç numuneleri yayılma tablası deneyi



Şekil 3.8. 4. grup harç numuneleri yayılma tablası deneyi



Şekil 3.9. 5. grup harç numuneleri yayılma tablası deneyi



Şekil 3.10. 6. grup harç numuneleri yayılma tablası deneyi



Şekil 3.11. 7. grup harç numuneleri yayılma tablası deneyi

3.1.6.1. Kaplama numunelerinin üretimi

Ön üretimde belirlenen minimum su miktarı ve taze birim hacim ağırlığı değerleri ile aynı karışım oranları kullanılarak karışım hesapları güncellenmiş, asıl

üretimler gerçekleştirilmiştir. S/Ç oranı tüm gruplarda 0,35 olarak alınmıştır. Agrega hacmi, TS 802 (Ocak 1985) beton karışım hesabına göre çimento, su ve hava hacminin 1000 dm^3'den çıkarılarak aşağıdaki denklem ile hesaplanmıştır:

$$1000\ dm^3 = Çimento\ hacmi + Agrega\ hacmi + Su\ hacmi + Hava\ hacmi \quad (3.5)$$

$$1000\ dm^3 = W + \frac{W_c}{\gamma_c} + \frac{W_n}{\gamma_n} + \cdots + \frac{W_{sa}}{\gamma_{sa}} + H \quad (3.5)$$

Bu denklemdeki nicelikler;

W: Su hacmi (dm^3)

W_c: Çimento kütlesi (kg)

W_n: Agrega kütlesi (kg)

W_{sa}: Süper akışkanlaştırıcı kütlesi (kg)

γ_c: Çimento özgül ağırlığı (kg/ dm^3)

γ_c: Agrega özgül ağırlığı (kg/ dm^3)

γsa: Katkı özgül ağırlığı (kg/ dm^3)

H: Toplam hava miktarını ifade etmektedir.

Bu deneysel çalışmada üretilen kaplama numuneleri birim ağırlığı yüksek ve min. boşluklu olacak şekilde dizayn edilmiştir. Asıl üretimler Bartın Selko Ateş Tuğla Sanayi ve Tic. AŞ.'de yapılmıştır. Karışımlar min. 10 dm^3 olarak çift motorlu Pan tipi beton mikserinde homojen olarak karıştırılmıştır. Harçlar boyutları 22x11x5, 22x11x6, 23x12x5 ve 23x12x6 cm olan kalıplarda belirli basınçlarda preslenerek üretilmiştir.

Birim alanı uygulanan basınç hesabı:

3 kollu basınç (3 gözlü pres):

$$Pres\ basıncı(bar) = \frac{Yüzey\ alanıxgöz\ sayısıxcm2\ uyg.basınç}{100\ cm2} \quad (3.6)$$

Ana basınç (3 gözlü pres):

$$Pres\ basıncı(bar) = \frac{Yüzey\ alanıxgöz\ sayısıxcm2\ uyg.basınç}{962\ cm2} \quad (3.7)$$

3 kollu basınç (1 gözlü pres):

$$Pres\ basıncı(bar) = \frac{Yüzey\ alanıxgöz\ sayısıxcm2\ uyg.basınç}{60\ cm2} \quad (3.8)$$

Ana basınç (1 gözlü pres):

$$Pres\ basıncı(bar) = \frac{Yüzey\ alanıxgöz\ sayısıxcm2\ uyg.basınç}{380\ cm2} \quad (3.9)$$

Her bir grubun sıkışması için uygulanacak olan max. basınç deneme yapılarak tespit edilmiş ve denklem 3.6, 3.7, 3.8 ve 3.9 yardımı ile hesaplanmıştır. Numunelerin sıkıştırma basınçları ve birim alana uygulanan kuvvet değerleri Çizelge 3.16'da verilmiştir.

Çizelge 3.16. Üretilen kaplama numunelerinin sıkıştırma basınç değerleri

Karışım grubu	Karışım kodu	Karışım bileşenleri	Sıkıştırma basıncı (bar)	Uygulanan kuvvet (kg/cm^2)
1. grup	G1-1d	B	100	132,51
	G1-2d	B	200	275,36
	G2	S	100	397,52
	G3	K	100	116,18
	G4	M	200	397,52
	G5	H	200	275,36
	G6	L	200	275,36
	G7	SD	40	16,53
	G8	V	40	16,53
2. grup	G9	B+%10SD	210	278,26
	G10	S+%10SD	200	397,52
	G11	K+%10SD	100	39,53
	G12	M+%10SD	200	397,52
	G13	H+%10SD	200	397,52
	G14	L+%10SD	200	275,36
3. grup	G15	B+S	200	275,36
	G16	B+K	200	275,36
	G17	B+M	200	275,36
	G18	B+H	200	275,36
	G19	B+L	200	275,36
4. grup	G20	B+S+%10SD	200	275,36
	G21	B+K+%10SD	200	275,36
	G22	B+M+%10SD	200	275,36
	G23	B+H+%10SD	200	275,36
	G24	B+L+%10SD	200	275,36
5. grup	G25	B+S+K	200	275,36
	G26	B+S+K+M	200	275,36
	G27	B+S+K+M+H	200	275,36
	G28	B+S+K+M+H+L	200	275,36
6. grup	G29	B+S+K	200	275,36
	G30	B+S+K	200	275,36
	G31	B+S+K	200	275,36
	G32	B+S+K	200	275,36
7. grup	G33	V	-	elle sıkıştırma

V tipi agrega ile üretilen G33 kaplama numunesi Şekil 3.17'de görüldüğü gibi 25x25x12 cm boyutlarında özel çelik kalıp içerisinde elle sıkıştırılarak üretilmiştir. 25 °C sıcaklıkta laboratuvar ortamında üzeri nemli bezlerle kaplanarak priz almış, 48 saat sonra kalıptan çıkarılmıştır.

Selko ateş tuğla fabrikasında üretimi yapılan kaplama harç numuneleri 20 ± 2 °C sıcaklık ile %100 nisbi nem ortamında 28 gün boyunca Ankara Oyak Beton Tesisleri Laboratuvarı'ndaki havuzlarda küre tabi tutulmuştur.



Şekil 3.12. Kaplama numunelerinin üretilmesi



Şekil 3.13. Kaplama numunelerinin üretilmesi



Şekil 3.14. Kaplama numunelerinin üretilmesi



Şekil 3.15. Kaplama numunelerinin üretilmesi



Şekil 3.16. Kaplama numunelerinin üretilmesi



Şekil 3.17. Kaplama numunelerinin üretilmesi



Şekil 3.18. Kaplama numunelerine kür uygulanması

Şekil 3.19'da görüldüğü gibi K ve %10 SD katkılı G11 kaplama numunesi su içerisine konulduğunda erimeye başladığı için 28 gün boyunca nemli laboratuvar ortamında kür edilmiştir.



Şekil 3.19. Kaplama numunelerine kür uygulanması

3.1.6.2. Kaplama numunelerinin kesilmesi

22x11x5. 22x11x6. 23x12x5. 23x12x6 ve 25x25x12 cm boyutlarında üretilen kaplama numuneleri 28 gün sonra kür havuzundan çıkartılmış yüzeyleri nemle bez ile kurulanıp birim ağırlıkları tartılmıştır. Daha sonra fiziksel, mekanik ve radyasyon deneylerinde kullanmak üzere belirli boyutlarda kesilmiştir.

Kesme işlemi Ankara Yuvaköy Gençler Granit Ltd. Şti.'nde bulunan dış çapı 400 mm. diş kalınlığı 4 mm elmas soketli sulu yan kesme makinasında yapılmıştır. Kesim hesabı. yapılacak deneysel çalışmalar dikkate alınarak her bir seri için ayrı ayrı hesaplanarak Çizelge 3.17'de verilmiştir. Kaplama numunelerine ait kesim işlemi Şekil 3.20, 3.21 ve 3.22'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.17. Kaplama numune kesim hesabı

Uygulanan deney	Adet	En	Boy	Kalınlık
		cm	cm	cm
Radyasyon deneyleri	1	10	10	0.5
	2	10	10	1
	1	10	10	2
	1	10	10	3
Isıl iletkenlik katsayı hesabı	6	10	10	2
Mekanik özellik tayini	3	4	4	>16



Şekil 3.20. Kaplama numunelerinin kesilmesi



Şekil 3.21. Kaplama numunelerinin kesilmesi



Şekil 3.22. Kaplama numunelerinin kesilmesi

3.1.6.3. Fiziksel deneyler

Kesim işleminden sonra 10x10x2 cm boyutlarındaki kaplama numunelerine kuru birim hacim ağırlık, su emme ve porozite deneyleri uygulanmıştır. 28 günlük standart kür işlemi sonrasında örneklerin suya doygun ağırlıkları belirlenmiştir. Ayrıca numuneler 24 saat boyunca 105 °C'de etüvde bırakılarak etüv kurusu ağırlıkları tespit edilmiştir.

$$Birim\ Hacim\ Ağırlık\ (BHA) = \frac{W_0}{W_1 - W_2}.kg/m^3 \quad (3.10)$$

$$Porozite.P(\%) = \frac{W_1 - W_0}{W_1 - W_2}x100 \quad (3.11)$$

$$Su\ emme.\mu(\%) = \frac{W_1 - W_0}{W_0} x100 \quad (3.12)$$

Burada.

W_0 : Etüv kurusu ağırlık

W_1 : Suya doygun havadaki ağırlık

W_2 : Su içerisindeki ağırlık

Üretilen kaplama numunelerine ait kuru birim hacim ağırlık, su emme ve porozite değerleri denklem 3.10. 3.11 ve 3.12'ye göre hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 4.1'de verilmiştir.



Şekil 3.23. Kaplama numunelerine ait fiziksel deneyler

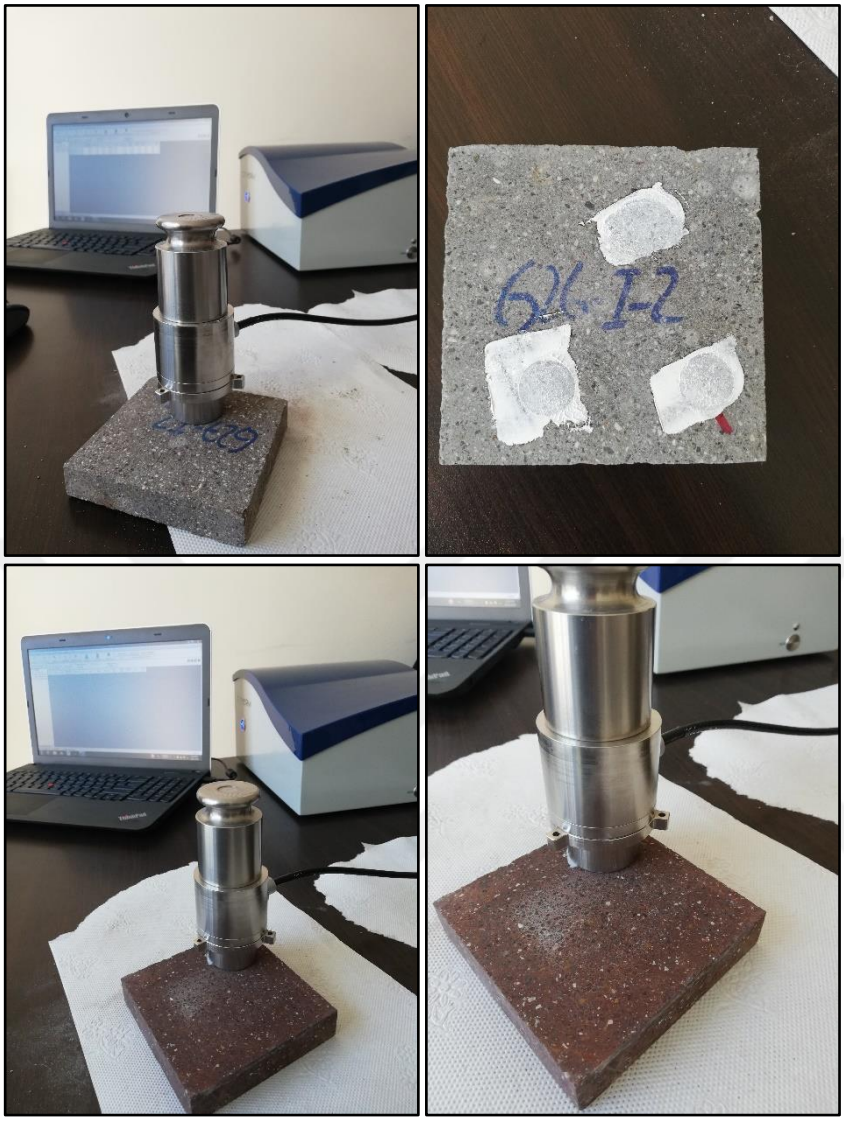


Şekil 3.24. Kaplama numunelerine ait fiziksel deneyler

3.1.6.4. Isıl iletkenlik deneyleri

Isıl iletkenlik malzemenin fiziksel ya da kimyasal yapısına bağlı olarak ısıyı iletme kabiliyeti olarak tanımlanır. Isıl iletkenlik katsayısı ise ne kadar ilettiğinin sayısal bir ifadesidir. TS ISO 8302'e (TS 2002) göre ısı iletim katsayısı k olarak tanımlanır ve sıcaklık farkının 1ºC olabilmesi için 1 m kalınlığındaki 1 m^2'lik kesitinden 1 saat boyunca geçmesi gereken ısı miktarı olarak ifade edilir. Isıl iletkenlik katsayısının birimi W/mK'dır.

Isıl iletkenlik deneyi Bartın Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarı'nda 50-200 derece arasında ölçüm kapasitesi olan saniyede 0'dan 500 W/mk'e kadar ölçüm yapılabilen ısıl iletkenlik test cihazında yapılmıştır. Silindir deney aparatı ölçümü yapılacak numunenin üzerine yerleştirilir. En az 3 noktadan sıcaklık değerleri üzerinden ısıl iletkenlik katsayı okumaları yapılır. Üretilen çimento esaslı kaplama numunelerinin ısıl iletkenlik deney ölçümleri Şekil 3.25'te, deney sonuçları Çizelge 4.2' de verilmiştir.



Şekil 3.25. Kaplama numunelerine ait ısıl iletkenlik deneyi

3.1.6.5. Mekanik deneyler

3.1.6.5.1. Eğilme ve basınç dayanımı deneyi

Çalışmada TS EN 196-1'de belirtilen şartlara uygun olarak hazırlanan kaplama harç numunelerine Ankara Oyak Beton Tesisleri'nde eğilme ve basınç dayanım testleri yapılmıştır. Eğilme dayanımı deneyi her bir numune kodu için 6 numune üzerinde uygulanmıştır. 33 farklı numune kodu için toplam 198 adet numune üzerinde deney uygulanmış bulunan eğilme dayanımı değerlerinin ortalaması deney sonucu olarak alınmıştır. Basınç dayanımı testi eğilme deneyinden sonra iki parçaya ayrılmış olan örnekler üzerinde uygulanmıştır. Deney bir kodlu numune için 6 adet prizmatik

numunenin iki parçaya ayrılması ile oluşan toplam 12 adet numune üzerinde uygulanmıştır. 33 farklı numune kodu için toplam 396 adet numune üzerinde deney uygulanmış bulunan basınç dayanımı değerlerinin ortalaması deney sonucu olarak alınmıştır.



Şekil 3.26. Eğilme dayanımı deneyi



Şekil 3.27. Basınç dayanımı deneyi

3.1.7. Analiz yöntemleri

Çalışmada üretilen kaplama numunelerine Bozok Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde XRD (X-Işını difraktometresi). SEM (taramalı elektron mikroskobu) ve XRF (X-ışını floresansı) analizleri uygulanmıştır.

3.1.7.1. XRD (X-ışını difraktometresi)

X-ışınları kırınımı yöntemi kristallin ve bileşiklerin kalitatif olarak tanınmasında rol oynamaktadır. XRD yöntemi çoğunlukla ağır elementlerden oluşan katı inorganik ve kristal halindeki maddelerin ve minerallerin miktar oranında özelliklerinin araştırılmasında kullanılan bir yöntemdir.

XRD deneyi üretilen kaplama numunelerinin sahip olduğu kimyasal içeriğinin ve yapısının belirlenmesi amacıyla yapılmıştır. Toz haline getirilmiş olan her bir kaplama numuneleri özel numune kaplarına konularak X-ışını tüpüne yerleştirilir ve deney düzeneği sistemi çalıştırılır. Deneyde her bir numunenin $-111° < 2\theta < 168°$ açısı aralığında belli dalga boylarında elde edilen pik değerlerinin enerji değerlerine karşılık gelen sahip oldukları mineraller tespit edildi. XRD analizi deney düzeneği Şekil 3.28'de, hazırlanan deney numuneleri Şekil 3.29'da verilmiştir. Ayrıca üretilen kaplama numunelerine ait kristal yapı analizi sonuçları EK-1'de verilmiştir.



Şekil 3.28. XRD analizi deney cihazı

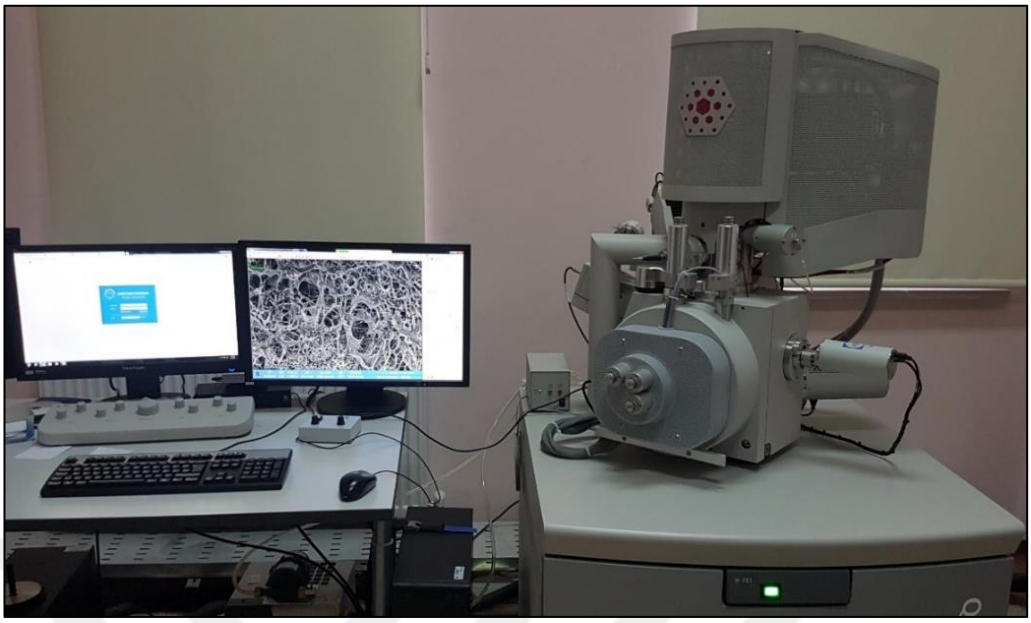


Şekil 3.29. XRD analizi kaplama numuneleri

3.1.7.2. SEM (taramalı elektron mikroskobu) analizi

Üretilen kaplama numunelerinin taramalı elektron mikroskobu ile SEM görüntüleme deneyi yapılmıştır. TESCAN VEGA'nın ürettiği tungsten filaman elektron kaynaklı cihazdan x.y.z yönünde saçılan elektronlar manyetik alan yardımıyla odaklanıp görüntüsü alınacak numune üzerine düşürülür. Elektronların numunenin yüzeyi ile daha iyi etkileşime girerek örneklerin iletkenliğini arttırıp daha net bir görüntü almak için kaplama numuneleri nanometre seviyesinde altın ile kaplanmıştır. Tarayıcı elektron mikroskobu ile üretilen kaplama numunelerin farklı yerlerinden 2500, 5000, 10000 ve 20000 kat büyütme yapılarak SEM görüntüleri alınmış ve mikro yapı analizleri yapılmıştır.

SEM analizi, örneklerin içeriklerindeki minerallerin tipi, boyutu ve yerleşim düzeni hakkında bilgiler vermektedir. SEM analizi deney cihazı Şekil 3.28'de, max. 1 cm'lik küpler halinde hazırlanan kaplama numuneleri Şekil 3.29 da verilmiştir. Ayrıca üretilen kaplama numunelerine ait SEM analizi sonuçları EK-1'de verilmiştir.



Şekil 3.30. SEM analizi deney cihazı



Şekil 3.31. SEM analizi kaplama numuneleri

3.1.7.3. XRF (X-ışını floresansı) analizi

XRF (X-ışını floresansı) genel olarak foton-madde etkileşmesi sonucu meydana gelen malzemelerin temel bileşimini nicel ve nitel olarak belirlemek için kullanılan tahribatsız analitik bir tekniktir. XRF analizörleri birincil bir X-ışını kaynağı tarafından uyarıldığında bir numuneden yayılan floresan (veya ikincil) X-ışınını ölçerek bir numunenin kimyasını belirler. Bir numunede bulunan elementlerin her biri, o belirli element için benzersiz olan bir dizi karakteristik floresan X-ışını ("parmak izi") üretir. X-ışınları floresans spektroskopik yöntemi ile kayaç, mineral, toprak, cam, yağ, petrol gibi katı ve sıvı numunelerin kalitatif, kantitatif ve yarı kantitatif analizi için mükemmel bir teknolojidir.

X-ışını floresans spektrometre analizi üretilen kaplama numunelerinin 0,5-35 mm aralığındaki toz numuneler preslenerek özel tutuculara yerleştirilmiştir. Sistemde entegre halde bulunan mikro XRF ile küçük nokta analizleri ve homojen olmayan numunelerin yüzeyinin elementel dağılım haritası 2θ tarama aralığında çıkarılmıştır. XRD analizi deney düzeneği Şekil 3.30'da, hazırlanan numuneler Şekil 3.31'de verilmiştir. Ayrıca analiz sonuçları EK-1'de rapor edilmiştir.



Şekil 3.32. XRF analizi deney cihazı



Şekil 3.33. XRF analizi kaplama numuneleri

3.2. Radyasyon kaynağı ve radyasyon uygulamaları

3.2.1. Deneysel radyasyon çalışmaları

Farklı agregalar ile üretilen çimento esaslı kompozit malzemelerin kurşun madenine alternatif kaplama malzemesi olarak kullanılabilirliğinin araştırıldığı bu çalışmada X-, γ- ışını ve nötron radyasyon geçirgenlik katsayıları tespit edilmiştir. Radyasyon deneyleri İTÜ Enerji Enstitüsü Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Üretilen kaplama numunelerinden 0.5,1,1,2,3 cm kalınlıklarında kesilen 10*10 kare prizma numuneleri üzerinde 0,5-7 cm kalınlığa kadar belli enerjilerdeki X- ve γ -ışını ve termal nötronların; lineer ve kütle azaltma katsayısı, yarı kalınlık ve (HVL), onda bir kalınlık değeri (TVL) Denklem 3.13'e göre hesaplanmıştır. Ayrıca 150 keV X-ışını ve 662 keV γ –ışını radyasyon şiddeti değeri için 1 mm kurşun eşdeğer kalınlık hesabı yapılmıştır.

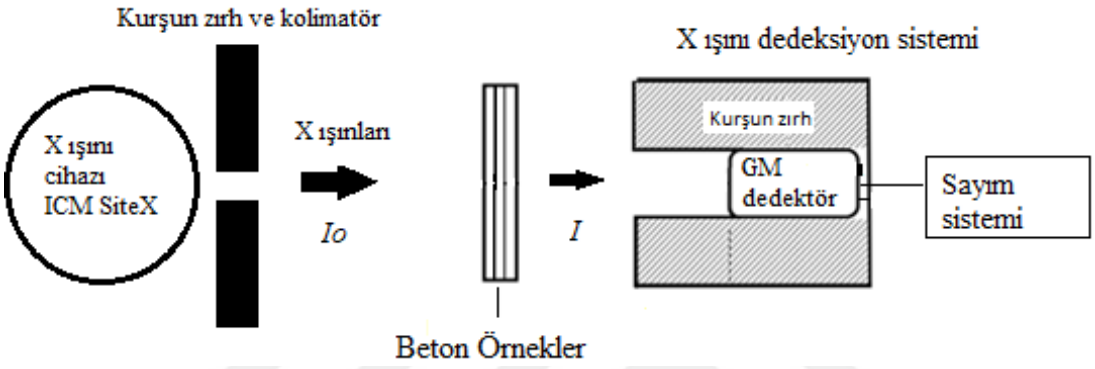
$$I = I_0\, e^{-\mu x} \tag{3.13}$$

Burada:

I_0 : örnek yok iken kaynak ışını sayımı (uSv/saat)
I : beton örneklerden geçen kaynak ışını sayımı (uSv/saat)
x : beton örnek kalınlığı (cm)
μ : lineer zayıflatma katsayısı (cm^{-1})

3.2.1.1. X-ışını radyasyon tutuculuk hesapları

Üretilen kaplama numunelerinin X-ışını lineer zayıflatma katsayıları, X-ışını cihazının (ICM SiteX) 150 kiloVolt çalışma gerilimde ve 1 mili Amper hedef akımında yaydığı 150 keV enerjili X-ışınları ve Geiger Müller (GM) tipi gazlı dedektörü bulunan doz ile ölçülmüştür. X-ışını için lineer zayıflatma katsayısı ölçüm sistemi Şekil 3.32'de verilmiştir.



Şekil 3.34. X-ışını ölçüm sistemi

Kalınlıkları 0.5-1-1-2-3 cm olan kaplama numuneleri ve bunların çeşitli kalınlık kombinasyonları ile yapılan X-ışını ölçümleri sonucunda 0,5-7 cm kalınlığa kadar üretilen tüm kaplama harç numunelerinin lineer zayıflatma katsayıları (Linear Attenuation Coefficients) Denklem (3.13) ile hesaplanmıştır. Ölçümler her bir harç kalınlığı için birer dakika aralıklarla alınmış ve her ölçüm ortalama sayımını bulmak için üç kere tekrarlanmıştır. X-ışını sayımlarında arka fon (background) sayımı sıfır olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.35. X-ışını deney düzeneği



Şekil 3.36. X-ışını deney düzeneği

Genellikle radyoloji ve tedavi amaçlı kullanılan radyasyon kaynaklarının (örneğin 150 keV x-ışını) bulunduğu odaların duvarlarının kalınlıkları 2 mm kurşun eşdeğer kalınlığında ve yoğunluğu 2,3 g/cm^3 olan betondan yapılması şeklinde ifade edilmektedir. Burada 2 mm kurşun eşdeğer kalınlık tanımı; radyasyonun şiddetinin yüzde birine (%1) düşüren beton kalınlığıdır.

X-ışını enerjisi 150 keV olduğunda kurşunun (Pb)) 150 keV enerjili X- ışınına karşılık gelen kurşun eş değeri hesabı Denklem 3.13'ten yararlanılarak Denklem 3.14 türetilir. NISTXCOM programından 150 keV enerjili X-ışınının verdiği radyasyon doz şiddetinin yüzde bire düşmesi için gerekli kalınlık 2TVL kurşun eşdeğeri $X(150\text{keV})_{Pb}$=0,21cm=2,1mm olarak bulunur. Daha sonra aşağıdaki denklemlerden yararlanılarak 1 mm kurşunun soğurduğu doz değeri bulunur. Bu hesaplamalar sonucunda zırh malzemesinden %11,4 oranında geçen X-ışını radyasyonunun soğurulması için gerekli kaplama numune kalınlıkları hesaplanmıştır.

Bu hesap aşağıdaki şekilde yapılır:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{100} = e^{-\mu x}$$

$$X(150keV) = \frac{ln(100)}{\mu(150keV)_{Pb}} \qquad (3.14)$$

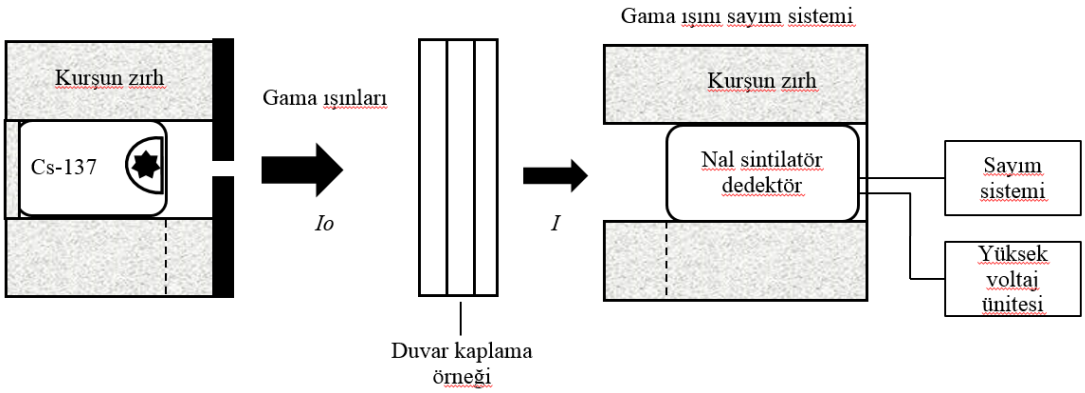
Burada:

$\boldsymbol{I_0}$: örnek yok iken kaynak X sayımı (uSv/saat)
$\boldsymbol{I}$: beton örneklerden geçen kaynak X sayımı (uSv/saat)
$\boldsymbol{x}$: 2xTVL eşdeğer kalınlık (cm)
$\boldsymbol{\mu}$: Pb lineer zayıflatma katsayısı (cm^{-1})
$\boldsymbol{d}$: Pb yoğunluğu (g/cm^3)

150 keV X-ışınıları için lineer ve kütle zayıflatma katsayısı, yarı değer kalınlığı (half value layer – HVL), doz şiddetinin yüzde bire düşmesi için gerekli 2TVL kalınlık (tenth value layer – TVL) ve kurşun eşdeğeri hesap sonuçları Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Üretilen kaplama numunelerine ait I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi arasındaki ilişki EK-6'da verilmiştir.

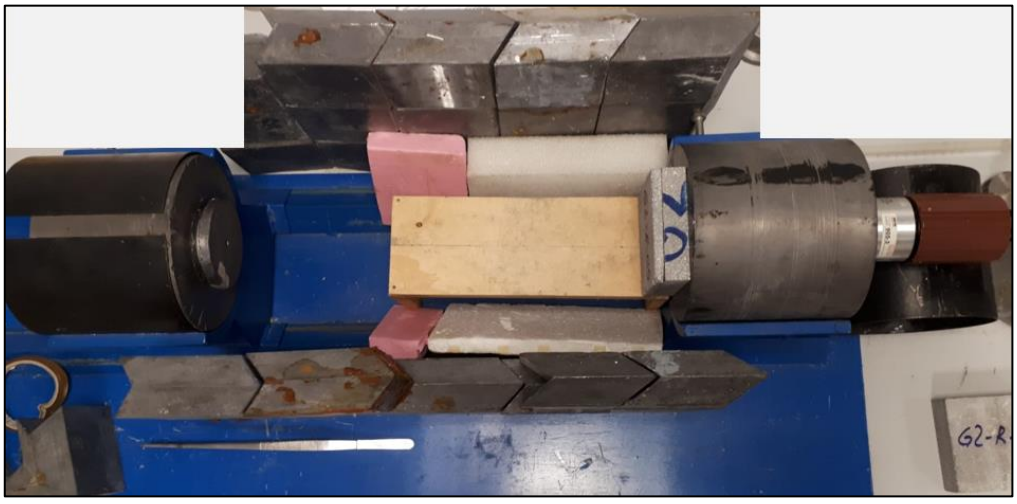
3.2.1.2. Gama ışını radyasyon tutuculuk hesapları

Üretilen kaplama numunelerin Gama-ışını lineer zayıflatma katsayıları, Cs-137 radyoizotopunun yaydığı 662 keV enerjili gama ışınları ve NaI(Tl) sintilatör tipi detektör ile ölçülmüştür. γ-ışını lineer zayıflatma katsayısı ölçüm sistemi Şekil 3.35'te verilmiştir.



Şekil 3.37. Gama-ışını ölçüm sistemi

Kalınlıkları 0,5-1-1-2-3 cm olan harç örnekleri ve bunların çeşitli kalınlık kombinasyonları ile yapılan γ-ışını ölçümleri sonucunda 0,5-7 cm kalınlığa kadar üretilen tüm kaplama harç örneklerinin lineer zayıflatma katsayıları (Linear Attenuation Coefficients) Denklem (3.13) ile hesaplanmıştır. Ölçümler her bir harç kalınlığı için birer dakika aralıklarla alınmış ve her ölçüm ortalama sayımını bulmak için üç kere tekrarlanmıştır. Gama ışını sayımlarında arka fon (background) sayımı sıfır olarak kabul edilmiştir.



Şekil 3.38. γ -ışını deney düzeneği



Şekil 3.39. γ -ışını deney düzeneği

γ-ışını enerjisi 662 keV olduğunda kurşunun (Pb) 662 keV enerjili γ-ışınına karşılık gelen kurşun eş değeri hesabı Denklem 3.13'ten yararlanılarak Denklem 3.14 türetilir. NISTXCOM programından 662 keV enerjili γ-ışınının verdiği radyasyon doz şiddetinin yüzde bire düşmesi için gerekli kalınlık 2TVL kurşun eşdeğeri $X(662\text{keV})_{Pb}$=0,392cm=3,92 mm olarak bulunur. Daha sonra aşağıdaki denklemlerden yararlanılarak 1 mm kurşunun soğurduğu doz değeri bulunur. Bu hesaplamalar sonucunda zırh malzemesinden %88,9 oranında geçen γ-ışını için gerekli kaplama numune kalınlıkları hesaplanmıştır.

Bu hesap aşağıdaki şekilde yapılır:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{100} = e^{-\mu x} \tag{3.14}$$

$$X(662keV) = \frac{ln(100)}{\mu(662keV)_{Pb}} \tag{3.14}$$

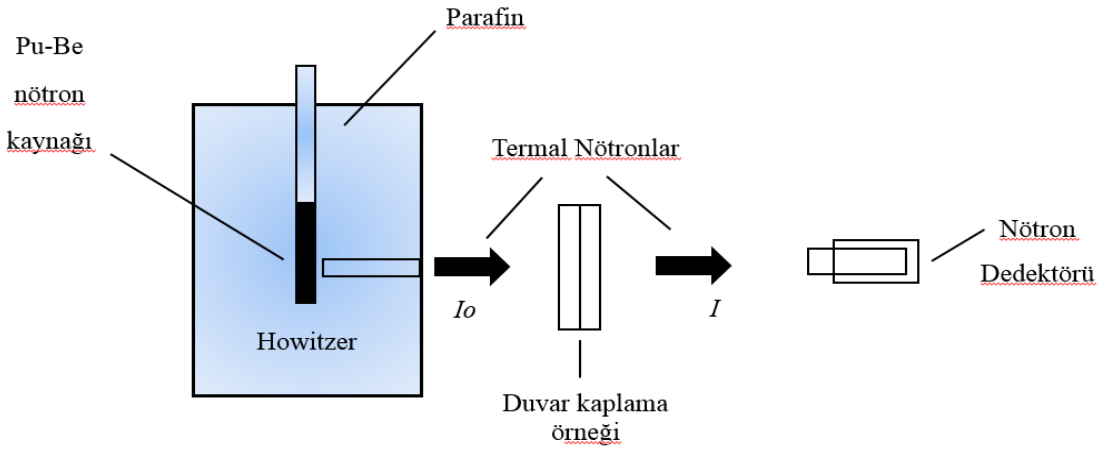
Burada:

I_0 : örnek yok iken kaynak Gama sayımı (uSv/saat)
I : beton örneklerden geçen kaynak Gama sayımı (uSv/saat)
x : 2xTVL eşdeğer kalınlık (cm)
μ : Pb lineer zayıflatma katsayısı (cm^{-1})
d : Pb yoğunluğu (g/cm^3)

662 keV γ -ışınıları için liner ve kütle zayıflatma katsayıları, yarı değer kalınlığı (half value layer – HVL), doz şiddetinin yüzde bire düşmesi için gerekli 2TVL kalınlık (tenth value layer – TVL) ve kurşun eşdeğeri hesap sonuçları Çizelge 4.5'te gösterilmiştir. Üretilen kaplama numunelerine ait I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi arasındaki ilişki EK-6'da verilmiştir.

3.2.1.3. Nötron Radyasyon Tutuculuk Hesapları

Üretilen kaplama numunelerinin termal nötron lineer zayıflatma katsayı ölçümleri İTÜ Enerji Enstitüsü'nde yapılmıştır. Ölçümlerde Nuclear Chicago Corparation tarafından üretilen 1,85x105MBq (5Ci) aktiviteli (Pu-Be)Nötron Howitzer-3 (NH-3) kaynağı kullanılmıştır (Yiğit, 1996, Nuclear-Chicago, 1960). Howitzer 61 cm çap ve 91cm yüksekliğinde silindirik çelikten yapılan bir kabuk içerisine yerleştirilmiştir. Termal ve epitermal nötronlar için iki adet ışınlama kanalı bulunmaktadır. Kaynağın etrafı yaklaşık 25 cm kalınlığında özel parafin ile kapatılmıştır (Gordus, 1967). Howitzerde üretilen nötronların ortalama enerjisi 4 MeV'dir (Yiğit, 1996). Termal nötronlara ait ölçüm sistemi Şekil 3.40'da verilmiştir.



Şekil 3.40. Nötron ölçüm sistemi

He-3 nötron detektörünün sayım yapan penceresi nötron kaynağı (Pu-Be) ortada olan Howitzer'in nötron çıkış kanalını (I_0) doğrudan görmektedir. Kalınlıkları 0,5-1-1-2-3 cm olan harç örnekleri ve bunların çeşitli kalınlık kombinasyonları ile yapılan sayımlar sonucunda 0,5-7 cm kalınlığa kadar (I) değerler elde edilmiştir. Ölçümler her bir kalınlık için birer dakika aralıklarla alınmış ve her ölçüm ortalama nötron şiddetini bulmak için 3 kere tekrarlanmıştır ve ortalamaları alınmıştır. Nötron sayımlarında arka fon (background) sayımı sıfır olarak kabul edilmiştir. Bu katsayılar Denklem 3.15 ile hesaplanmıştır.



Şekil 3.41. Nötron deney düzeneği

Bu hesap aşağıdaki şekilde yapılır:

$$I = (1 + b\mu x).I_0\, e^{-\mu x} \qquad (3.15)$$

Burada:

I_0 : örnek yok iken kaynak nötronun sayımı (uSv/saat)
I : örneklerden geçen nötronun şiddeti (sayım/saniye)
x : örnek kalınlığı (cm)
μ: lineer zayıflatma katsayısı (cm^{-1})
b: yığılma faktörü (nötronlar için)

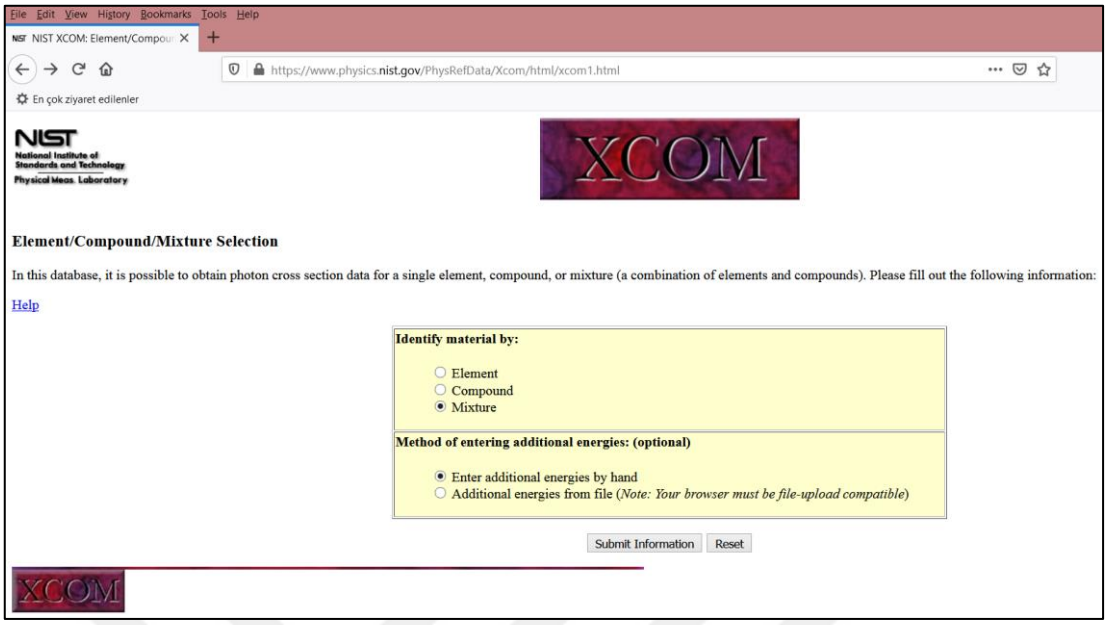
Nötronlar partikül radyasyon sınıfında olup yukarıda değerlendirilen X veya Gama ışınlarından (elektromanyetik radyasyon) farklıdır. Nötronlar elektrik yükü sıfır (nötr) olan bir parçacıktır. Soğurucu malzeme içinde oldukça girici özelliğe sahiptir. Bu nedenle nötronların şiddetini zayıflatmak için kullanılan betonların kalınlıkları diğer radyasyon türlerine (X ve Gama ışınları) göre daha fazladır. Bu nedenle kurşun eşdeğeri kalınlığı yerine onda bir değer kalınlığı (TVL) ve yüzde bir (2TVL) değerleri hesaplanmıştır. Lineer ve kütle zayıflatma katsayıları, yarı değer kalınlığı (half value layer – HVL), doz şiddetinin %10 ve %1'e düşmesi için gerekli TVL ve 2TVL kalınlık değeri Çizelge 4.6'da gösterilmiştir. Üretilen kaplama numunelerine ait I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi arasındaki ilişki EK-6'da verilmiştir.

3.2.2. Teorik Radyasyon Çalışmaları

Amerika Ulusal Standart ve Teknoloji Enstitüsü'nün geliştirmiş olduğu NIST XCOM (Efnarc. 2002) programı kullanılarak. 1 keV'den 100 GeV'e kadar olan enerji değerlerinde teorik olarak tek bir element, bileşik veya karışım (elementlerin ve bileşiklerin bir kombinasyonu) için foton kesit verileri elde etmek mümkündür. Program kütle azaltma katsayılarını fotonun (X-ışını ve gama radyasyonu) madde ile etkileşiminde meydana gelen fotoelektrik etki, Compton saçılmaları, çift oluşumu olayları için ayrı ayrı hesaplamaktadır.

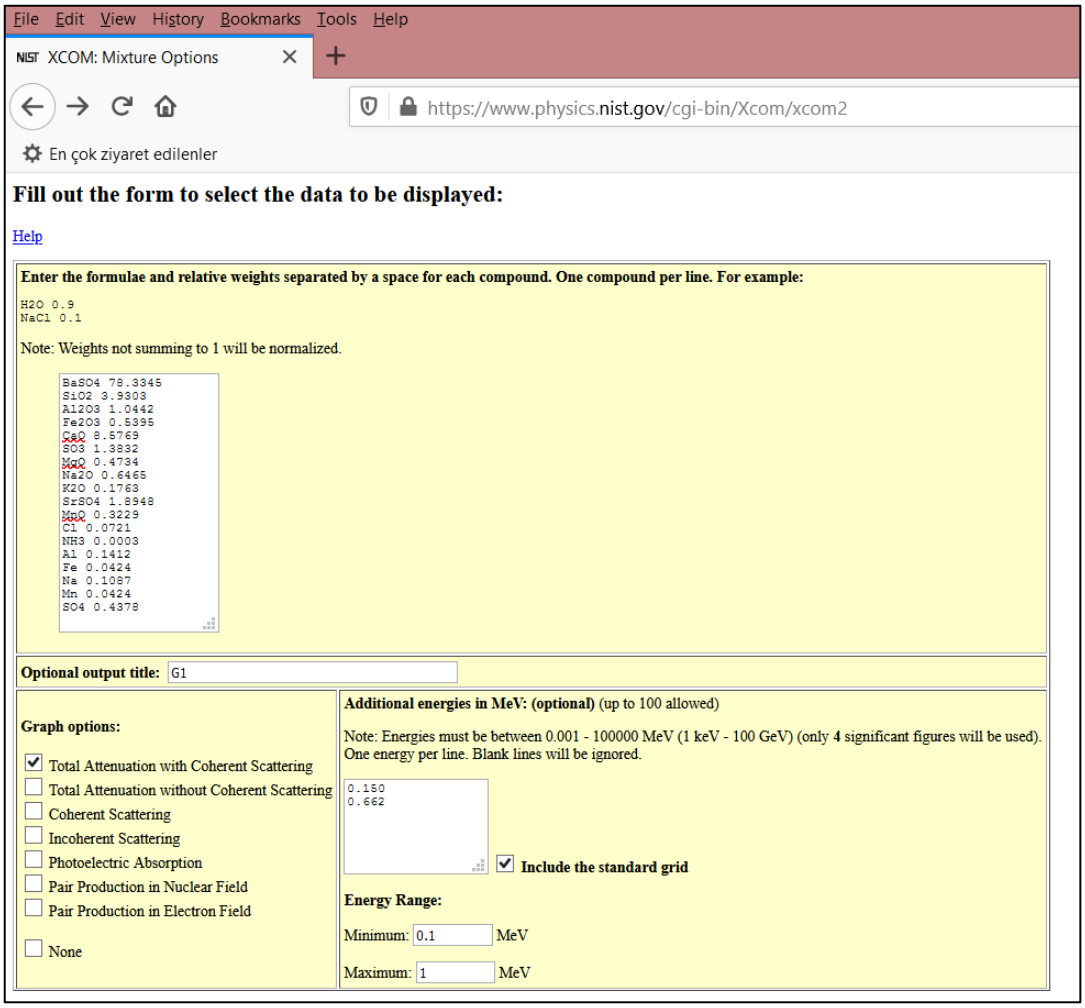
Bu veri tabanında öncelikle üretilen kaplama harç numunelerini oluşturan karışımların bileşik ve elementleri tek tek programa tanıtılarak konsantrasyon değerleri % olarak girildi. Her bir kaplama numunesini oluşturan kimyasal kompozisyonlar teorik olarak hesaplanmış ve EK Çizelge 5'te verilmiştir. Programa enerjiler 0,001-100000 MeV (1 keV-100 GeV) arasında girildi ve üretilen harçların 150 keV ve 662 keV enerjilerdeki kütle zayıflatma katsayısı XCOM programında hesaplanmıştır.

XCOM programı fotonlar yani X- ve γ- radyasyonunun tespitinde kullanılan bir programdır. NIST XCOM programına G1 agrega tipi kaplama numunesinin verilerini girerek X- ve γ-ışını kütle azaltma katsayılarını dört ana başlıkta gösterebiliriz.

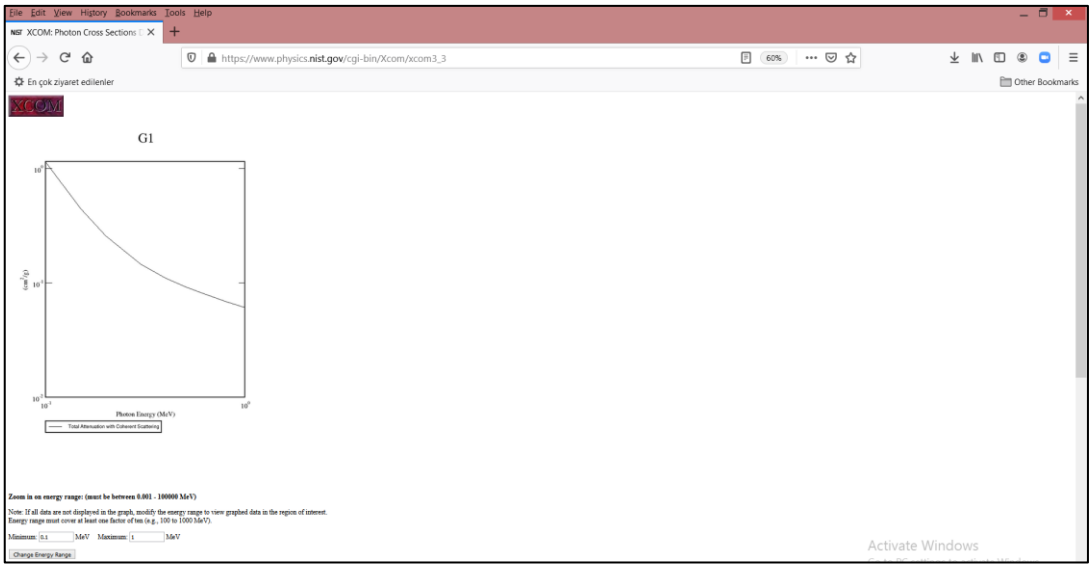


Şekil 3.42. G1 kaplama numunesinin XCOM programına tanıtılması

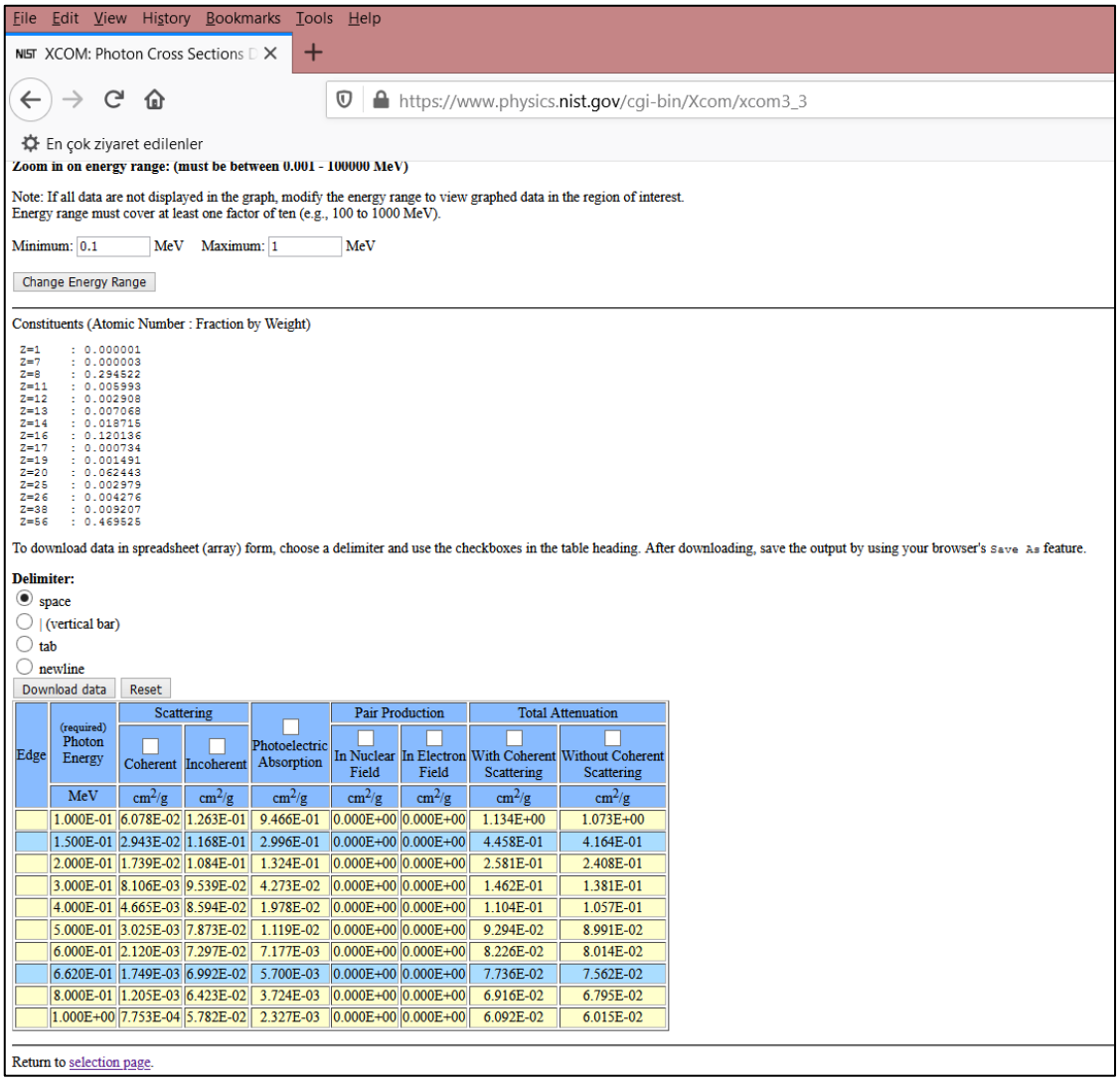
İlgili seçim yapıldıktan sonra çıkan ekranda, teorik kütle azaltma katsayılarını XCOM programında hesaplaması amacıyla EK Çizelge 5'te verilen kimyasal kompozisyonların oksit cinsinden element bileşenleri ve bunların ağırlıkça yüzde değerleri programa girilmiştir (Şekil 3.40.1b). Deneysel çalışmada kullanılan 0,150 MeV ve 0,662 MeV enerjileri bu alana girilerek sonuçlar elde edilmiştir (Şekil 3.40.1c ve Şekil 3.40.1d).



Şekil 3.43. G1 kaplama numunesi bileşiklerinin XCOM programına girilmesi, foton enerjilerinin 0,150-0,662 MeV olarak yazılması



Şekil 3.44. G1 kaplama numunesi foton enerji kütle zayıflatma katsayı ilişkisi



File Edit View History Bookmarks Tools Help

NIST XCOM: Photon Cross Sections

https://www.physics.nist.gov/cgi-bin/Xcom/xcom3_3

En çok ziyaret edilenler

Zoom in on energy range: (must be between 0.001 - 100000 MeV)

Note: If all data are not displayed in the graph, modify the energy range to view graphed data in the region of interest.
Energy range must cover at least one factor of ten (e.g., 100 to 1000 MeV).

Minimum: 0.1 MeV Maximum: 1 MeV

Change Energy Range

Constituents (Atomic Number : Fraction by Weight)

```
Z=1     : 0.000001
Z=7     : 0.000003
Z=8     : 0.294522
Z=11    : 0.005993
Z=12    : 0.002908
Z=13    : 0.007068
Z=14    : 0.018715
Z=16    : 0.120136
Z=17    : 0.000734
Z=19    : 0.001491
Z=20    : 0.062443
Z=25    : 0.002979
Z=26    : 0.004276
Z=38    : 0.009207
Z=56    : 0.469525
```

To download data in spreadsheet (array) form, choose a delimiter and use the checkboxes in the table heading. After downloading, save the output by using your browser's Save As feature.

Delimiter:

space
| (vertical bar)
tab
newline

Download data Reset

Edge	(required) Photon Energy	Scattering		Photoelectric Absorption	Pair Production		Total Attenuation	
		Coherent	Incoherent		In Nuclear Field	In Electron Field	With Coherent Scattering	Without Coherent Scattering
	MeV	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g
	1.000E-01	6.078E-02	1.263E-01	9.466E-01	0.000E+00	0.000E+00	1.134E+00	1.073E+00
	1.500E-01	2.943E-02	1.168E-01	2.996E-01	0.000E+00	0.000E+00	4.458E-01	4.164E-01
	2.000E-01	1.739E-02	1.084E-01	1.324E-01	0.000E+00	0.000E+00	2.581E-01	2.408E-01
	3.000E-01	8.106E-03	9.539E-02	4.273E-02	0.000E+00	0.000E+00	1.462E-01	1.381E-01
	4.000E-01	4.665E-03	8.594E-02	1.978E-02	0.000E+00	0.000E+00	1.104E-01	1.057E-01
	5.000E-01	3.025E-03	7.873E-02	1.119E-02	0.000E+00	0.000E+00	9.294E-02	8.991E-02
	6.000E-01	2.120E-03	7.297E-02	7.177E-03	0.000E+00	0.000E+00	8.226E-02	8.014E-02
	6.620E-01	1.749E-03	6.992E-02	5.700E-03	0.000E+00	0.000E+00	7.736E-02	7.562E-02
	8.000E-01	1.205E-03	6.423E-02	3.724E-03	0.000E+00	0.000E+00	6.916E-02	6.795E-02
	1.000E+00	7.753E-04	5.782E-02	2.327E-03	0.000E+00	0.000E+00	6.092E-02	6.015E-02

Return to selection page.

Şekil 3.45. G1 kaplama numunesi 150-662 keV total attenuation with coherent scattering (cm^2/g) değerleri

Teorik olarak XCOM programından hesaplanan kütle zayıflatma katsayıları ve lineer zayıflatma katsayı hesap sonuçları Çizelge 4.8'de gösterilmiştir.

4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Fiziksel Özellikler

Çalışmada maksimum birim ağırlık ve minimum boşluk elde etmek amacıyla farklı basınçlar altında sıkıştırılarak üretilen çimento esaslı kompozit numunelerin porozite, su emme ve kuru birim hacim ağırlık deney sonuçları Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Numunelerin fiziksel özellikleri

Karışım grubu	Karışım kodu	Karışım bileşenleri	Porozite (%)	Su emme (%)	Kuru birim hacim ağırlık (g/cm^3)
1, grup	G1-1d	B	14,0	4,5	3,11
	G1-2d	B	11,3	3,6	3,18
	G2	S	11,0	7,5	3,06
	G3	K	19,6	10,4	1,89
	G4	M	15,0	5,1	2,92
	G5	H	19,9	6,7	2,97
	G6	L	23,3	9,5	2,45
	G7	SD	17,7	10,0	1,78
	G8	V	50,9	55,1	0,92
2, grup	G9	B+%10SD	11,9	3,8	3,10
	G10	S+%10SD	12,0	4,0	2,99
	G11	K+%10SD	16,2	9,5	0,88
	G12	M+%10SD	10,9	3,8	2,91
	G13	H+%10SD	15,6	5,1	3,05
	G14	L+%10SD	21,5	8,4	2,55
3, grup	G15	B+S	11,4	3,5	3,23
	G16	B+K	22,1	8,8	2,52
	G17	B+M	11,9	4,0	3,00
	G18	B+H	14,7	4,8	3,06
	G19	B+L	18,3	6,3	2,89
4, grup	G20	B+S+%10SD	13,0	4,2	3,13
	G21	B+K+%10SD	15,0	5,4	2,79
	G22	B+M+%10SD	11,8	3,9	3,05
	G23	B+H+%10SD	25,4	8,6	2,94
	G24	B+L+%10SD	13,7	4,5	3,06
5, grup	G25	B+S+K	18,0	6,7	2,70
	G26	B+S+K+M	13,5	5,1	2,66
	G27	B+S+K+M+H	14,4	5,2	2,77
	G28	B+S+K+M+H+L	19,4	7,1	2,73
6, grup	G29	B+S+K	15,5	5,4	2,86
	G30	B+S+K	18,0	6,7	2,67
	G31	B+S+K	15,4	5,4	2,84
	G32	B+S+K	16,9	6,1	2,79
7, grup	G33	V	56,5	59,3	0,95

4.1.1. Porozite

Farklı agrega tipi ile üretilen çimento esaslı kaplama numunelerinin porozite oranı deney sonuçları Şekil 4.1'de ve verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. Porozite oranı en yüksek V tipi agrega ile üretilen G8 numunesinde %50,9, en düşük S tipi agrega ile üretilen G2 numunesinde ise %11,0 olarak elde edilmiştir. Barit agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numune farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin porozite oranı %11,3 iken, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin porozite oranı %14,0 olduğu tespit edilmiştir.

2.grupta G9-G10-G11-G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Porozite oranı en yüksek L tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren G14 numunesinde %21,5 olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük porozite oranı ise M tipi agrega ve %10 silis dumanı içeren G12 numunesinde %10,9 olarak bulunmuştur.

1.grup olarak üretilen G1-G2-G3-G4-G5-G6 kodlu numunelere %10 silis dumanı mineral katkı ilave edilerek 2.grup G9-G10-G11-G12-G13-G14 numuneleri üretilmiştir. Barit, selestit, kolemanit, hematit, limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin porozite oranları yaklaşık olarak sırasıyla %6, %17, %27, %21, %8 oranında azalmalar meydana gelmiştir. Buna karşılık manyetit agregalı numunelerde ise %10 artış gözlemlenmiştir. Silis dumanı kullanımının numunelerin boşluk oranını düşürdüğü ve deney sonuçlarının literatürle uyumlu olduğu belirlenmiştir (Özcan, 2005; Mutlu, 2020).

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Porozite oranı en yüksek barit ve kolemanit tipi agrega ile üretilen G16 numunesinde %22,1, en düşük barit ve selestit tipi agrega ile üretilen G15 numunesinde %11,4 olarak elde edilmiştir.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. Porozite oranı en yüksek barit, hematit tipi agrega ve %10 silis dumanı ilavesi ile üretilen G23 numunesinde %25,4 olduğu görülmektedir. Buna karşılık porozite oranı en düşük barit, manyetit tipi agrega ve %10 silis dumanı ile üretilen G22 numunesinde %1,8 olarak elde edilmiştir.

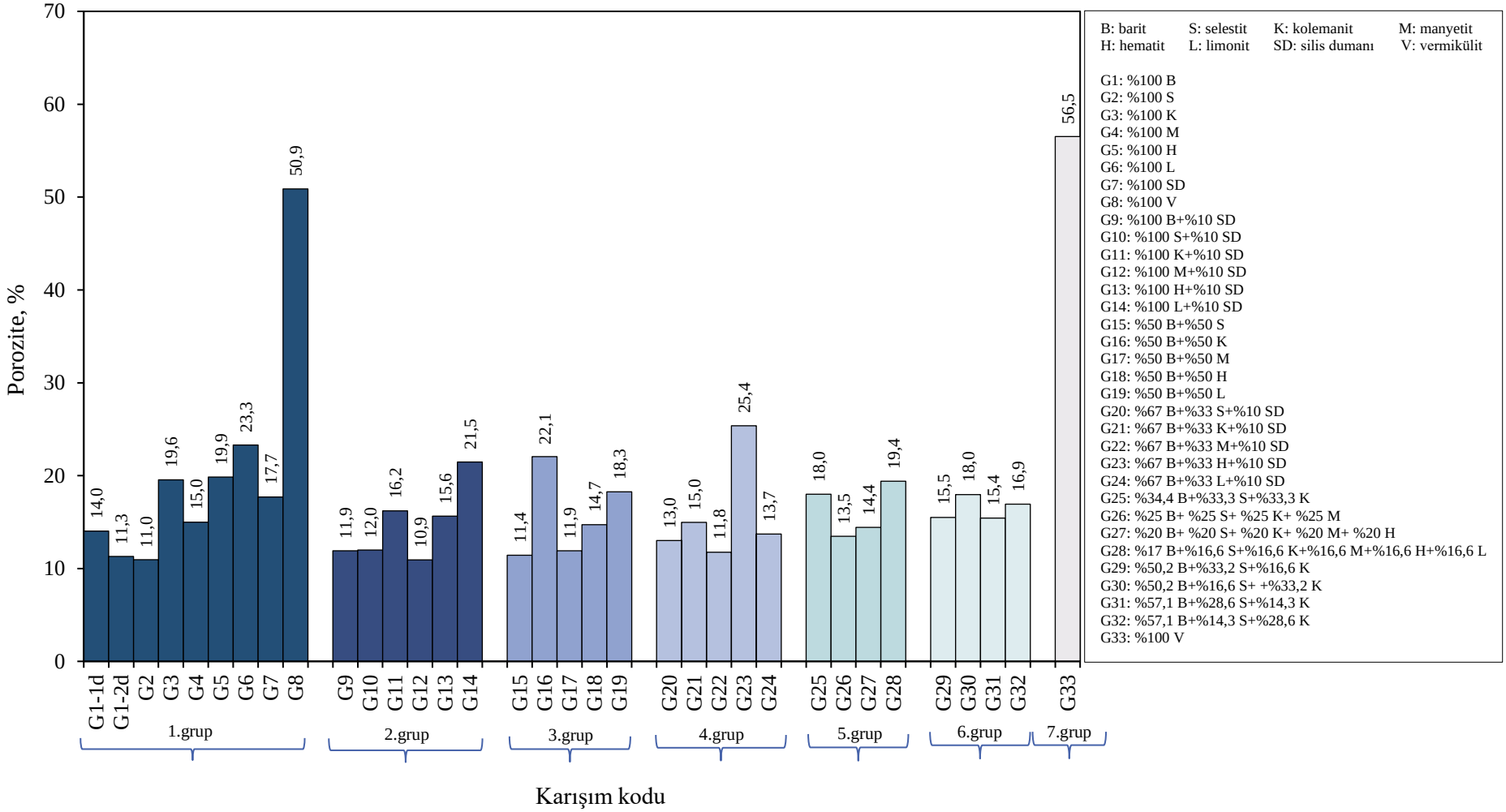
3.grup kaplama numunelerinden G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler %10 silis dumanı ilave edilerek 4.grup G20-G21-G22-G23-G24 numuneleri üretilmiştir. %10 silis dumanı ilavesi porozite oranını barit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen G21 numunesinde %32, barit ve manyetit agrega tipi ile üretilen G22 numunesinde %1, barit ve limonit agrega tipi ile üretilen G24 numunesinde %14 oranında azalmalar görülmektedir. Buna karşılık barit ve selestit agrega tipi ile üretilen G20 numunesinde %14 ve karşılık barit ve hematit agrega tipi ile üretilen G23 numunesinde %72 oranında artışlar görülmektedir. SD kullanımı bazı numunelerin boşluk oranını düşürürken bazı numunelerin porozite oranını arttırdığı sonucuna varılmıştır.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. Porozite oranı en yüksek barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit ve limonit agrega tipi ile üretilen G28 numunesinde %19,4 olduğu, buna karşılık en düşük barit, selestit, kolemanit, manyetit tipi agrega ile üretilen G26 numunesinde %13,5 olduğu görülmektedir.

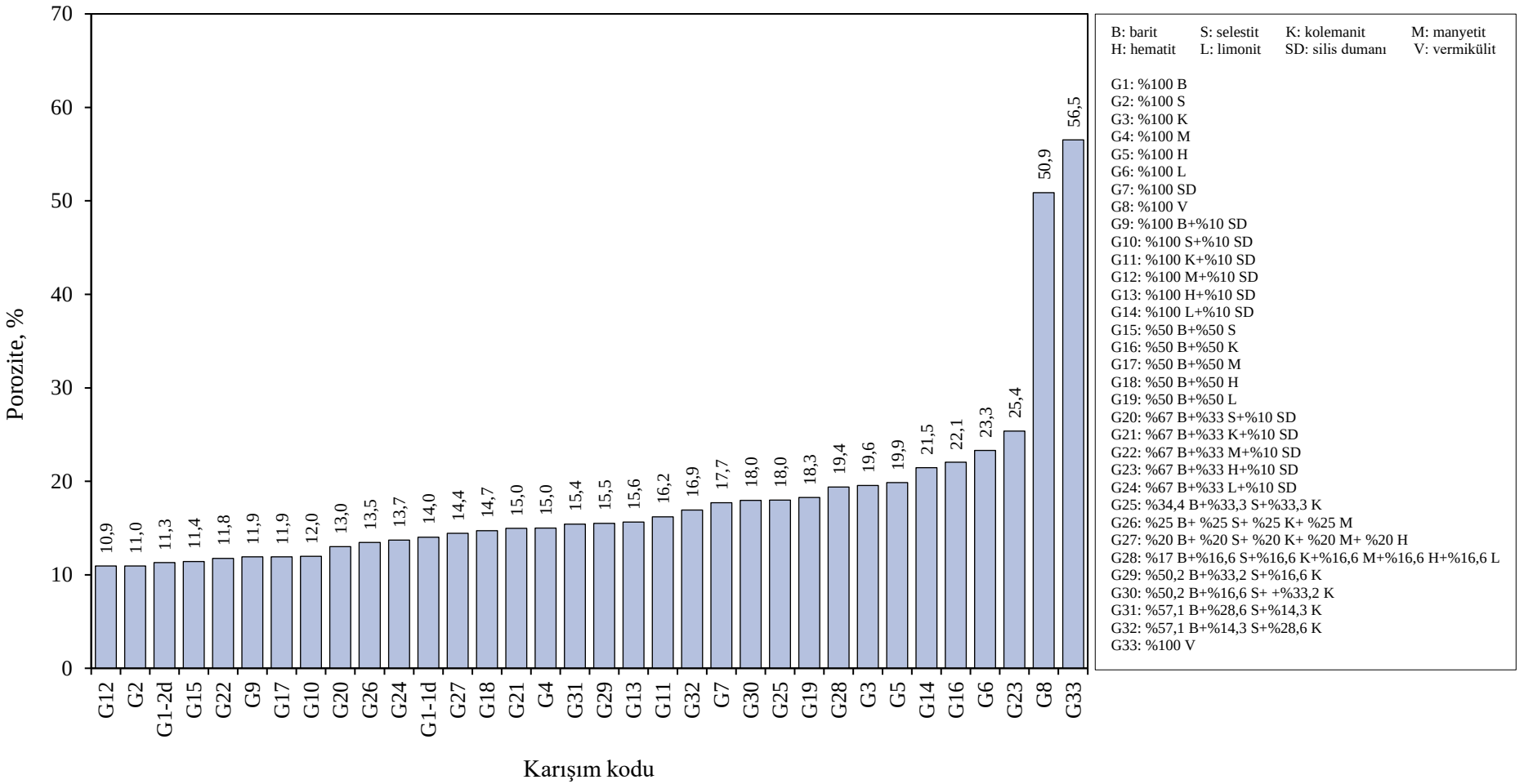
6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit, kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerin porozite oranı en yüksek ve en düşük sırasıyla G30 numunesinde %18,0 ve G31 numunesinde %15,4 olduğu tespit edilmiştir.

7.grupta V agrega tipi ile elle sıkıştırılarak üretilen G33 numunesinin porozite oranı %56,5 olarak elde edilmiştir. Buna karşılık aynı V agrega tipi ile belirli basınç altında sıkıştırılarak üretilen G8 numunesinin porozite oranı ise %50,9 olarak bulunmuştur. Sıkıştırma faktörünün porozite oranını yaklaşık olarak %10 oranında düşürdüğü deney sonuçlarından elde edilmiştir. (Akyüz, 2013; Özcan, 2005; Mutlu, 2020).

Üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin içerisinde (32 karışım, elle sıkıştırılarak üretilen vermikülit agregalı karışım hariç) porozite oranı en düşük %10 silis dumanı içeren manyetit agregalı kompozit karışımlarda %10,9 (G12), en yüksek vermikülit agregalı karışımlarda %50,9 (G8) olarak belirlenmiştir. Üretilen kaplama numunelerin V tipi agrega ile üretilen numuneler dışında ortalama porozite değerlerinin %10 dolaylarında olduğu tespit edilmiştir. Üretilen kaplama numunelerinin porozite oranlarının sıralı değerleri Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Numunelerin porozite değerleri



Şekil 4.2. Numunelerin porozite sıralı değerleri

4.1.2. Su Emme

Farklı agrega tipi ile üretilen çimento esaslı kaplama numunelerinin su emme oranı deney sonuçları Şekil 4.3'te verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. Su emme oranı en yüksek vermikülit tipi agrega ile üretilen G8 numunesinde %55,1, en düşük B tipi agrega ile üretilen G1-2d numunesinde ise %3,6 olarak elde edilmiştir. Barit agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numune farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin su emme oranı %3,6 iken, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin su emme oranı %4,5 olduğu tespit edilmiştir.

2.grupta G9-G10-G11-G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Su emme oranı en yüksek kolemanit tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren G11 numunesinde %9,5 olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük su emme oranı ise manyetit tipi agrega ve %10 silis dumanı içeren G12 numunesinde %3,8 olarak bulunmuştur.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11-G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit, limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin su emme oranları %5, %46, %10, %27, 523, %11 oranında azalmalar meydana gelmiştir. Silis dumanının numunelerin boşluk oranına azalmaya bağlı olarak su emme oranlarını da düşürdüğü gözlemlenmiştir ve benzer sonuçlar diğer araştırmacılar tarafından da ifade edilmiştir. (Özcan, 2005; Mutlu, 2020).

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Su emme oranı en yüksek barit ve kolemanit tipi agrega ile üretilen G16 numunesinde %8,8, en düşük barit ve selestit tipi agrega ile üretilen G15 numunesinde %3,5 olarak elde edilmiştir.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. Su emme oranı en yüksek barit, hematit tipi agrega ve %10 silis dumanı ilavesi ile üretilen G23 numunesinde %8,6 olduğu görülmektedir. Buna karşılık porozite oranı en düşük barit, manyetit tipi agrega ve %10 silis dumanı ile üretilen G22 numunesinde %3,9 olarak elde edilmiştir.

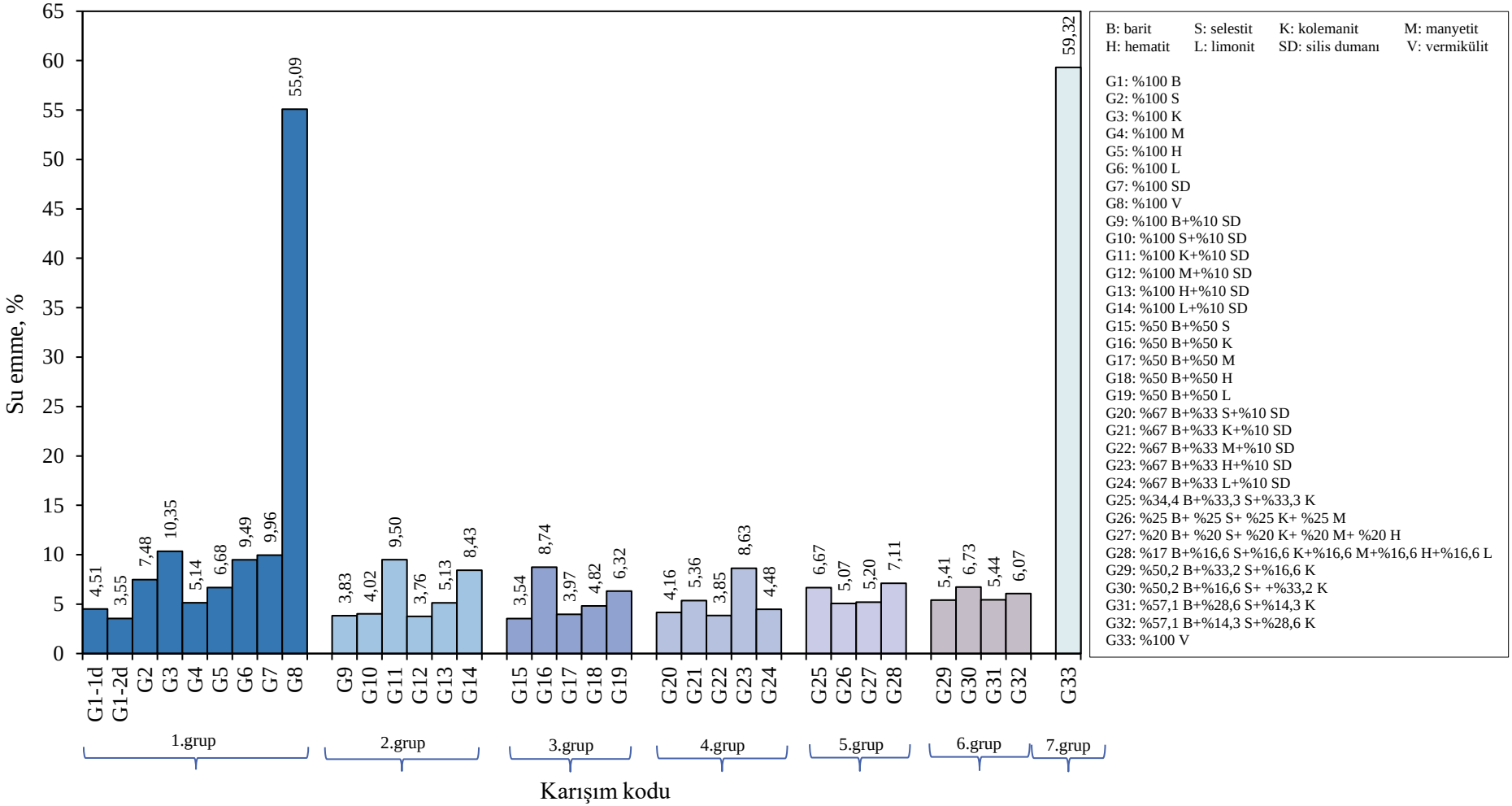
3.grup kaplama numunelerinden G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler %10 silis dumanı ilave edilerek 4.grup G20-G21-G22-G23-G24 numuneleri üretilmiştir. %10 silis dumanı ilavesi su emme oranını barit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen G21 numunesinde %39, barit ve manyetit agrega tipi ile üretilen G22 numunesinde %3, barit ve limonit agrega tipi ile üretilen G24 numunesinde %29 oranında azalmalar görülmektedir. Buna karşılık barit ve selestit agrega tipi ile üretilen G20 numunesinde %18 ve karşılık barit ve hematit agrega tipi ile üretilen G23 numunesinde %79 oranında artışlar görülmektedir.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. Su emme oranı en yüksek barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit ve limonit agrega tipi ile üretilen G28 numunesinde %7,1 olduğu, buna karşılık en düşük barit, selestit, kolemanit, manyetit tipi agrega ile üretilen G26 numunesinde %5,1 olduğu görülmektedir.

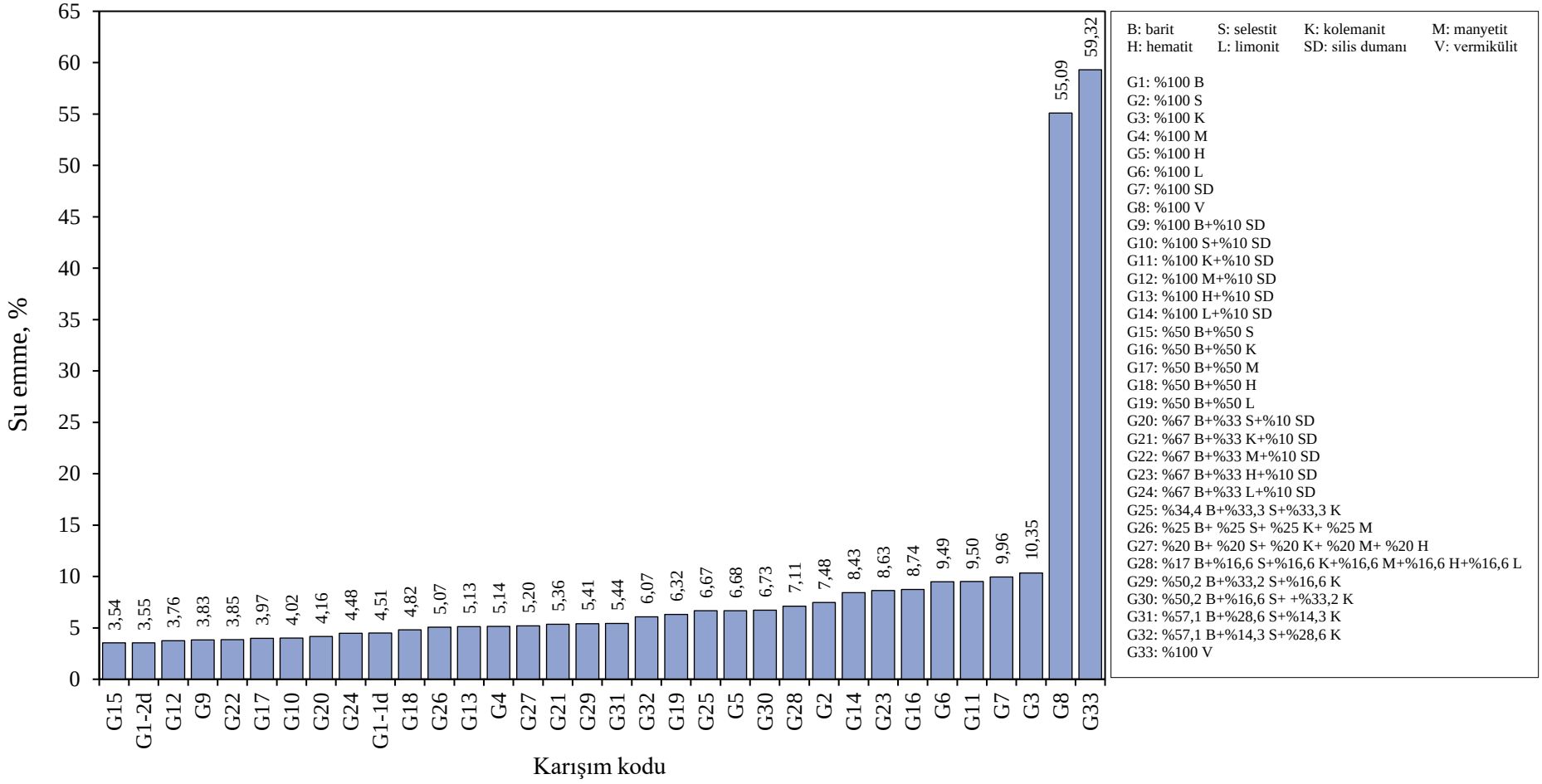
6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit, kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerin su emme oranı en yüksek ve en düşük sırasıyla G30 numunesinde %6,7 ve G29 numunesinde %5,4 olduğu tespit edilmiştir.

7.grupta V agrega tipi ile elle sıkıştırılarak üretilen G33 numunesinin porozite oranı %59,3 olarak elde edilmiştir. Buna karşılık aynı V agrega tipi ile belirli basınç altında sıkıştırılarak üretilen G8 numunesinin porozite oranı ise %55,1 olarak bulunmuştur. Sıkıştırma faktörünün su emme oranını yaklaşık olarak %7 oranında düşürdüğü deney sonuçlarından elde edilmiştir. (Akyüz, 2013; Özcan, 2005; Mutlu, 2020).

Üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin içerisinde (32 karışım, elle sıkıştırılarak üretilen vermikülit agregalı karışım hariç) su emme oranı en düşük barit ve selestit agregalı kompozit karışımlarda %3,5 (G15), en yüksek vermikülit agregalı karışımlarda %55,1 (G8) olarak belirlenmiştir. Üretilen kaplama numunelerin V tipi agrega ile üretilen numuneler dışında ortalama porozite değerlerinin %5 dolaylarında olduğu tespit edilmiştir. Üretilen kaplama numunelerinin porozite oranlarının sıralı değerleri Şekil 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.3. Numunelerin su emme değerleri



Şekil 4.4. Numunelerin su emme sıralı değerleri

4.1.3. Kuru Birim Hacim Ağırlık

Farklı agrega tipi ile üretilen çimento esaslı kaplama numunelerinin kuru birim hacim ağırlık deney sonuçları Şekil 4.5'te verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. Kuru birim hacim ağırlık değeri en yüksek barit tipi agrega ile üretilen G1-2d numunesinde 3,18 g/cm^3, en düşük vermikülit tipi agrega ile üretilen G8 numunesinde ise 0,92 g/cm^3 olarak elde edilmiştir. Barit agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numune farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin kuru birim hacim ağırlığı 3,18 g/cm^3 iken, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ise 3,11 g/cm^3 olduğu tespit edilmiştir.

2.grupta G9-G10-G11-G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Kuru birim hacim ağırlık değeri en yüksek barit tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren G9 numunesinde3,10 g/cm^3 olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük porozite oranı ise kolemanit tipi agrega ve %10 silis dumanı içeren G11 numunesinde 0,88 g/cm^3 olarak bulunmuştur.

1.grup olarak üretilen G1-G2-G3-G4-G5-G6 kodlu numunelere %10 silis dumanı mineral katkı ilave edilerek 2.grup G9-G10-G11-G12-G13-G14 numuneleri üretilmiştir. Barit, selestit, kolemanit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin kuru birim hacim ağırlık değeri yaklaşık olarak sırasıyla %1, %2, %53, %21 oranında azalmalar meydana gelmiştir. Buna karşılık hematit ve limonit agregalı numunelerde ise sorasıyla %3 ve %4 oranında artış gözlemlenmiştir.

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Kuru birim hacim ağırlık değeri en yüksek barit ve selestit tipi agrega ile üretilen G15 numunesinde 3,23 g/cm^3, en düşük barit ve kolemanit tipi agrega ile üretilen G16 numunesinde 2,52 g/cm^3 elde edilmiştir.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. Kuru birim hacim ağırlık değeri en yüksek barit, selestit tipi agrega ve %10 silis dumanı ilavesi ile üretilen G20 numunesinde 3,13 g/cm^3 olduğu görülmektedir. Buna karşılık Kuru birim hacim ağırlığı en düşük barit, kolemanit tipi agrega ve %10 silis dumanı ile üretilen G21 numunesinde 2,79 g/cm^3 olarak elde edilmiştir.

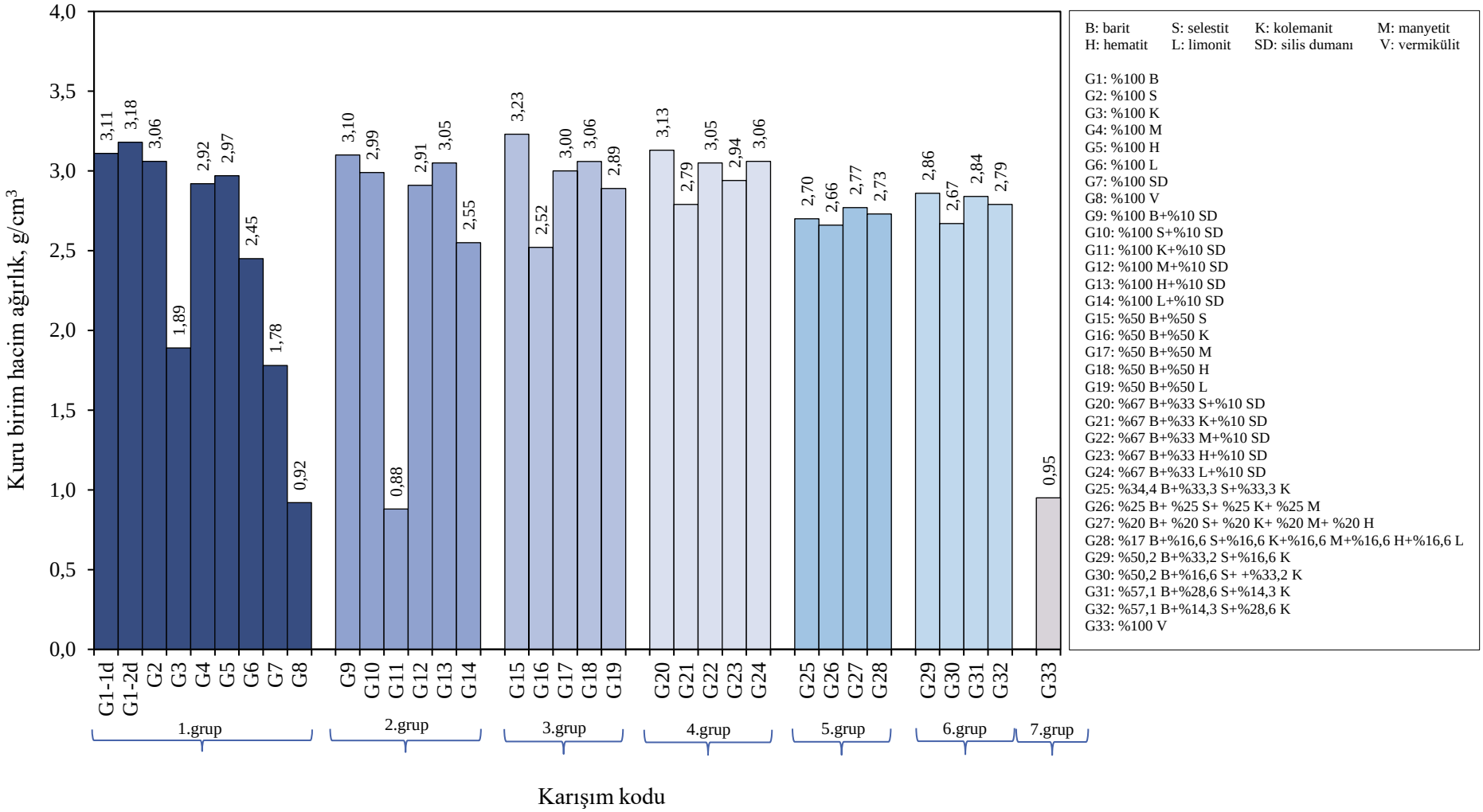
3.grup kaplama numunelerinden G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler %10 silis dumanı ilave edilerek 4.grup G20-G21-G22-G23-G24 numuneleri üretilmiştir. %10 silis dumanı ilavesi kuru birim hacim ağırlık değerini barit, selestit ve silis dumanı agrega tipi ile üretilen G20 numunesinde %3 ve barit, hematit ve silis dumanı agrega tipi ile üretilen G23 numunesinde %4 oranında azalmalar görülmektedir. Buna karşılık barit ve selestit agrega tipi ile üretilen G21 numunesinde %11, barit ve manyetit agrega tipi ile üretilen G22 numunesinde %2, barit ve limonit agrega tipi ile üretilen G24 numunesinde %9 oranında artışlar meydana gelmiştir.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. Kuru birim hacim ağırlık değeri en yüksek barit, selestit, kolemanit, manyetit ve hematit agrega tipi ile üretilen G27 numunesinde 2,77 g/cm^3 olduğu, buna karşılık en düşük barit, selestit, kolemanit ve manyetit tipi agrega ile üretilen G26 numunesinde 2,66 g/cm^3 olduğu görülmektedir.

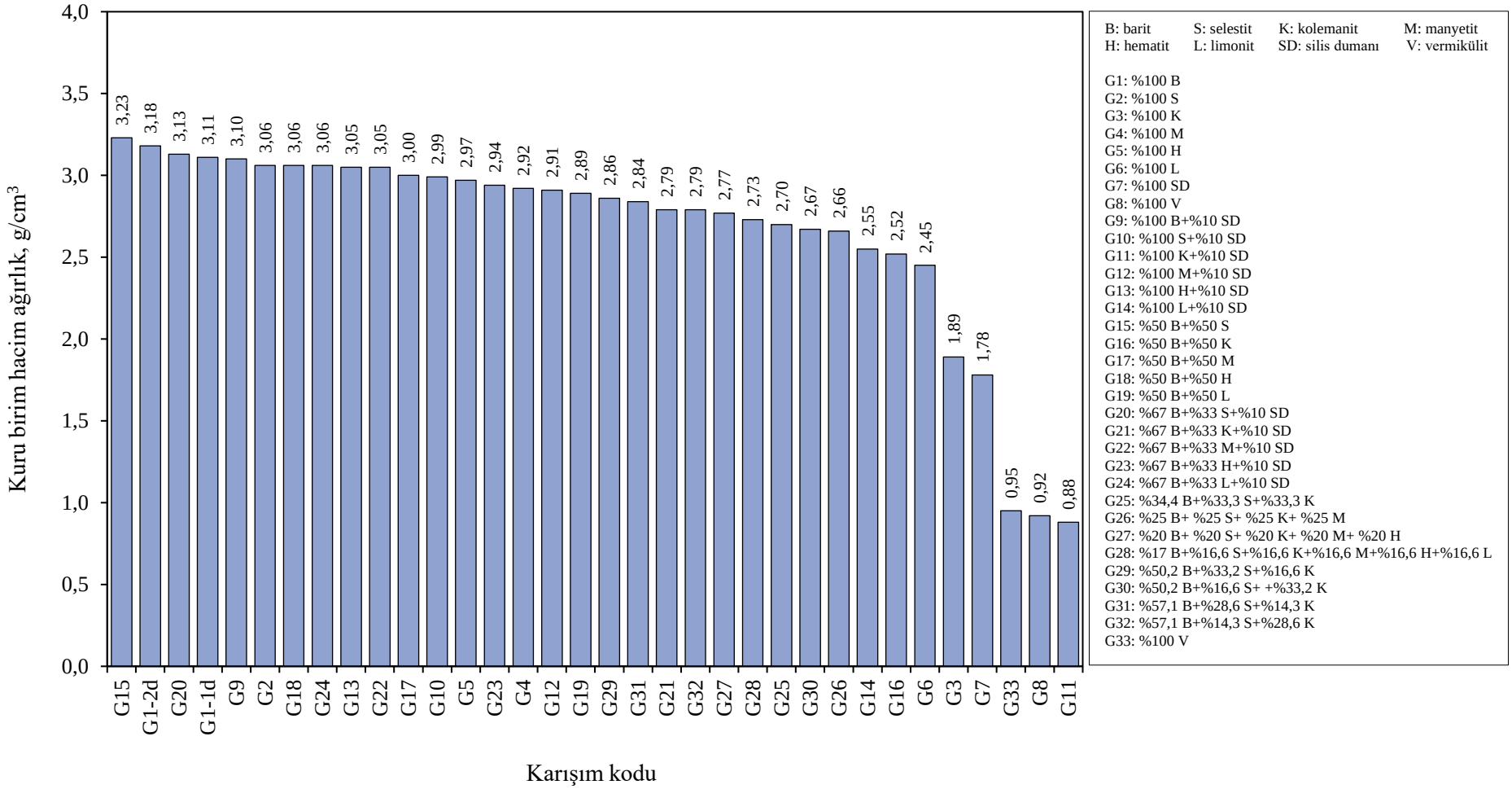
6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit, kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerin kuru birim hacim ağırlığı en yüksek ve en düşük sırasıyla G29 numunesinde 2,86 g/cm^3 ve G30 numunesinde 2,67 g/cm^3 olduğu tespit edilmiştir.

7.grupta V agrega tipi ile elle sıkıştırılarak üretilen G33 numunesinin kuru birim hacim ağırlık değeri 0,95 g/cm^3 olarak elde edilmiştir. Buna karşılık aynı V agrega tipi ile belirli basınç altında sıkıştırılarak üretilen G8 numunesinin numunesinin kuru birim hacim ağırlığı ise 0,92 g/cm^3 olarak bulunmuştur.

Üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin içerisinde (32 karışım, elle sıkıştırılarak üretilen vermikülit agregalı karışım hariç) kuru birim hacim ağırlığı en yüksek %10 silis dumanı içeren manyetit agregalı kompozit karışımlarda 3,23 g/cm^3 (G15), en düşük kolemanit agregalı karışımlarda 0,88 g/cm^3 (G11) olarak belirlenmiştir. Üretilen numunelerin (V ve K tipi agrega ile üretilen numuneler hariç) ortalama kuru birim hacim ağırlık değerlerinin 3,00 g/cm^3 dolaylarında olduğu tespit edilmiştir. Üretilen kaplama numunelerinin kuru birim hacim ağırlığı sıralı değerleri Şekil 4.6'da verilmiştir.



Şekil 4.5. Numunelerin kuru birim hacim ağırlık değerleri



Şekil 4.6. Numunelerin kuru birim hacim ağırlık sıralı değerleri

4.1.4. Isıl İletkenlik

Deneyde üretilen çimento esaslı kaplama numunelerinin ısıyı iletme kabiliyetini belirlemek amacıyla ısıl iletkenlik katsayıları tespit edilmiş ve sonuçlar Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. Numunelerin ısıl iletkenlik özellikleri

Karışım grubu	Karışım kodu	Karışım bileşenleri	Kuru birim hacim ağırlık (g/cm^3)	Isı iletkenlik katsayısı, λ_h (W/mK)
1. grup	G1-1d	B	3,11	1,140
	G1-2d	B	3,18	1,031
	G2	S	3,06	0,968
	G3	K	1,89	0,943
	G4	M	2,92	1,212
	G5	H	2,97	1,278
	G6	L	2,45	1,236
	G7	SD	1,78	0,552
	G8	V	0,92	0,317
2. grup	G9	B+%10SD	3,10	0,924
	G10	S+%10SD	2,99	0,925
	G11	K+%10SD	0,88	0,914
	G12	M+%10SD	2,91	1,136
	G13	H+%10SD	3,05	1,366
	G14	L+%10SD	2,55	1,266
3. grup	G15	B+S	3,23	1,007
	G16	B+K	2,52	0,976
	G17	B+M	3,00	0,999
	G18	B+H	3,06	1,213
	G19	B+L	2,89	1,196
4. grup	G20	B+S+%10SD	3,13	0,971
	G21	B+K+%10SD	2,79	1,023
	G22	B+M+%10SD	3,05	1,022
	G23	B+H+%10SD	2,94	1,132
	G24	B+L+%10SD	3,06	0,949
5. grup	G25	B+S+K	2,70	0,983
	G26	B+S+K+M	2,66	0,972
	G27	B+S+K+M+H	2,77	1,113
	G28	B+S+K+M+H+L	2,73	1,207
6. grup	G29	B+S+K	2,86	0,947
	G30	B+S+K	2,67	0,985
	G31	B+S+K	2,84	1,059
	G32	B+S+K	2,79	0,996
7. grup	G33	V	0,95	0,294

Farklı agrega tipi ile üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin ısıl iletkenlik katsayısı deney sonuçları Şekil 4.7'de verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. Isıl iletkenlik katsayı değeri en yüksek hematit tipi agrega ile üretilen G5 numunesinde 1,278 W/mK, en düşük vermikülit tipi agrega ile üretilen G8 numunesinde ise 0,317 W/mK olarak bulunmuştur. V agrega tipi ile üretilen numunesinin ısıl iletkenlik katsayısı değerinin TS 825'e göre en düşük elde edilmesi, vermikülitin boşluklu ve hafif bir yapıda olması, birim hacim ağırlığının düşük özelliklerinin iyi olması ile açıklanabilir. Birim ağırlık değeri arttıkça boşluk oranı azaldığı için ısıl iletkenlik katsayı değerlerinde bir artış görülmektedir (Erdoğan, 2013; Toksoy, 1997; Tokay, 2019). Barit agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numu farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Isıl iletkenlik katsayı değeri yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin 1,031 W/mK iken, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin 1,140 W/mK olarak belirlenmiştir.

2.grupta G9-G10-G11-G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Isıl iletkenlik katsayı değeri en yüksek hematit tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren G13 numunesinde 1,366 W/mK olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük ısıl iletkenlik katsayısı kolemanit tipi agrega ve %10 silis dumanı içeren G11 numunesinde 0,914 W/mK olarak bulunmuştur.

1.grup olarak üretilen G1-G2-G3-G4-G5-G6 kodlu numunelere %10 silis dumanı mineral katkı ilave edilerek 2.grup G9-G10-G11-G12-G13-G14 numuneleri üretilmiştir. Barit, selestit, kolemanit, manyetit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin ısıl iletkenlik katsayı değeri yaklaşık olarak sırasıyla %15, %4, %3, %6 oranında azalmalar meydana gelmiştir. Buna karşılık hematit ve limonit agregalı numunelerde ise sırasıyla %7 ve %2 oranında artış gözlemlenmiştir.

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Isıl iletkenlik katsayı değeri en yüksek barit ve hematit tipi agrega ile üretilen G18 numunesinde 1,213 W/mK, en düşük barit ve kolemanit tipi agrega ile üretilen G16 numunesinde 0,976 W/mK olarak elde edilmiştir.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. Isıl iletkenlik katsayı değeri en yüksek barit, hematit tipi agrega ve %10 silis dumanı ilavesi ile üretilen G23 numunesinde 1,132 W/mK olduğu görülmektedir. Buna karşılık ısıl iletkenlik katsayı

değeri en düşük barit ve limonit tipi agrega ve %10 silis dumanı ile üretilen G24 numunesinde 0,949 W/mK olarak elde edilmiştir.

3.grup kaplama numunelerinden G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler %10 silis dumanı ilave edilerek 4.grup G20-G21-G22-G23-G24 numuneleri üretilmiştir. %10 silis dumanı ilavesi ısıl iletkenlik katsayı değerini barit ve selestit agrega tipi ile üretilen G20 numunesinde numunesinde %4, barit ve limonit agrega tipi ile üretilen G24 numunesinde numunesinde %21 oranında azalmalar görülmektedir. Buna karşılık barit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen G21 numunesinde %5, barit ve manyetit agrega tipi ile üretilen G22 numunesinde %2 ve barit ve hematit agrega tipi ile üretilen G23 numunesinde numunesinde %7 oranında artış görülmektedir.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. Isıl iletkenlik katsayı değeri en yüksek barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit ve limonit agrega tipi ile üretilen G28 numunesinde1,207 W/mK, buna karşılık en düşük barit, selestit, kolemanit ve manyetit tipi agrega ile üretilen G26 numunesinde 0,972 W/mK olduğu görülmektedir.

6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit, kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerin ısıl iletkenlik katsayı değeri en yüksek ve en düşük sırasıyla G31 numunesinde 1,059 W/mK, ve G29 numunesinde 0,947 W/mK olduğu tespit edilmiştir.

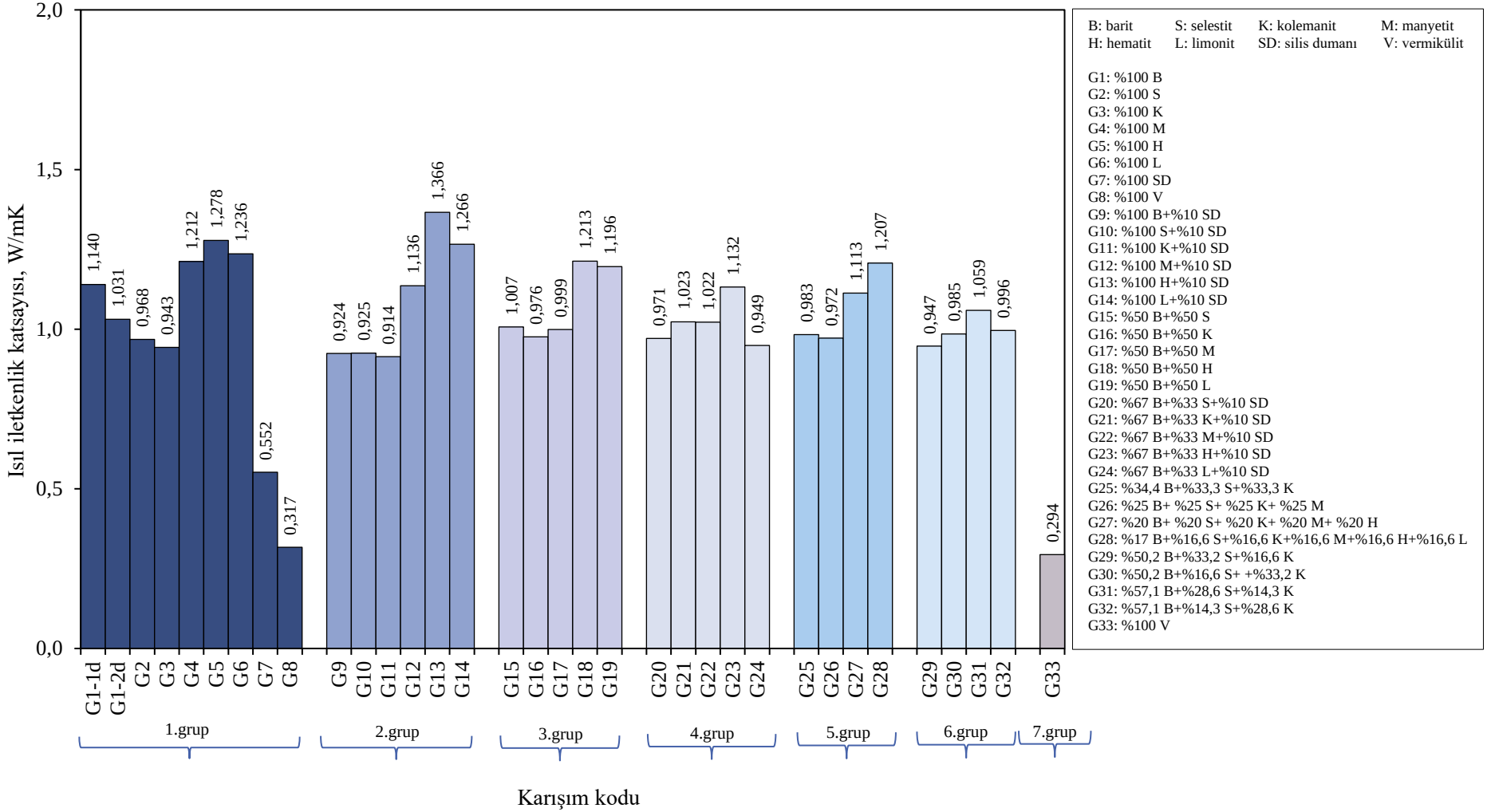
7.grupta V agrega tipi ile elle sıkıştırılarak üretilen G33 numunesinin ısıl iletkenlik katsayı değeri 0,294 W/mK olarak elde edilmiştir. Buna karşılık aynı V agrega tipi ile belirli basınç altında sıkıştırılarak üretilen G8 numunesinin numunesinin ısıl iletkenlik katsayı ise 0,317 W/mK olarak bulunmuştur. Sıkıştırma faktörünün ısıl iletkenlik katsayı değerini %7,26 oranında azalttığı deney sonuçlarından elde edilmiştir. Sıkıştırma faktörünün boşluk oranını düşürerek ısıl iletkenlik katsayı değerini düşürdüğü ve deney sonuçlarının literatürle uyumlu olduğu belirlenmiştir (Erdoğan, 2013; Toksoy, 1997; Tokay, 2019).

TS 825 Binalarda ısı yalıtım kuralları yönetmeliğine göre ısıl iletkenlik katsayı en düşük 0.20-0.39 W/mK ile pomza blok, en yüksek 2.10 W/mK ile normal beton (donatılı) tanımlanmıştır. Üretilen kaplama numunelerinin ısıl iletkenlik katsayı değerleri TS 825 sınır değerleri içerisinde olduğu görülmüştür. Isıl iletkenlik katsayısı (λ) ısıyı iletmenin bir

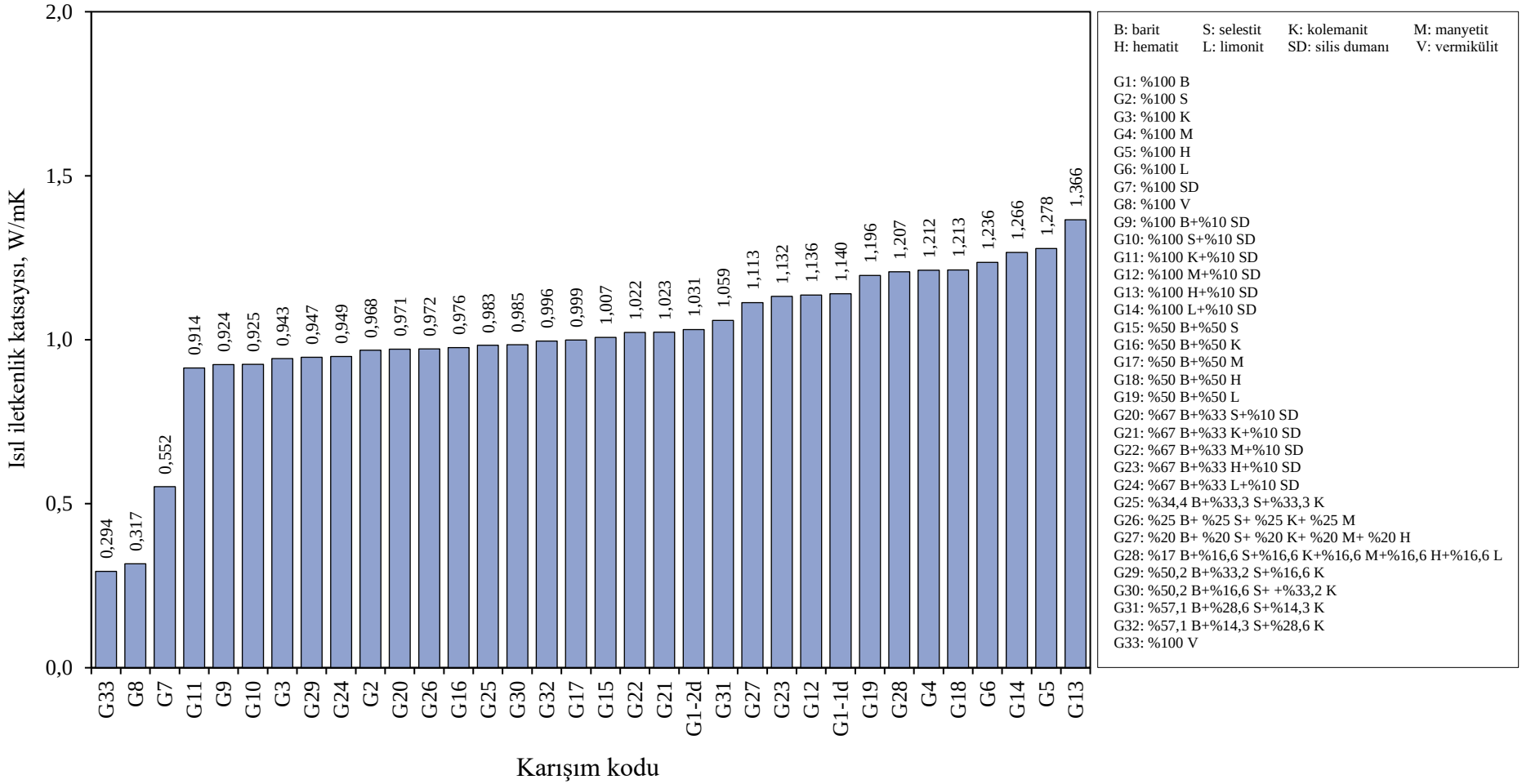
ölçüsüdür ve Türk ve Avrupa standartlarına göre; bir malzemenin ısı yalıtım amaçlı kullanılabilmesi için λ değerinin olabildiğince 0'a yakın olması gerekmektedir.

Üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin ısıl iletkenlik katsayısı en düşük vermikülit agregalı karışımlarda 0,294 W/mK (G33) olarak belirlenmiştir (Şekil 4.8). Üretilen kaplama numunelerinin ısıl iletkenlik katsayısı sıralı değerleri Şekil 4.8'de verilmiştir. En düşük değerleri ısıl iletkenlik değerleri vermikülit kullanılarak üretilen G33 ve G8 numuneleri olduğu tespit edilmiştir. Bu durum vermikülitin boşluklu ve hafif bir yapıda olmasına bağlı olarak açıklanabilmekte ve bu konuda yapılan araştırmalarda da benzer sonuçlar elde edilmiştir (Erdoğan, 2013; Toksoy, 1997; Tokay, 2019).

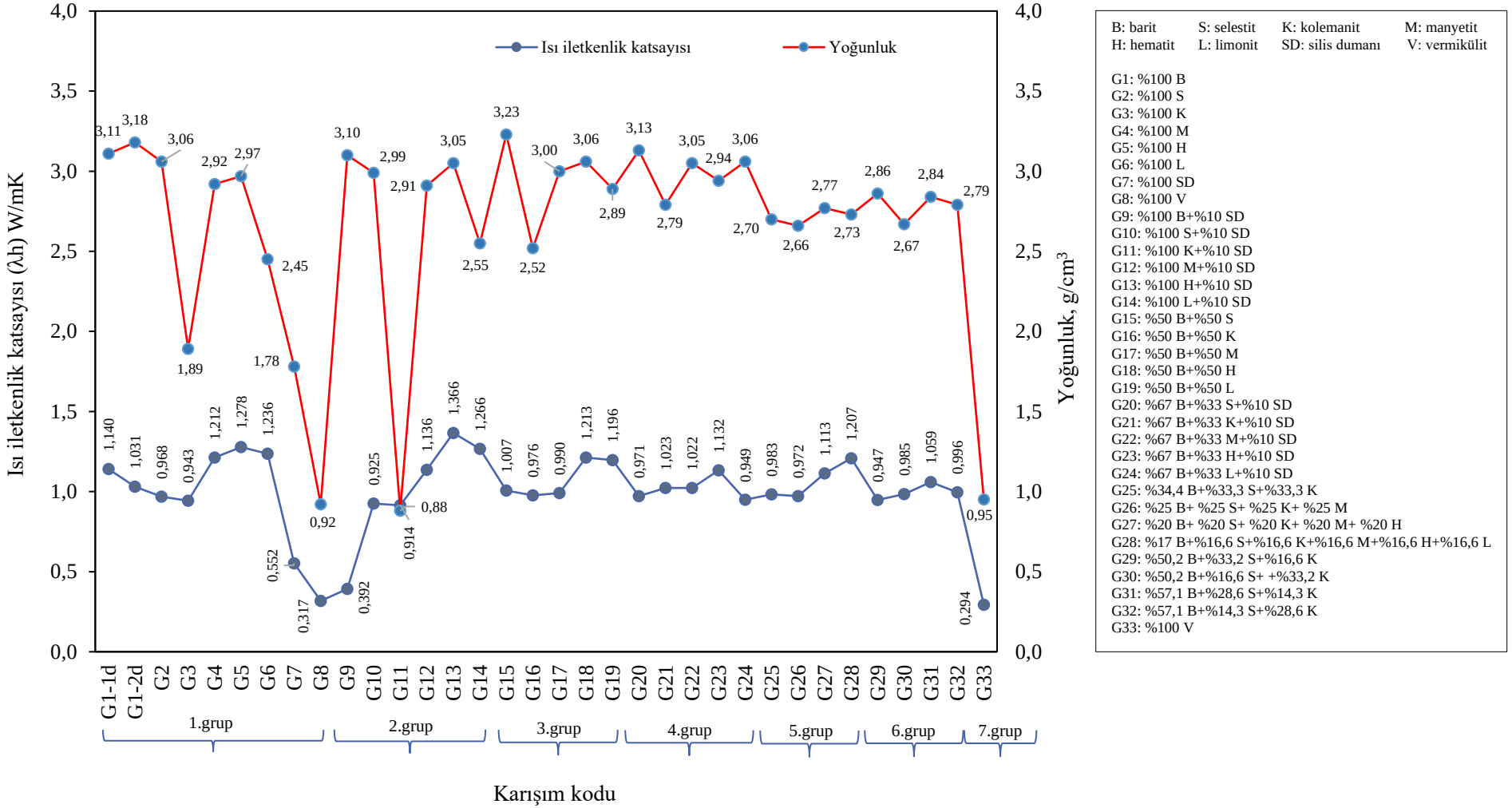
Isıl iletkenlik katsayısı yoğunluk arasındaki ilişki Şekil 4.9'da verilmiştir. Elden (2011) ve Tokyay (2019)'ın elde ettiği bulgulara göre, betonun birim ağırlığı azaldıkça ısı yalıtım özelliklerinde iyileşme olduğu, ısıl iletkenlik katsayısı ile birim ağırlık değerleri arasında ters orantı olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca agrega türünün de önemli bir parametre olduğu ifade edilmiştir.



Şekil 4.7. Numunelerin ısıl iletkenlik değerleri



Şekil 4.8. Numunelerin ısıl iletkenlik sıralı değerleri



Şekil 4.9. Numunelerin ısıl iletkenlik yoğunluk ilişkisi

4.2. Mekanik Özellikler

Deneysel çalışmada farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin 28 günlük eğilme ve basınç dayanımı deney sonuçları Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Numunelerin mekanik özellikleri

Karışım grubu	Karışım kodu	Karışım bileşenleri	Kuru birim hacim ağırlık (g/cm^3)	Eğilme dayanımı (MPa)	Basınç dayanımı (MPa)
1. grup	G1-1d	B	3,11	7,5	45,5
	G1-2d	B	3,18	8,5	52,3
	G2	S	3,06	6,6	34,8
	G3	K	1,89	3,2	19,2
	G4	M	2,92	12,5	72,1
	G5	H	2,97	9,9	68,4
	G6	L	2,45	6,8	49,0
	G7	SD	1,78	10,7	74,1
	G8	V	0,92	2,8	6,1
2. grup	G9	B+%10SD	3,10	8,4	56,4
	G10	S+%10SD	2,99	7,7	48,0
	G11	K+%10SD	0,88	3,4	12,3
	G12	M+%10SD	2,91	13,8	68,2
	G13	H+%10SD	3,05	10,3	79,8
	G14	L+%10SD	2,55	6,8	59,7
3. grup	G15	B+S	3,23	8,3	53,7
	G16	B+K	2,52	7,2	32,9
	G17	B+M	3,00	9,0	51,2
	G18	B+H	3,06	9,6	73,1
	G19	B+L	2,89	8,0	59,5
4. grup	G20	B+S+%10SD	3,13	7,7	44,0
	G21	B+K+%10SD	2,79	8,2	46,6
	G22	B+M+%10SD	3,05	9,1	59,9
	G23	B+H+%10SD	2,94	12,1	69,0
	G24	B+L+%10SD	3,06	8,1	59,9
5. grup	G25	B+S+K	2,70	5,8	37,6
	G26	B+S+K+M	2,66	4,2	32,6
	G27	B+S+K+M+H	2,77	5,9	39,3
	G28	B+S+K+M+H+L	2,73	4,4	31,8
6. grup	G29	B+S+K	2,86	5,9	38,8
	G30	B+S+K	2,67	6,0	42,3
	G31	B+S+K	2,84	3,2	11,0
	G32	B+S+K	2,79	6,1	40,3
7. grup	G33	V	0,95	2,3	4,4

4.2.1. Eğilme Dayanımı

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin eğilme dayanımı deney sonuçları Şekil 4.10'da verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. 28 günlük eğilme dayanımı en yüksek manyetit tipi agrega ile üretilen G4 numunesinde 12,5 MPa ve en düşük vermikülit tipi agrega ile üretilen G8 numunesinde 2,8 MPa olarak elde edilmiştir. Barit agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numuneler farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin eğilme dayanım 8,5 MPa, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ki ise 7,5 MPa olduğu tespit edilmiştir.

2.grupta G9-G10-G11-G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde 28 günlük eğilme dayanımı en yüksek manyetit tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G12 kodlu) 13,8 MPa olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük eğilme dayanımı ise K tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G11 kodlu) 3,4 MPa olarak bulunmuştur.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11-G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, komelamnit manyetit, hematit, limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin eğilme dayanımlarında sırasıyla %12, %17, %5, %10, %4 ve %1 oranında artışlar elde edilmiştir. Silis dumanı çok ince taneli bir malzeme olmasından dolayı numunelerin boşluk oranını düşürerek eğilme dayanımlarını arttırmıştır (Özcan, 2005; Mutlu, 2020).

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde 28 günlük en yüksek eğilme dayanımı barit ve hematit (B ve H) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G18 kodlu) 9,6 MPa olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük dayanım ise barit ve kolemanit (B ve K) tipi agregalı numunesinde (G16 kodlu) 7,2 MPa olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde 28 günlük eğilme dayanımı en yüksek barit ve hematit tipi agrega ve %10 silis dumanı ile üretilen G23 numunesinde 12,1 MPa olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük dayanım ise barit ve selestit tipi agrega ve %10 silis dumanı (B ve S) tipi agregalı numunesinde (G20 kodlu) 7,7 MPa olarak bulunmuştur.

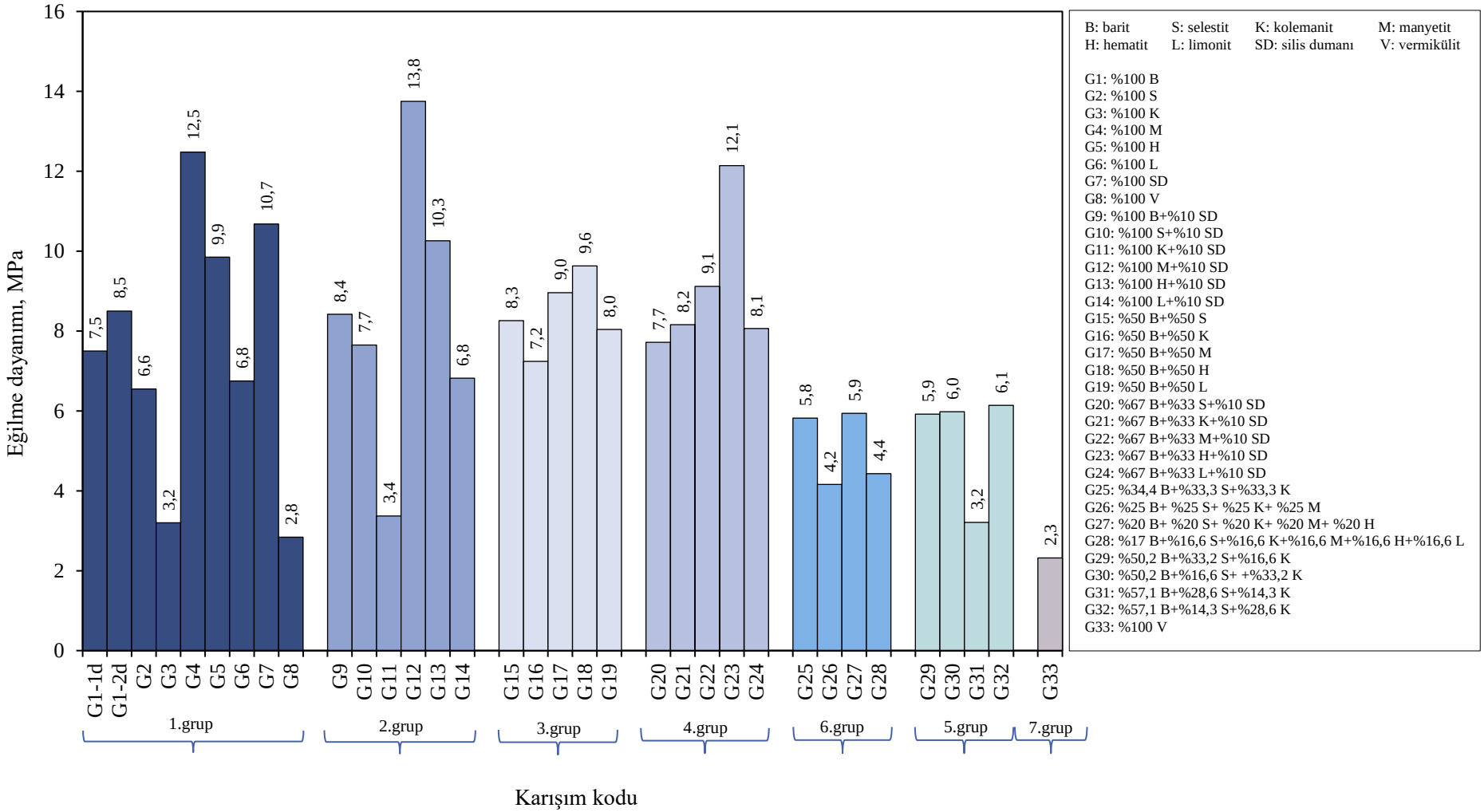
4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, kolemanit manyetit, hematit, limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin eğilme dayanımında G20 kodlu numunede %7 oranında azalma görülmesine karşın, diğer numunelerde sırasıyla %13, %2, %26 ve %0,3 oranında artışlar elde edilmiştir. Silis dumanı kullanımı ile eğilme dayanımı değerlerinde artışlar olduğu tespit edilmiştir (Özcan, 2005; Mutlu, 2020).

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde 28 günlük eğilme dayanımı en yüksek barit, selestit, kolemanit ve hematit (B, S, K, M, H) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G27 kodlu) 6,0 MPa olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük dayanım ise barit, selestit, kolemanit ve manyetit (B, S, K, M) tipi agregalı numunesinde (G26 kodlu) 4,2 MPa olduğu tespit edilmiştir.

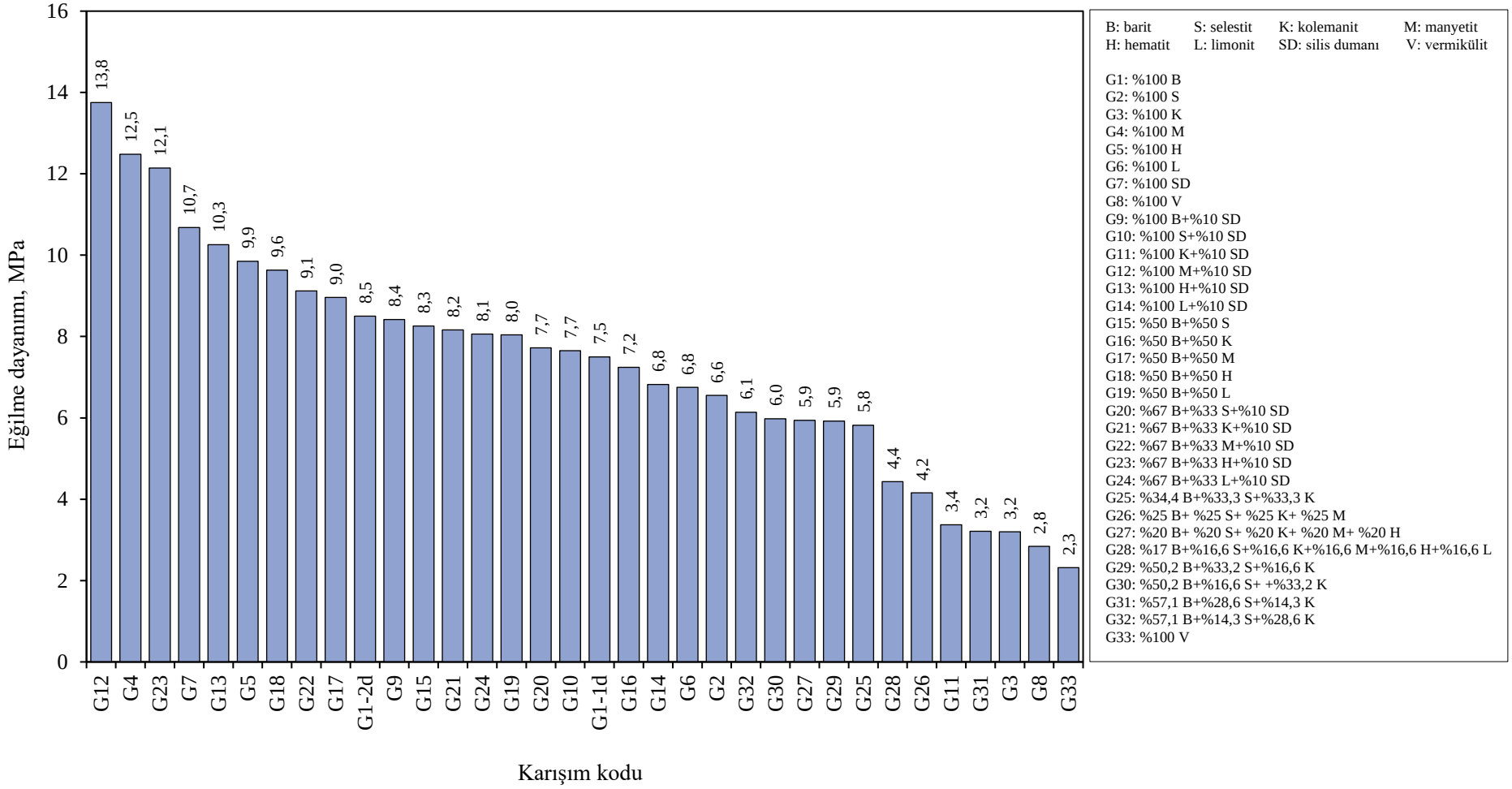
6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde 28 günlük eğilme dayanımı en yüksek 6,1 MPa (G32 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük dayanım ise 3,2 MPa (G31 kodlu) olarak bulunmuştur.

7.grupta vermikülit agrega tipi ile elle sıkıştırılarak üretilen G33 numunesinin 28 günlük eğilme dayanımı 2,3 MPa olarak elde edilmiştir. Buna karşılık aynı vermikülit agrega tipi ile belirli basınç altında sıkıştırılarak üretilen G8 28 günlük eğilme dayanımı ise 2,8 MPa olarak bulunmuştur. Sıkıştırma faktörünün 28 günlük eğilme dayanımı değerini %18 oranında arttırdığı deney sonuçlarından elde edilmiştir.

Üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin içerisinde (32 karışım, elle sıkıştırılarak üretilen vermikülit agregalı karışım hariç) 28 günlük eğilme dayanımı değerleri 2,8-13.8 MPa arasında değişmektedir (Şekil 4.11). En yüksek eğilme dayanımı değeri %10 silis dumanı içeren manyetit agregalı kompozit karışımlarda (G12) 713,8 MPa, en düşük ise vermikülit agrega tipi ile üretilen (G8) karışımlarda 2,8 MPa olarak belirlenmiştir. Numunelerin eğilme dayanımlarında agrega tipi ve silis dumanı içeriğinin etkili olduğu gözlemlenmiştir (Mutlu, 2019; Tokay, 2019).



Şekil 4.10. Numunelerin eğilme dayanımı değerleri



Şekil 4.11. Numunelerin eğilme dayanımı sıralı değerleri

4.2.2. Basınç Dayanımı

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin basınç dayanımı deney sonuçları Şekil 4.12'de verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. 28 günlük basınç dayanımı en yüksek silis (SD) dumanı tipi agrega ile üretilen G7 numunesinde 74,1 MPa ve en düşük vermikülit (V) tipi agrega ile üretilen G8 numunesinde 6,1 MPa olarak elde edilmiştir. Barit (B) agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numuneler farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin basınç dayanım 52,3 MPa, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ki ise 45,5 MPa olduğu tespit edilmiştir. Silis dumanı puzolanik bir malzemedir ve çok ince taneli olduğundan dolayı sulu ortamlarda kalsiyum hidroksit ile birleşince hidrolik malzeme özelliği kazanmaktadır. Vermikülit (V) tipi kullanılarak üretilen G8 kodlu numunenin basınç dayanımının düşük çıkması vermikülitin dayanımının düşük hafif agrega olması ile açıklanabilir (Tokay, 2019).

2.grupta G9-G10-G11-G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde 28 günlük en yüksek basınç dayanımı hematit (H) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G13 kodlu) 79,8 MPa olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük dayanım ise kolemanit (K) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G11 kodlu) 12,3 MPa olarak bulunmuştur.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11-G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, hematit, limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin basınç dayanımlarında sırasıyla %13, %27, %14, %18 artışlar elde edilmiştir. Buna karşılık kolemanit agregalı numunelerde ise %56 azalma gözlemlenmiştir. Tane boyutu çok küçük (<0,1 μm) olan silis dumanı harç içerisindeki kalsiyum hidrat (CH) ile reaksiyona girerek kalsiyum-silikat-hidrate (C-S-H) bağlayıcı jellerini oluşturur ve aynı zamanda harç içerisindeki boşlukları doldurarak basınç dayanımını arttırır. (Özcan, 2005; Erdoğan, 2003; Mutlu, 2020).

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde 28 günlük en yüksek basınç dayanımı barit ve hematit (B ve H) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G18 kodlu) 73,1 MPa olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en

düşük dayanım ise barit ve kolemanit (B ve K) tipi agregalı numunesinde (G16 kodlu) 32,3 MPa olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. 28 günlük basınç dayanımı en yüksek barit ve hematit (B ve H) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G23 numunesinde 69,0 MPa, en düşük barit ve selestit (B ve S) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G20 numunesinde 44,0 MPa olarak elde edilmiştir.

4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, kolemanit manyetit, hematit, limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin basınç dayanımında G20 kodlu numunesinde %18 ve G23 kodlu numunesinde %6 oranında azalma azalmaya sebep olurken, G21 kodlu numunede %42, G22 kodlu numunede %17 ve G24 kodlu numunede ise %1 oranında artışa sebep olmuştur.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. 28 günlük basınç dayanımı en yüksek barit, selestit, kolemanit, manyetit ve hematit (B, S, K, M ve H) tipi agrega ile üretilen G27 numunesinde 39,3 MPa, en düşük barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit ve limonit (B, S, K, M, H ve L) tipi agrega ile üretilen G28 numunesinde 31,8 MPa olarak elde edilmiştir.

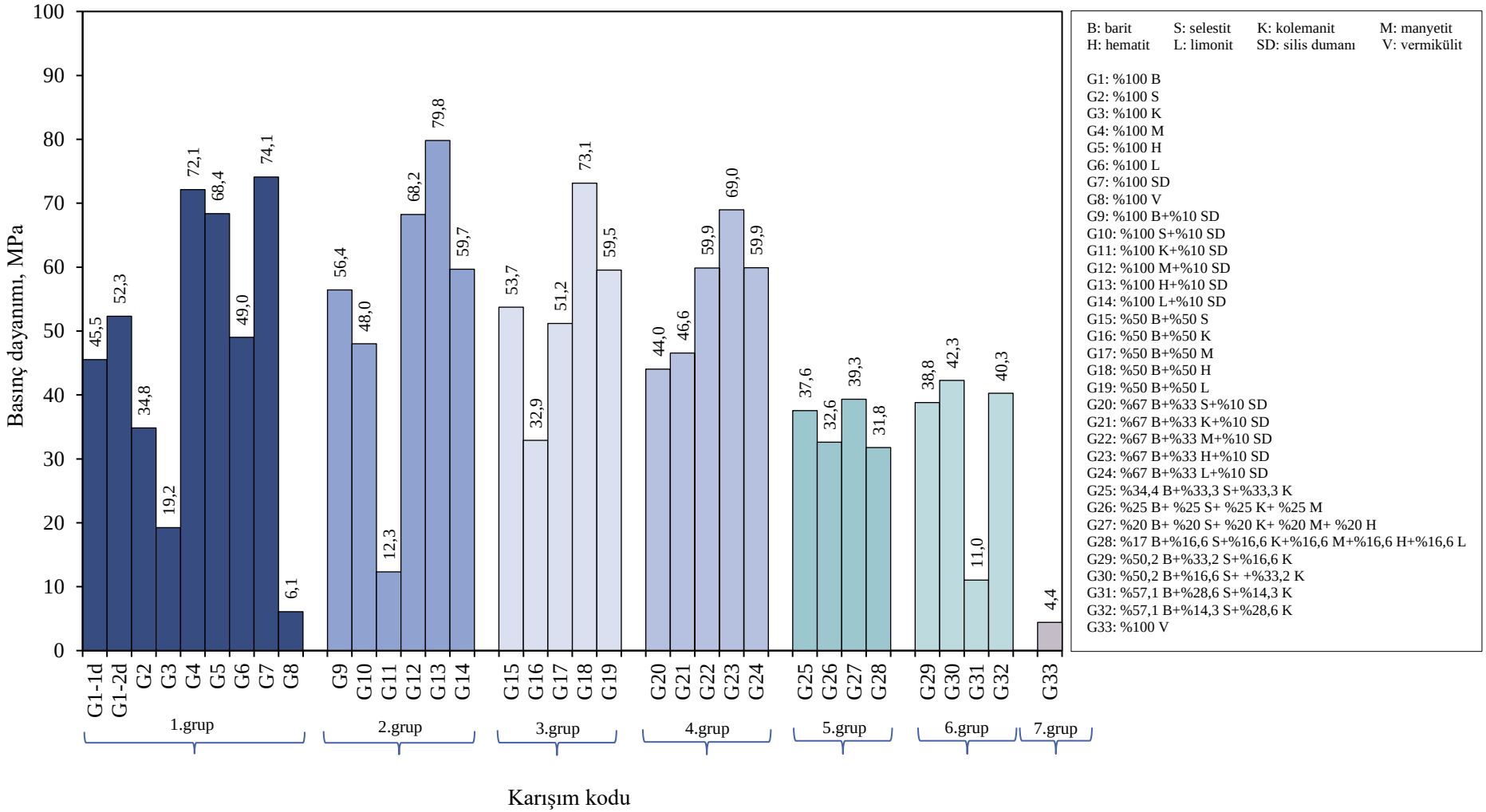
6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde 28 günlük basınç dayanımı en yüksek 42,3 MPa (G30 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük dayanım ise 11,0 MPa (G31 kodlu) olarak bulunmuştur. Barit oranı yüksek olan numunelerin basınç dayanımları da yüksek bulunmuştur (Demir, 2009; Türekçi, 2017).

Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) basınç dayanımı 4,4 MPa olarak elde edilmiştir. Buna karşılık aynı karışıma sahip sıkıştırılarak üretilen numunenin (1.grup G8 kodlu) basınç dayanımı ise 6,1 MPa belirlenmiştir. Basınç altında sıkıştırılarak üretilen vermikülit agregalı numunelerin elle sıkıştırılanlara kıyasla boşluk oranında azalma ve buna bağlı olarak da basınç dayanımında %38 artış gözlemlenmiştir. Mutlu (2020) barit, hematit, limonit, manyetit, vermikülit ve silis dumanı tipi agrega ile kompozit harçlar üreterek numunelerin basınç dayanımlarını tespit etmiştir. Yüksek basınçlarda sıkıştırılarak barit

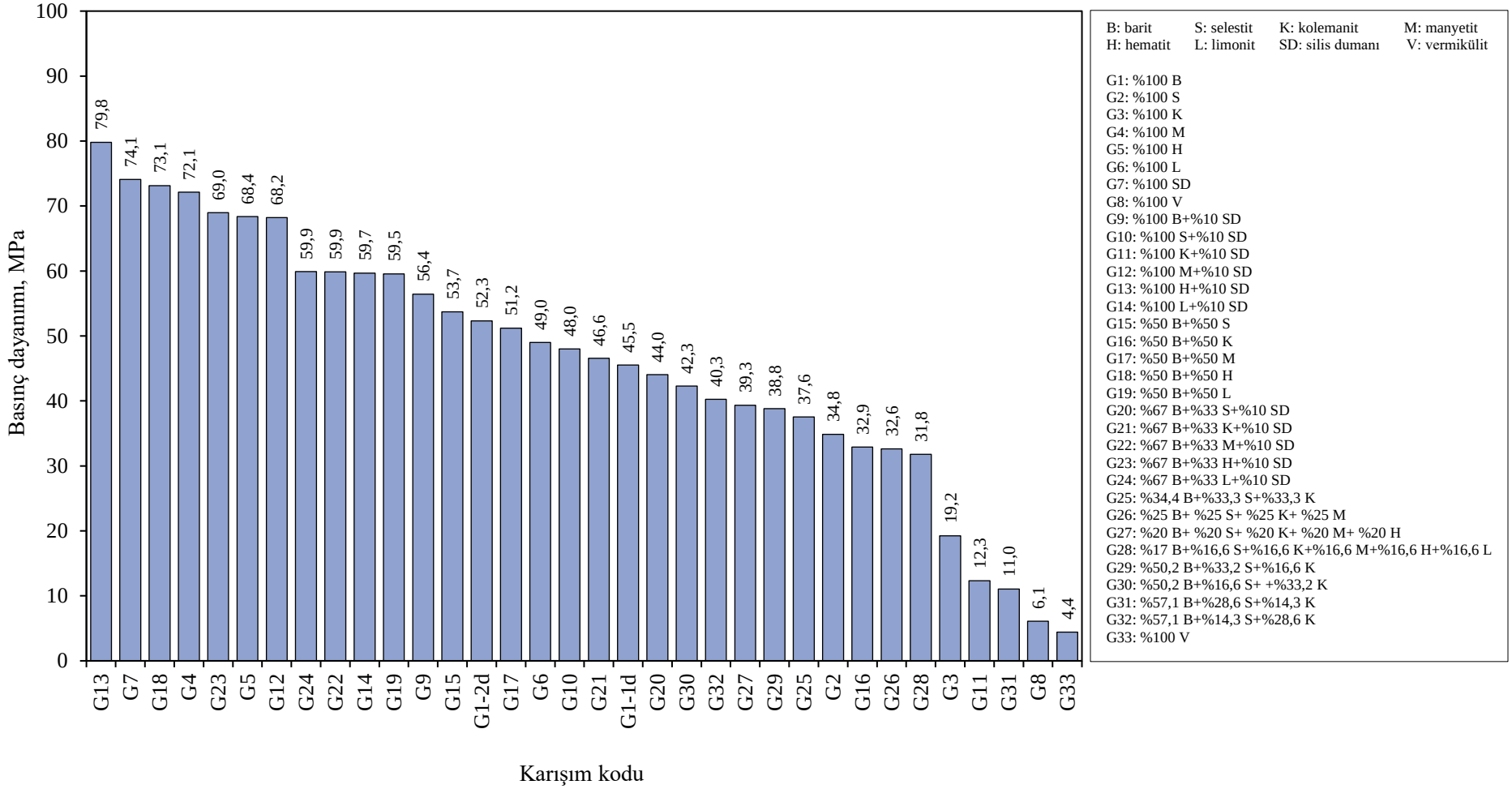
agregası ile üretilen harçların yoğunluk ve basınç dayanımı değerleri, herhangi bir sıkıştırma işlemine yapılmadan üretilen numunelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir (Akyüz, 2013; Özcan, 2005; Mutlu, 2020).

Basınç dayanımı en yüksek 200 bar basınç altında hematit ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen (G13 kodlu) numunelerde 79,8 MPa olmasına rağmen, sıkıştırılmadan hematit agregası ile üretilen harçların basınç dayanımını 24,8 MPa olarak tespit edilmiştir (Mutlu, 2020). Sıkıştırma faktörü basınç dayanımını yaklaşık olarak %69 oranında arttırdığı açık bir şekilde görülmektedir. Karışımlarda müsaade edilebilir sıkıştırma basıncının yüksek olduğu ve boşluk oranının genel olarak düşük olduğu karışımlarda basınç dayanımları daha yüksek elde edilmiştir (Mutlu, 2019; Tokay, 2019). Numunelerin basınç dayanımı yoğunluk ilişkisi Şekil 4.14'te verilmiştir.

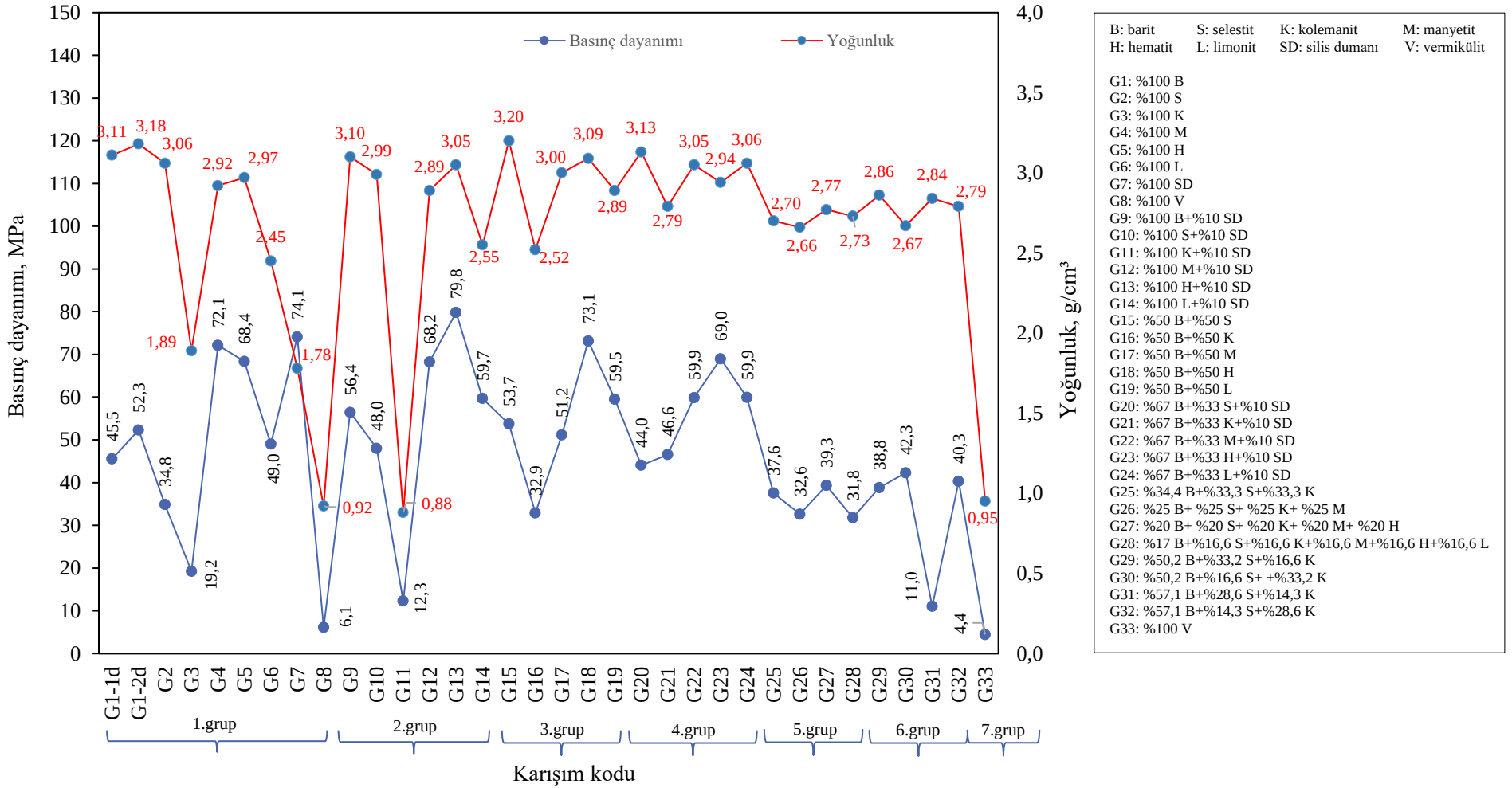
Üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin içerisinde (32 karışım, elle sıkıştırılarak üretilen vermikülit agregalı karışım hariç) 28 günlük basınç dayanımı değerleri 6,1-79.8 MPa arasında değişmektedir. En yüksek basınç dayanımı değeri %10 silis dumanı içeren hematit agregalı kompozit karışımlarda (G13) 79,8 MPa, en düşük ise vermikülit agrega tipi ile üretilen (G33) karışımlarda 6,1 MPa olarak belirlenmiştir. Numunelerin basınç dayanımlarında agrega tipi ve silis dumanı içeriğinin etkili olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.12. Numunelerin basınç dayanımı değerleri



Şekil 4.13. Numunelerin basınç dayanımı sıralı değerleri



Şekil 4.14. Numunelerin basınç dayanımı yoğunluk ilişkisi

4.3. Numunelerin XRD, XRF ve SEM Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

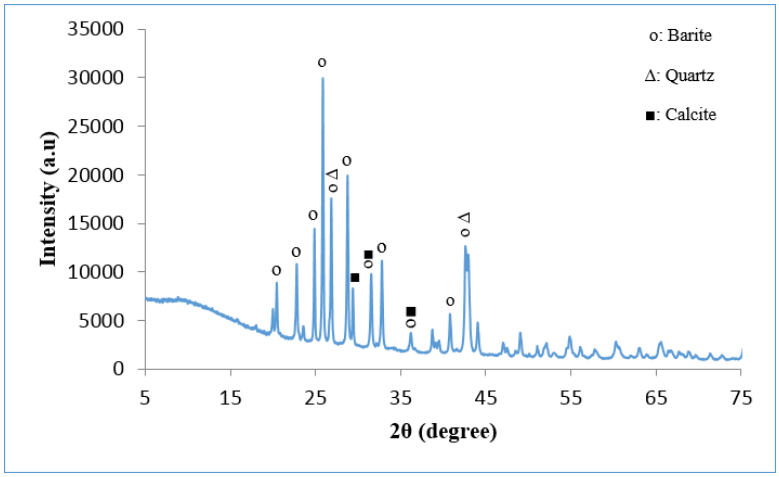
Deneysel çalışmada farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerine XRD (X-Işını difraktometresi), SEM (taramalı elektron mikroskobu) ve XRF (X-ışını floresansı) analizleri uygulanmıştır. Ayrıca üretilen 33 grup kaplama numunelerine ait XRD kristal yapı, SEM görüntüleme ve X-ışını floresansı analiz sonuçları Ek-1'de verilmiştir. Bu bölümde X ve Gama ışını radyasyon zırhlama hesabına göre lineer zayıflatma katsayısı değeri en yüksek olan G9 kodlu numunenin analizleri yapılmıştır.

G9 numunesi 210 bar basınç altında barit ve %10 silis dumanı ilave ile üretilerek 28 gün boyunca suda kür edilmiştir. G9 numunesinin XRD paterninde barit ($BaSO_4$), kuvars (SiO_2) fazlarının yanı sıra kalsit ($CaCO_3$) de tespit edilmiştir (Şekil 4.15). Ek-1'de kimyasal analizi verilen G9 numunesi yaklaşık olarak ağırlıkça %46 BaO, %16 SO_3, %15 CaO ve %9 SiO_2 içermektedir. SEM analizi 5 ve 40 µm görüntüsü Şekil 4.16'da verilmiştir.

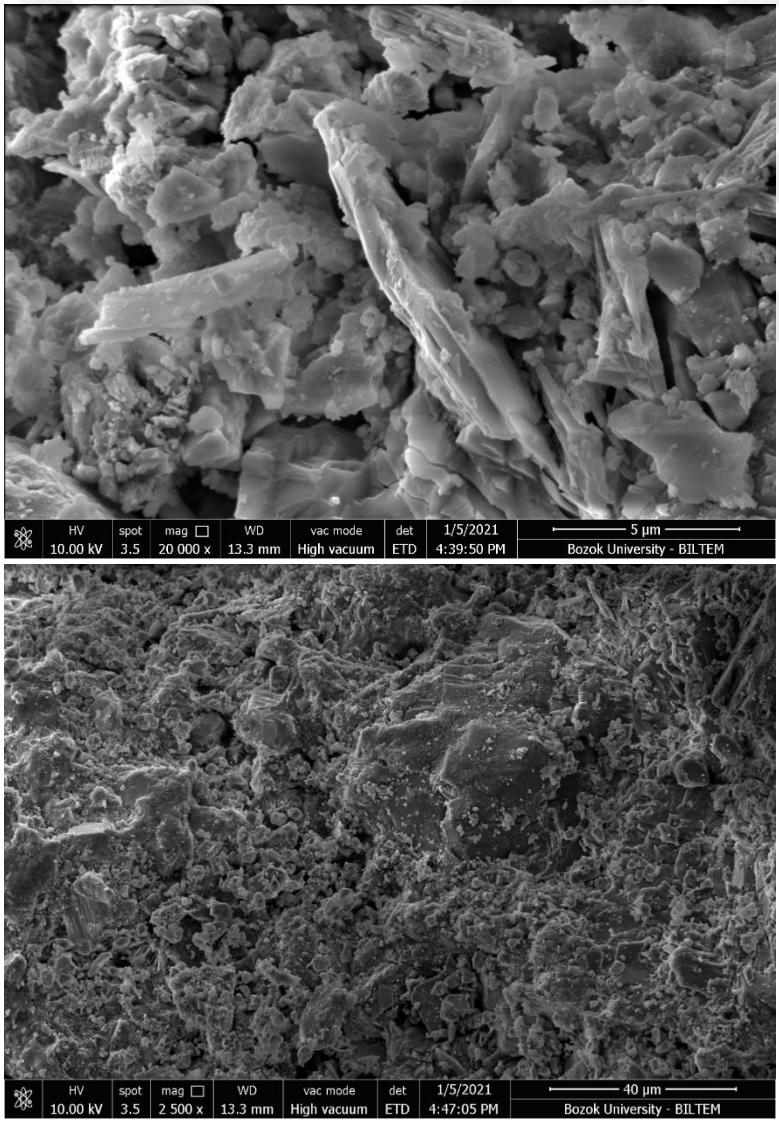
SEM ve XRD analizinde, silis dumanının kullanımı hidratasyon sonucu oluşan CH oranını azalttığı görülmüştür. SEM analizinde ise silis dumanı boşlukları ve oluşan CH yoğunluğunu azaltırken, C-S-H oranını artırdığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi SD ile portlandit (CH) arasında meydana gelen reaksiyondan dolayı oluşan $Ca(OH)_2$ miktarında azalmaya neden olması ve boşlukları doldurması olarak açıklanmaktadır.

Ayrıca tane boyutu çok küçük (<0,1 µm) olan silis dumanı harç içerisindeki kalsiyum hidrat (CH) ile reaksiyona girerek kalsiyum-silikat-hidrate (C-S-H) bağlayıcı jellerini oluşturur ve aynı zamanda harç içerisindeki boşlukları minimuma indirmiştir (Özcan, 2005; Erdoğan, 2003; Mutlu, 2020).

İleri yaşlarda malzemenin boşluk oranına bağlı olarak sülfat saldırılarından dolayı süzülen kalsiyum bileşiği, kalsiyum silika hidrate (C-S-H) jelinin bozulmasına neden olmaktadır. Genellikle sülfat saldırıları sonucunda sülfat iyonları ile kalsiyum hidroksit ve kalsiyum aluminat hidratlar rekasiyona girerek alçıtaşı ve etrenjit oluşumuna neden olmaktadır. Deney numuneleri maksimum sıkıştırma altında ve minimum boşluğa sahip olacak şekilde üretildiklerinden dolayı etrenjit kristal oluşumunun az olduğu söylenebilir.



Şekil 4.15. G9 numunesi XRD analizi



Şekil 4.16. G9 numunesi SEM görüntüsü

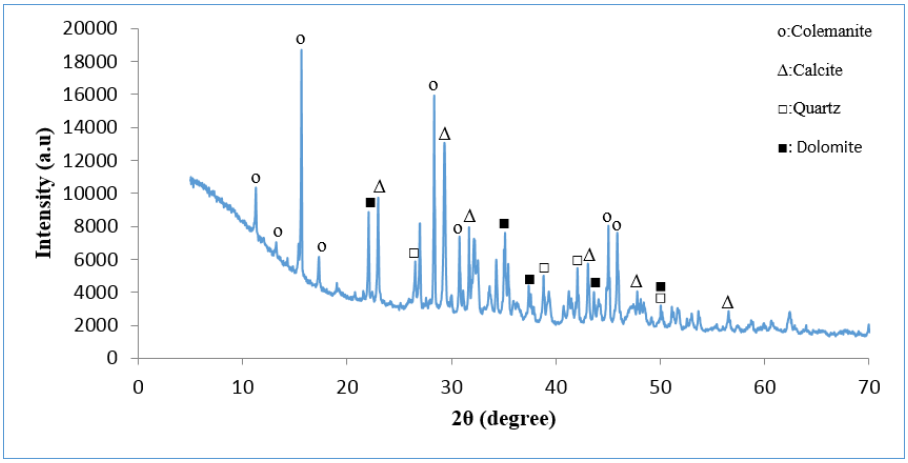
Termal nötron radyasyonu zırhlama hesabına göre lineer zayıflatma katsayı değeri en yüksek bor türevi olan kolemanit agrega ile üretilen G3 kodlu numunesinde 2,4003 cm^{-1} olarak elde edilmiştir.

Nötron parçacıkları bilindiği gibi hafif elementler ile durdurulabilmektedir. Beton bünyesinde bulunan H_2O'daki H atomu hafif element olduğundan dolayı nötron radyasyonu tutulmasında oldukça etkilidir. Bunlardan başka nötronlar yüksek oranda kimyasal bağlı su içeriği, yüksek yoğunluk ve kalınlıkta bor, kadmiyum, hafniyum ilavesi ile üretilen özel kaplama malzemeleri de tutulabilir.

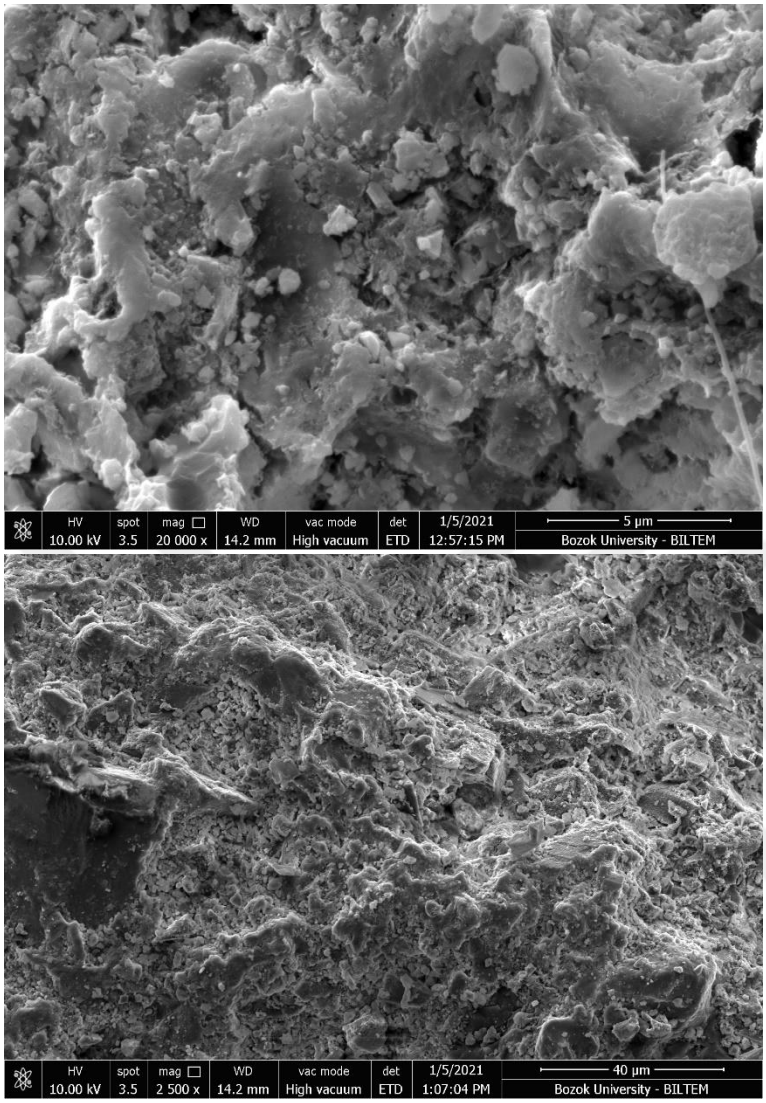
Demir vd. (2011) yaptığı çalışmada kolemanit agregası ile üretilen betonun nötron geçirimliliğini büyük oranda azalttığı sonucuna varmıştır. Ayrıca Demir (2009) kolemanit agregalı betonların nötronlar için daha iyi soğurgan olduklarını tespit etmiştir.

G3 numunesi 100 bar basınç altında kolemanit ile üretilerek 28 gün boyunca suda kür edilmiştir. G3 numunesinin XRD paterninde kolemanit ($2CaO.3B_2O_3.5H_20$), kalsit ($CaCO_3$), kuvars (SiO_2) ve dolomit ($CaMg(CO_3)_2$) tespit edilmiştir (Şekil 4.14). Ek-1'de kimyasal analizi verilen G3 numunesi yaklaşık olarak ağırlıkça %53 CaO, %11 SiO_2 ve %4 MgO içermektedir (Şekil 4.17).

G3 numunesinin 5 ve 40 µm çekilen SEM görüntülerini genel olarak değerlendirdiğimizde kolamenitin yüzey yapısında fark edilir bir değişim görülmemiştir. SEM görüntüsü Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.17. G3 numunesi XRD analizi



Şekil 4.18. G3 numunesi SEM görüntüsü

4.4. Radyasyon Geçirgenlik Özellikleri

4.4.1. X-Işını Tutuculuk

Çalışmada üretilen çimento esaslı kaplama numunelerinin lineer ve kütle zayıflatma katsayısının deneysel olarak belirlenmesi amacıyla İTÜ Enerji Enstitüsü'nde hazırlanan deney düzeneğinde, X ışını cihazının (ICM SiteX) 150 kiloVolt çalışma gerilimde ve 1 miliAmper hedef akımında yaydığı 150 keV enerjili X ışınları ve Geiger Müller (GM) tipi gazlı dedektörü bulunan doz ölçer ile deneysel ölçümler yapılmıştır. Lineer ve kütle zayıflatma katsayıları Bölüm 3.2.1'de açıklandığı gibi Denklem 3.13 ve 3.14 yardımıyla hesaplanmış ve her bir kaplama numunesinin yarı kalınlık (HVL), dozu %1'e indirmek için 2TVL kalınlık ve 1 mm kurşun eşdeğeri deney sonuçları Çizelge 4.4'te verilmiştir. Ayrıca 150 keV X-ışını için yapılan sayımların Denklem 3.13 yardımıyla I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi ve R^2 (regresyon sabiti katsayısı) oranının fonksiyonel grafikleri çizilmiş, sonuçlar Ek-6'da verilmiştir.

Üretilen çimento esaslı kaplama numunelerinin teorik lineer ve kütle zayıflatma katsayıları literatürde yaygın olarak kullanılan XCOM programı kullanılarak elde edilmiştir. XCOM programına harç karışımlarının Ek-5'te verilen oksit cinsinden element bileşenleri ve bunların ağırlıkça yüzdeleri girilerek kütle zayıflatma katsayıları (cm^2/g) belirlenmiş, elde edilen değerler numunelerin birim hacim ağırlığı ile çarpılarak teorik lineer zayıflatma katsayıları (cm^{-1}) hesaplanmıştır. Deney ve teorik olarak elde edilen kütle ve lineer zayıflatma katsayıları karşılaştırılmalı olarak Çizelge 4.4'te verilmiştir.

Çizelge 4.4. 150 keV X-ışını için deneysel ve teorik zayıflatma katsayıları ile kurşun eşdeğerleri

Karışım grubu	Karışım kodu	BHA	μ-katsayısı (Deneysel)	μ-katsayısı (Deneysel)	Yarı kalınlık değeri (HVL)	Dozu %1 e indirmek için gerekli kalınlık (2TVL)	1 mm kurşun eş değeri	μ-katsayısı (XCOM)	μ-katsayısı (XCOM)	Fark (Deneysel-Teorik)
		(g/cm^3)	(cm^{-1})	(cm^2/g)	(cm)	(cm)	(mmPb)	(cm^{-1})	(cm^2/g)	(%)
1. grup	G1-1d	3,11	1,4661	0,4714	0,47	3,14	14,81	1,3864	0,4458	5,43
	G1-2d	3,18	1,3487	0,4241	0,51	3,41	16,10	1,4176	0,4458	5,11
	G2	3,06	1,0946	0,3577	0,63	4,21	19,84	0,6692	0,2187	38,86
	G3	1,89	0,2444	0,1293	2,83	18,84	88,85	0,2958	0,1565	21,02
	G4	2,92	0,4963	0,1700	1,39	9,28	43,76	0,4704	0,1611	5,22
	G5	2,97	0,5196	0,1749	1,33	8,86	41,79	0,4880	0,1643	6,09
	G6	2,45	0,4335	0,1769	1,59	10,62	50,09	0,4033	0,1646	6,97
	G7	1,78	0,2199	0,1235	3,14	20,94	98,75	0,2515	0,1413	14,38
	G8	0,92	0,1741	0,1892	3,97	26,45	124,73	0,1369	0,1488	21,37
2. grup	G9	3,10	1,5473	0,4991	0,45	2,98	14,03	1,3485	0,4350	12,85
	G10	2,99	0,8475	0,2834	0,82	5,43	25,62	0,6354	0,2125	25,03
	G11	0,88	0,2062	0,2343	3,35	22,34	105,31	0,1375	0,1563	33,28
	G12	2,91	0,4704	0,1719	1,47	9,80	46,19	0,4671	0,1605	1,44
	G13	3,05	0,5477	0,1796	1,26	8,41	39,65	0,5002	0,1640	8,67
	G14	2,55	0,4384	0,1719	1,58	10,50	49,53	0,4174	0,1637	4,78

Çizelge 4.4. (devam) 150 keV X-ışını için deneysel ve teorik zayıflatma katsayıları ile kurşun eşdeğerleri

Karışım grubu	Karışım kodu	BHA	μ-katsayısı (Deneysel)	μ-katsayısı (Deneysel)	Yarı kalınlık değeri (HVL)	Dozu %1 e indirmek için gerekli kalınlık (2TVL)	1 mm kurşun eş değeri	μ-katsayısı (XCOM)	μ-katsayısı (XCOM)	Fark (Deneysel-Teorik)
		(g/cm^3)	(cm^{-1})	(cm^2/g)	(cm)	(cm)	(mmPb)	(cm^{-1})	(cm^2/g)	(%)
3. grup	G15	3,23	1,3461	0,4164	0,52	3,46	16,30	1,0911	0,3378	18,21
	G16	2,52	1,2691	0,5036	0,54	3,63	17,11	0,8883	0,3525	30,01
	G17	3,00	1,1431	0,3810	0,60	4,03	19,00	0,9372	0,3124	18,01
	G18	3,06	1,1082	0,3625	0,63	4,17	19,67	0,9213	0,3014	16,80
	G19	2,89	1,1907	0,4120	0,58	3,87	18,24	0,9471	0,3277	20,46
4. grup	G20	3,13	1,4066	0,4494	0,49	3,27	15,44	1,1374	0,3634	19,14
	G21	2,79	1,3080	0,4688	0,53	3,52	16,60	1,0529	0,3774	19,50
	G22	3,05	1,3124	0,4303	0,53	3,51	16,55	1,0635	0,3487	18,96
	G23	2,94	1,2682	0,4314	0,54	3,63	17,12	0,9776	0,3325	22,92
	G24	3,06	1,3265	0,4335	0,52	3,47	16,37	1,1053	0,3612	16,68
5. grup	G25	2,70	1,1458	0,4244	0,60	4,02	18,95	0,8205	0,3039	28,39
	G26	2,66	0,5363	0,2016	1,29	8,59	40,49	0,7033	0,2644	31,14
	G27	2,77	0,8244	0,2976	0,84	5,59	26,34	0,6703	0,2420	18,69
	G28	2,73	0,7410	0,2714	0,93	6,21	29,31	0,6287	0,2303	15,15
6. grup	G29	2,86	1,2017	0,4202	0,57	3,83	18,07	1,2152	0,4249	1,12
	G30	2,67	1,0901	0,4083	0,63	4,22	19,92	0,9228	0,3456	15,35
	G31	2,84	1,1452	0,4032	0,60	4,02	18,96	1,0091	0,3553	11,89
	G32	2,79	1,3034	0,4672	0,53	3,53	16,66	1,0083	0,3614	22,64
7. grup	G33	0,95	0,1438	0,1514	4,80	32,02	151,01	0,1414	0,1488	1,70

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin 150 keV X-ışını teorik kütle zayıflatma katsayısı değerleri Şekil 4.19'da verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. Teorik kütle zayıflatma katsayı en yüksek barit (B) tipi agrega ile üretilen G1 numunesinde 0,4458 cm^2/g ve en düşük silis dumanı (SD) tipi agrega ile üretilen G7 numunesinde 0,1413 cm^2/g olarak elde edilmiştir.

2.grupta G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek kütle zayıflatma katsayı barit (B) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G9 kodlu) numunesinde 0,4350 cm^2/g olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük kütle zayıflatma katsayı ise kolemanit (K) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G11 kodlu) 0,1563 cm^2/g olarak bulunmuştur (Mutlu, 2020; Demir 2009; Biber Temircik, 2015).

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11-G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit, limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin kütle zayıflatma katsayı değerinde %0,5-2 arasında azalmalar gözlemlenmiştir. SD ilavesinin kütle azaltma katsayısı değerini küçük bir oran olsa da azalttığı ve radyason geçirgenliği üzerine etkin olarak belirleyici bir malzeme olmadığı tespit edilmiştir (Biber Temircik, 2015).

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde kütle zayıflatma katsayı en yüksek barit ve kolemanit (B ve K) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G16 kodlu) 0,3525 cm^2/g, en düşük barit ve hematit (B ve H) tipi agrega ile üretilen G18 numunesinde 0,3014 cm^2/g olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. Kütle zayıflatma katsayı en yüksek barit ve kolemanit (B ve K) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G21 numunesinde 0,3774 cm^2/g, en düşük barit ve hematit (B ve H) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G23 numunesinde 0,3325 cm^2/g olarak elde edilmiştir.

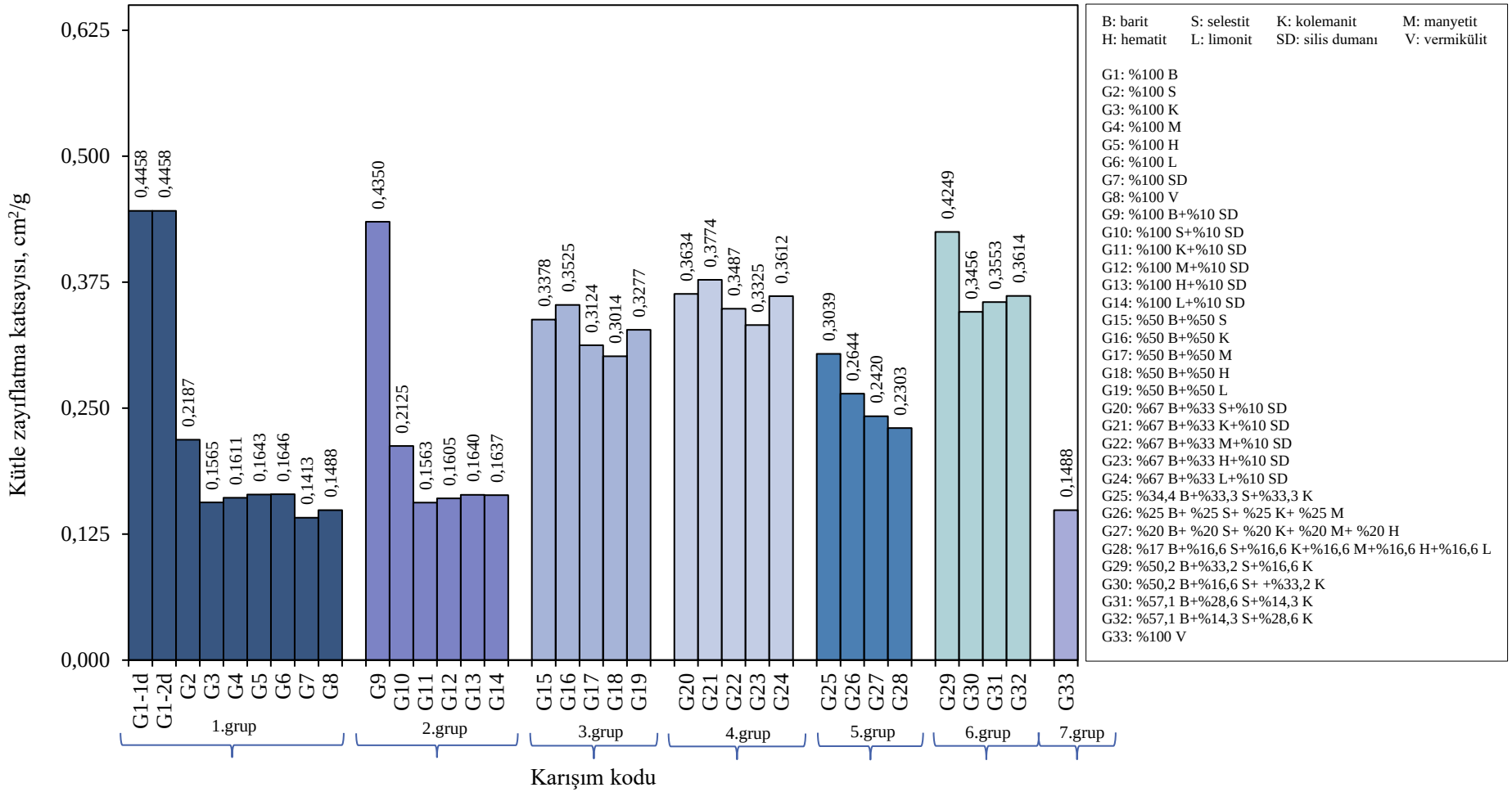
4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, kolemanit manyetit, hematit, limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin kütle zayıflatma katsayı sırasıyla %8, %7, %12, %10 ve %10 oranında artışa sebep olmuştur (Biber Temircik, 2015).

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. Kütle zayıflatma katsayı en yüksek barit, selestit ve kolemanit (B, S ve K) tipi agrega ile üretilen G25 numunesinde 0,3039 cm^2/g, en düşük barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit ve limonit (B, S, K, M, H ve L) tipi agrega ile üretilen G28 numunesinde 0,2303 cm^2/g olarak elde edilmiştir. Numune üretiminde kullanılan barit oranının azalmasıyla beraber kütle zayıflatma katsayısının da azaldığı sonucuna ulaşılmıştır (Mutlu, 2020; Demir 2009; Biber Temircik 2015, Oto 2012).

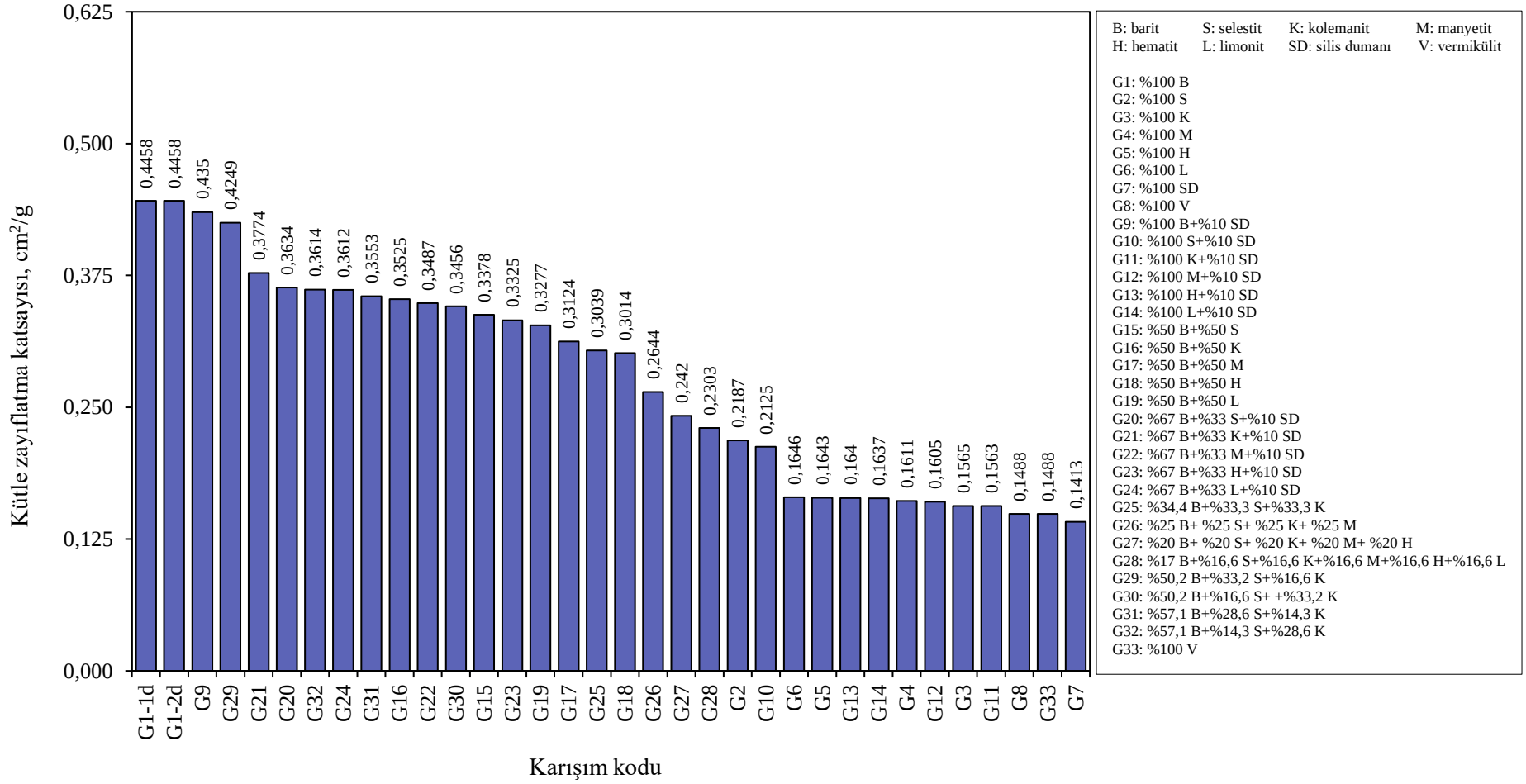
6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde kütle zayıflatma katsayı en yüksek 0,4249 cm^2/g (G29 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük katsayı ise 0,3456 cm^2/g (G30 kodlu) olarak bulunmuştur. Barit oranı yüksek olan numunelerin kütle zayıflatma katsayısı da yüksek bulunmuştur (Demir, 2009; Tüfekçi, 2017).

Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) kütle zayıflatma katsayısı 0,1488 cm^2/g olarak elde edilmiştir.

Numunelerin kütle zayıflatma katsayısı sıralı değerleri Şekil 4.20'de verilmiştir. Kütle zayıflatma katsayısı en yüksek 200 bar basınç altında barit agregası ile üretilen (G1 kodlu) numunelerde 0,4458 cm^2/g olmasına rağmen, en düşük 40 bar basınç altında silis dumanı ile üretilen numunelerde (G7 kodlu) 0,1413 cm^2/g olduğu görülmektedir.



Şekil 4.19. Numunelerin 150 keV X-ışını teorik kütle zayıflatma katsayısı değerleri



Şekil 4.20. Numunelerin 150 keV X-ışını teorik kütle zayıflatma katsayısı sıralı değerleri

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin 150 keV X-ışını teorik lineer zayıflatma katsayısı değerleri Şekil 4.21'de verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. Teorik lineer zayıflatma katsayı en yüksek barit (B) tipi agrega ile üretilen G1-2d numunesinde 1,4176 cm^{-1} ve en düşük vermikülit (V) tipi agrega ile üretilen G8 numunesinde 0,1369 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. Barit (B) agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numuneler farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin lineer zayıflatma katsayı 1,4176 cm^{-1}, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ki ise 1,3864 cm^{-1} olduğu tespit edilmiştir. Müsaade edilebilir sıkıştırma basıncının yüksek olduğu karışımlarda boşluk oranının düşmesiyle birim hacim ağırlık değerleri daha yüksek elde edilmiştir. Buna bağlı olarak lineer zayıflatma katsayısının arttığı açık bir şekilde görülmektedir (Mutlu, 2020; Demir 2009).

2.grupta G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek lineer zayıflatma katsayı barit (B) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G9 kodlu) numunesinde 1,3485 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük lineer zayıflatma katsayı ise kolemanit (K) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G11 kodlu) 0,1375 cm^{-1} olarak bulunmuştur.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11-G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, kolemanit ve manyetit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin lineer zayıflatma katsayı değerinde sırasıyla %4, %5, %54 ve %1 arasında azalmalar elde edilmiştir. Buna karşılık hematit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerde ise %3 artışlar tespit edilmiştir.

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde lineer zayıflatma katsayı en yüksek barit ve selestit (B ve S) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G15 kodlu) 1,0911 cm^{-1}, en düşük barit ve kolemanit (B ve K) tipi agrega ile üretilen numunelerde (G16 kodlu) 0,8883 cm^{-1} olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. Lineer zayıflatma katsayı en yüksek barit ve selestit (B ve S) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G20 numunesinde 1,1374 cm^{-1}, en düşük barit ve hematit (B ve H) tipi

agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G23 numunesinde 0,9776 cm^{-1} olarak elde edilmiştir.

4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, kolemanit manyetit, hematit, limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin lineer zayıflatma katsayı sırasıyla %4, %19, %13, %6 ve %17 oranında artışa sebep olmuştur.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. Lineer zayıflatma katsayı en yüksek barit, selestit ve kolemanit (B, S ve K) tipi agrega ile üretilen G25 numunesinde 0,8205 cm^{-1}, en düşük barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit ve limonit (B, S, K, M, H ve L) tipi agrega ile üretilen G28 numunesinde 0,6287 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. Numune üretiminde kullanılan barit oranının azalmasıyla beraber lineer zayıflatma katsayısının da azaldığı sonucuna ulaşılmıştır (Mutlu, 2020; Demir 2009; Biber Temircik 2015, Oto 2012).

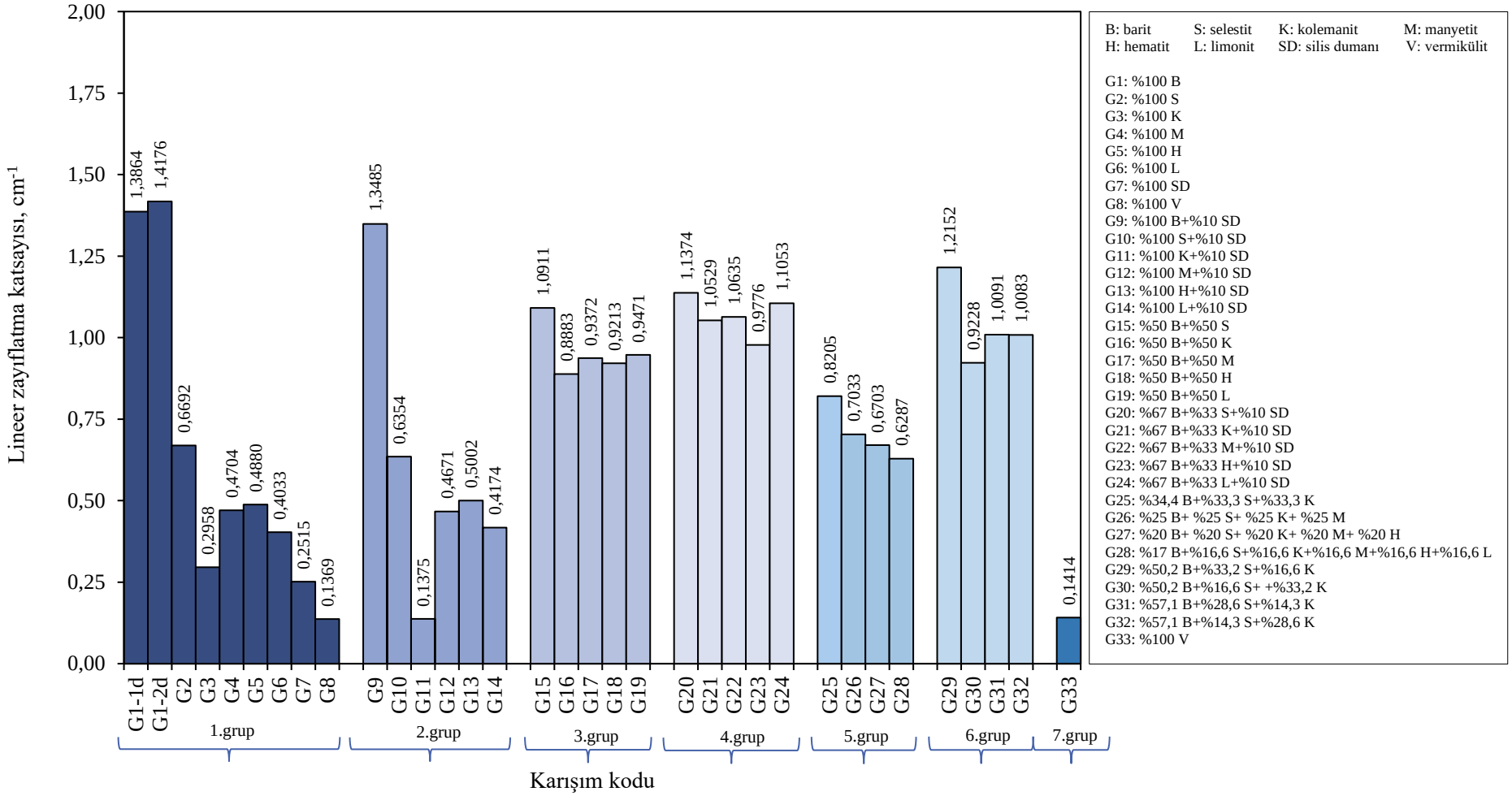
6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde lineer zayıflatma katsayı en yüksek 1,2152 cm^{-1} (G29 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük katsayı ise 0,9228 cm^{-1} (G30 kodlu) olarak bulunmuştur. Barit oranı yüksek olan numunelerin lineer zayıflatma katsayısı da yüksek bulunmuştur (Demir, 2009; Tüfekçi, 2017).

Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) lineer zayıflatma katsayısı 0,1414 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. Buna karşılık aynı karışıma sahip sıkıştırılarak üretilen numunenin (1.grup G8 kodlu) lineer zayıflatma katsayısı ise 0,1369 cm^{-1} belirlenmiştir. Basınç altında sıkıştırılarak üretilen vermikülit agregalı numunelerin elle sıkıştırılanlara kıyasla birim hacim ağırlığında artış ve buna bağlı olarak da lineer zayıflatma katsayısında %3 artış gözlemlenmiştir. Mutlu (2020) barit, hematit, limonit, manyetit, vermikülit ve silis dumanı tipi agrega ile kompozit harçlar üreterek numunelerin lineer zayıflatma katsayısını tespit etmiştir. Yüksek basınçlarda sıkıştırılarak barit agregası ile üretilen harçların yoğunluk ve lineer zayıflatma katsayısı, herhangi bir sıkıştırma işlemi yapılmadan üretilen numunelere göre daha yüksek olduğu görülmektedir (Akyüz, 2013; Özcan, 2005; Mutlu, 2020).

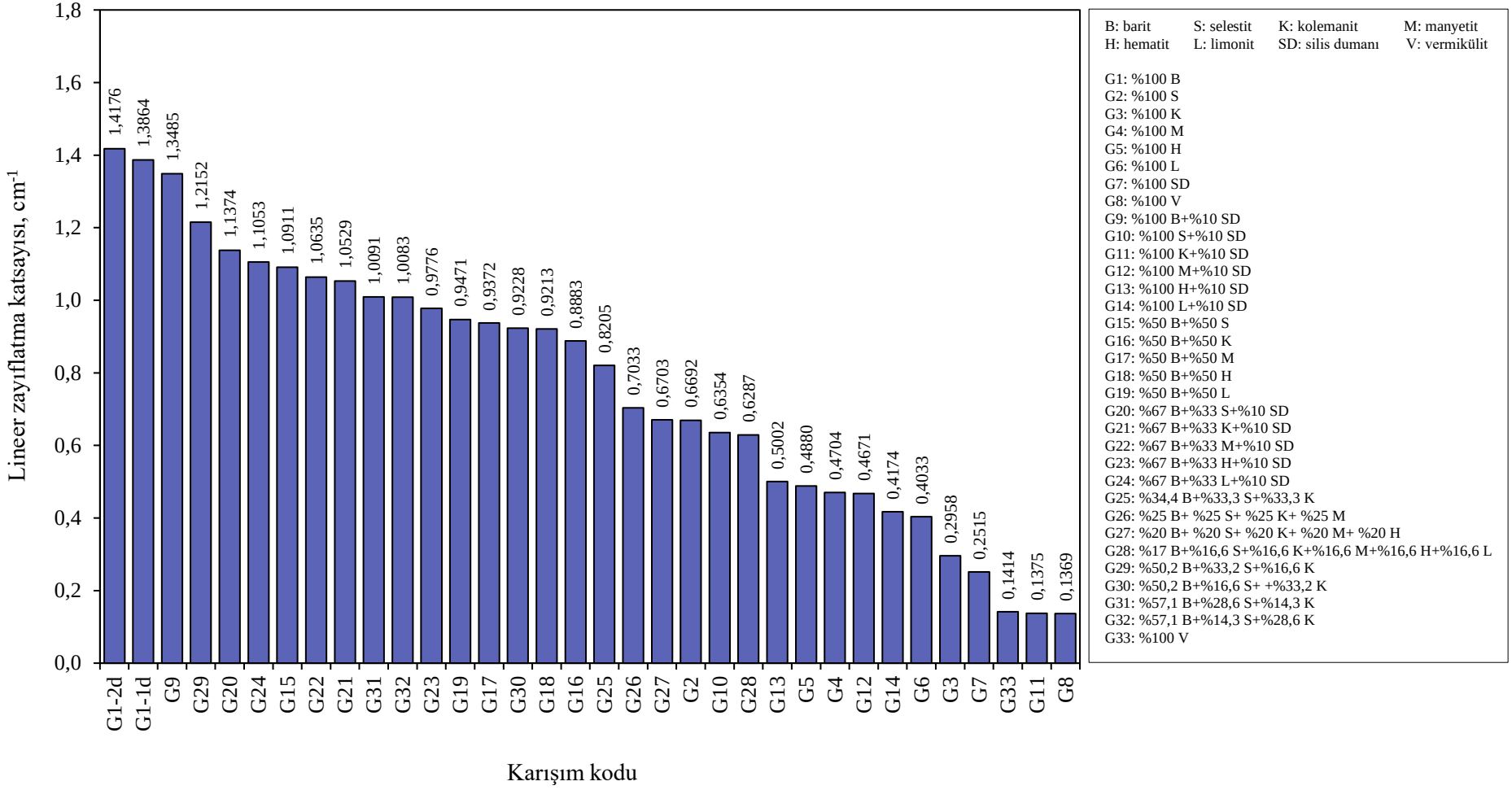
Numunelerin lineer zayıflatma katsayısı sıralı değerleri Şekil 4.22'de verilmiştir. Lineer zayıflatma katsayı en yüksek 200 bar basınç altında barit ile üretilen (G1 kodlu)

numunelerde 1,4176 cm^{-1} olmasına rağmen, sıkıştırılmadan barit agregası ile üretilen harçlarda 1,3308 cm^{-1} olarak tespit edilmiştir (Mutlu, 2020). Sıkıştırma faktörü basınç dayanımını yaklaşık olarak %7 oranında arttırdığı açık bir şekilde görülmektedir. Karışımlarda müsaade edilebilir sıkıştırma basıncının yüksek olduğu ve boşluk oranının genel olarak düşük olduğu karışımlarda birim hacim ağırlık değeri daha yüksek elde edilmiştir. Buna bağlı olarak da lineer zayıflatma katsayısının daha yüksek değerler aldığı görülmektedir. (Mutlu, 2019; Tokay, 2019).

Lineer zayıflatma katsayısı agrega tipi ve yoğunluk değişiminden oldukça etkilenmektedir. 150 keV enerji değerinde barit agregalı G1 kodlu numunelerin lineer zayıflatma katsayısının en yüksek değere ulaşmış olmasının nedeni zıhlama malzemesinin atom numarası ve fotonların madde ile etkileşimlerin meydana gelmesidir. Bu nedenle atom numarası yüksek olan malzemeler (barit, Z=56) daha etkin zırhlama performasına sahiptir.



Şekil 4.21. Numunelerin 150 keV X-ışını teorik lineer zayıflatma katsayısı değerleri



Şekil 4.22. Numunelerin 150 keV X-ışını teorik lineer zayıflatma katsayısı sıralı değerleri

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin 150 keV X-ışını deneysel kütle zayıflatma katsayısı değerleri Şekil 4.23'te verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. Deneysel kütle zayıflatma katsayı en yüksek barit (B) tipi agrega ile üretilen numunesinde (G1-1d kodlu) 0,4714 cm^2/g ve en düşük silis dumanı (SD) tipi agrega ile üretilen G7 numunesinde 0,1235 cm^2/g olarak elde edilmiştir. Barit (B) agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numuneler farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin kütle zayıflatma katsayı 0,4241 cm^2/g, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ki ise 0,4714 cm^2/g olduğu tespit edilmiştir.

2.grupta G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek kütle zayıflatma katsayı barit (B) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G9 kodlu) numunesinde 0,4991 cm^2/g olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük kütle zayıflatma katsayı ise manyetit ve limonit (M ve L) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G12 ve G14 kodlu) 0,1719 cm^2/g olarak bulunmuştur (Mutlu, 2020; Demir 2009; Biber Temircik, 2015).

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11-G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Selestit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin kütle zayıflatma katsayı değerinde sırasıyla %21 ve %3 azalmalar gözlemlenmiştir. Buna karşılık barit, kolemanit, manyetit ve hematit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin kütle zayıflatma katsayı değerinde sırasıyla%11, %81, %1 ve %3 artışlar meydana gelmiştir.

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde kütle zayıflatma katsayı en yüksek barit ve kolemanit (B ve K) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G16 kodlu) 0,5036 cm^2/g, en düşük barit ve hematit (B ve H) tipi agrega ile üretilen G18 numunesinde 0,3625 cm^2/g olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. Kütle zayıflatma katsayı en yüksek barit ve kolemanit (B ve K) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G21 numunesinde 0,4688 cm^2/g, en düşük barit ve manyetit (B ve M) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G22 numunesinde 0,4303 cm^2/g olarak elde edilmiştir.

4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, manyetit, hematit, limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin kütle zayıflatma katsayı sırasıyla %8, %13, %19 ve %5 oranında artışa sebep olmuştur (Biber Temircik, 2015). Barit, kolemanit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G16 kodlu numunesinde ise kütle zayıflatma katsayısının %7 azaldığı görülmektedir.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. Kütle zayıflatma katsayı en yüksek barit, selestit ve kolemanit (B, S ve K) tipi agrega ile üretilen G25 numunesinde 0,4244 cm^2/g, en düşük barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit ve limonit (B, S, K ve M) tipi agrega ile üretilen G26 numunesinde 0,2016 cm^2/g olarak elde edilmiştir. Numune üretiminde kullanılan barit oranının azalmasıyla beraber kütle zayıflatma katsayısının da azaldığı sonucuna ulaşılmıştır (Mutlu, 2020; Demir 2009; Biber Temircik 2015, Oto 2012).

6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde kütle zayıflatma katsayı en yüksek 0,4672 cm^2/g (G32 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük katsayı ise 0,4032 cm^2/g (G31 kodlu) olarak bulunmuştur. Barit oranı yüksek olan numunelerin kütle zayıflatma katsayısı da yüksek bulunmuştur (Demir, 2009; Tüfekçi, 2017).

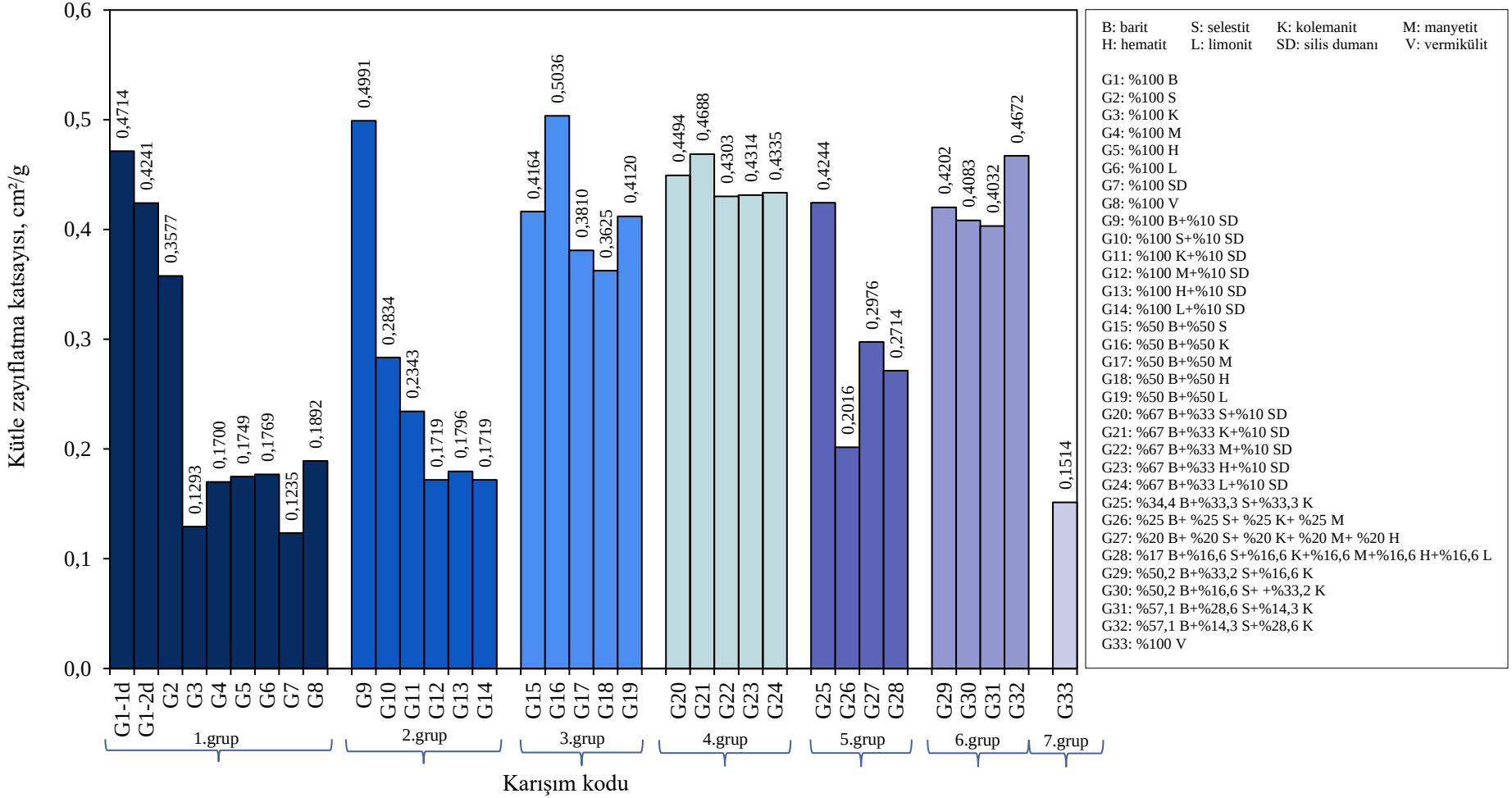
Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) kütle zayıflatma katsayısı 0,1514 cm^2/g olarak elde edilmiştir.

Numunelerin kütle zayıflatma katsayısı sıralı değerleri Şekil 4.24'de verilmiştir. Kütle zayıflatma katsayısı en yüksek 200 bar basınç altında barit ve

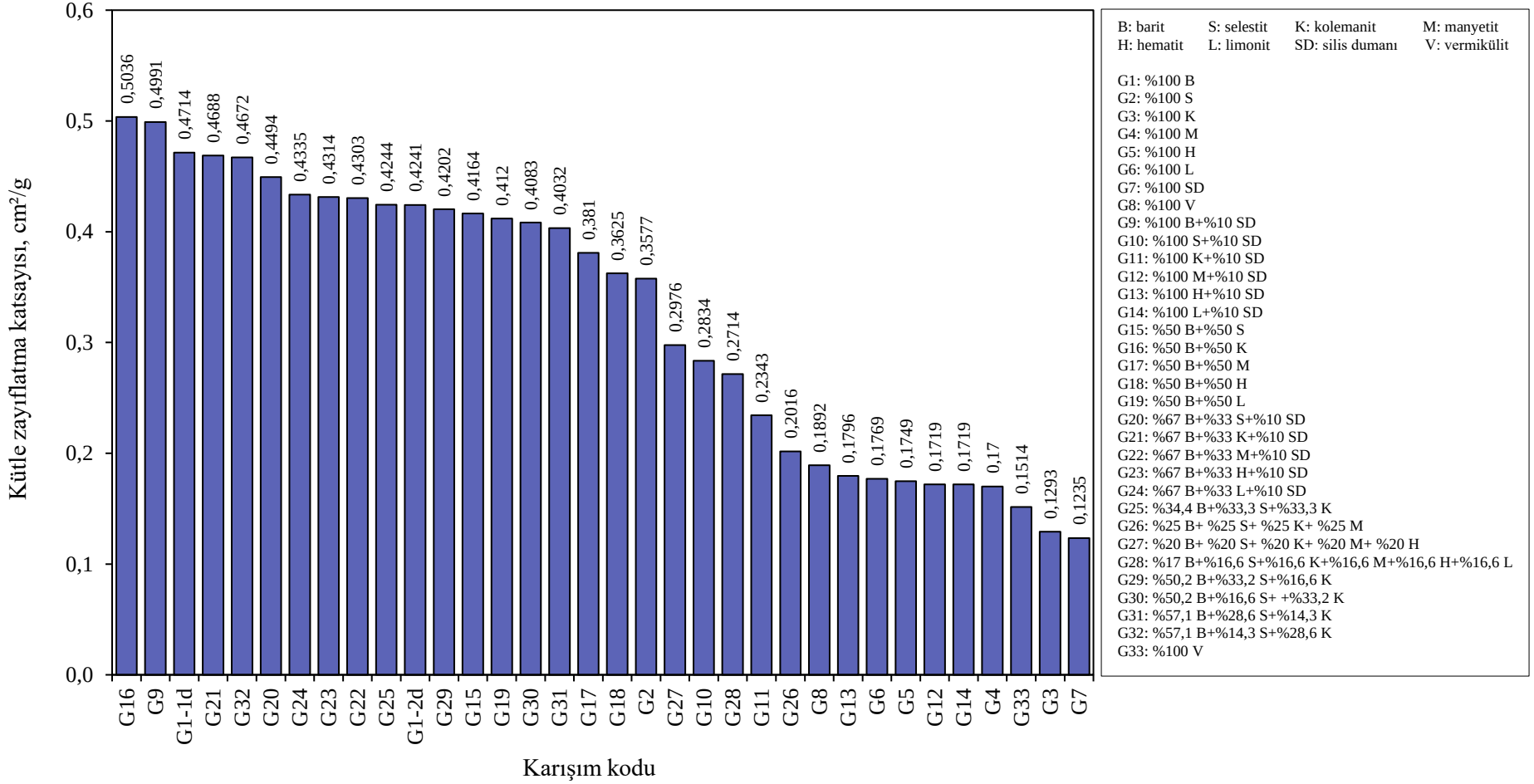
kolemanit agregası ile üretilen (G16 kodlu) numunelerde 0,5036 cm^2/g olmasına rağmen, en düşük 40 bar basınç altında silis dumanı ile üretilen numunelerde (G7 kodlu) 0,1235 cm^2/g olduğu görülmektedir.

Literatürde kütle zayıflatma katsayısı, aynı yoğunluğa sahip malzemelerin soğurma özelliklerinin karşılaştırılması amacıyla kullanılmaktadır. Kütle zayıflatma katsayısı, malzemenin elemental kompozisyonuna ve yoğunluğuna bağlı olarak değişmektedir (El-Sayed Abdo, 2002).

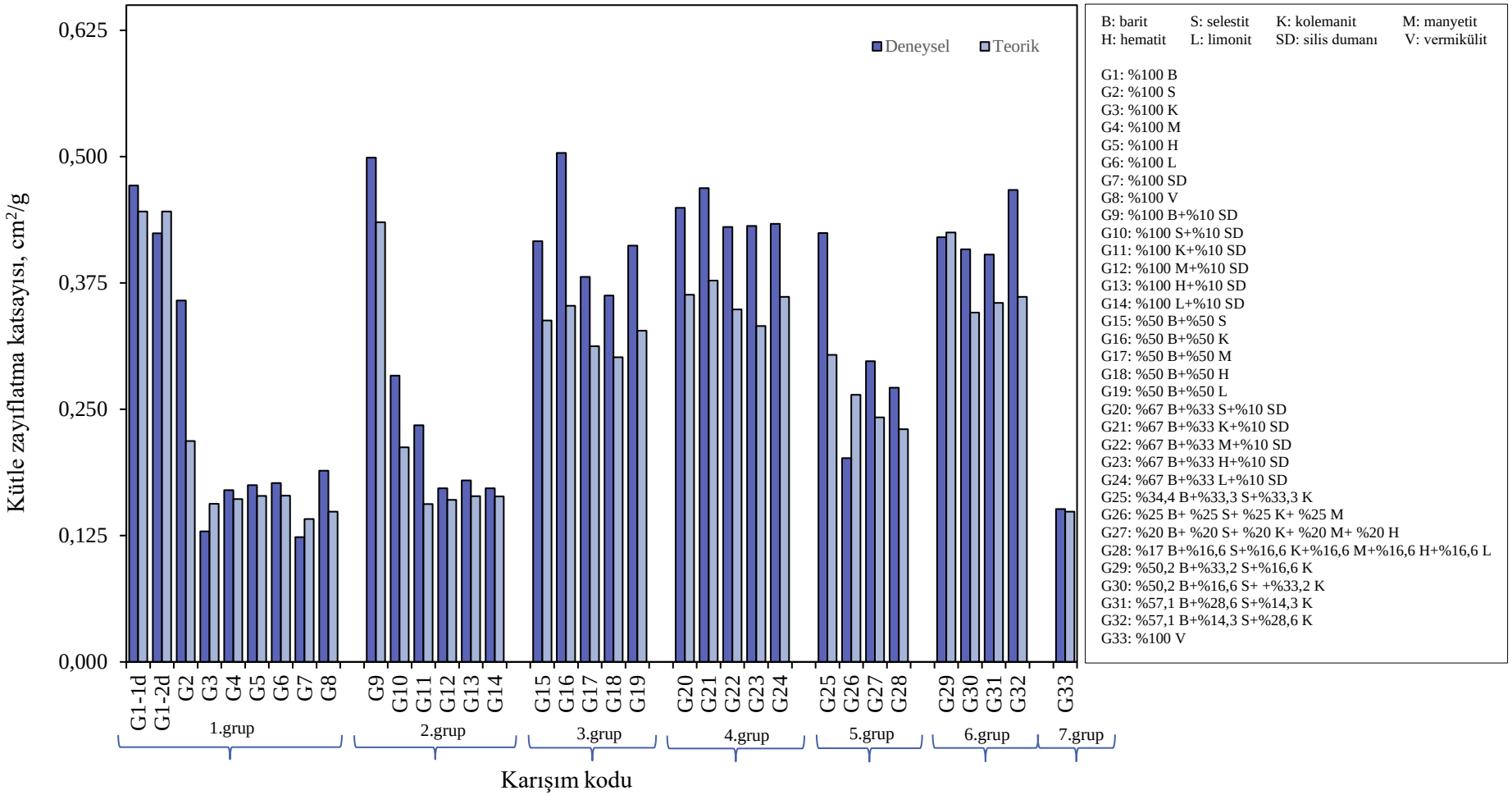
150 keV X-ışını deneysel ve XCOM programı ile teorik olarak elde edilen kütle zayıflatma katsayı arasındaki fark Çizelge 4.25'te verilmiştir. Deneysel ve teorik kütle zayıflatma katsayıları literatürde diğer çalışmalarla yakın sonuçlar elde edilmiştir. Genel olarak deneysel kütle zayıflatma katsayısı 150 keV enerji değerinde teorik olarak hesaplanan değerden fazla bulunmuştur. Literatürde yapılan benzer çalışmalarda olduğu gibi kütle zayıflatma katsayısı arasındaki bağıl farkın deney düzeneği, ölçüm hataları gibi değişkenlere bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir.



Şekil 4.23. Numunelerin 150 keV X-ışını deneysel kütle zayıflatma katsayısı değerleri



Şekil 4.24. Numunelerin 150 keV X-ışını deneysel kütle zayıflatma katsayısı sıralı değerleri



Şekil 4.25. Numunelerin 150 keV X-ışını deneysel ve teorik kütle zayıflatma katsayı farkı

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin 150 keV X-ışını deneysel lineer zayıflatma katsayısı değerleri Şekil 4.26'da verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. Teorik lineer zayıflatma katsayı en yüksek barit (B) tipi agrega ile üretilen G1-1d numunesinde 1,4661 cm^{-1} ve en düşük vermikülit (V) tipi agrega ile üretilen G8 numunesinde 0,1741 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. Barit (B) agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numuneler farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin lineer zayıflatma katsayı 1,3487 cm^{-1}, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ki ise 1,4661 cm^{-1} olduğu tespit edilmiştir. Barit agregasının yoğunluğunun yüksek olması X-ışını radyasyon tutuculuğunda zırhlama olarak kullanılması açısından büyük avantaj olduğu görülmektedir. Demir (2009) yaptığı çalışmada yüksek enerjili fotonlara (γ- veya X- ışını) karşı en iyi beton türü barit agregasına %10 kurşun oksit (PbO) katılarak elde edilen ağır beton türünde olduğunu tespit etmiştir.

2.grupta G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek lineer zayıflatma katsayı barit (B) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G9 kodlu) numunesinde 1,5473 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük lineer zayıflatma katsayı ise kolemanit (K) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G11 kodlu) 0,2062 cm^{-1} olarak bulunmuştur. Sevinç (2011) tarafından radyasyon zırhlaması için yapılan çalışmada lineer soğurma katsayısı en yüksek barit katkılı harçlarda, en düşük ise kolemanit katkılı harçlarda olduğu tespit edilmiştir.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11-G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Selestit, kolemanit ve manyetit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin lineer zayıflatma katsayı değerinde sırasıyla %23, %16 ve %5 arasında azalmalar elde edilmiştir. Buna karşılık barit, hematit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerde ise %10, %5 ve %1 artışlar tespit edilmiştir.

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde lineer zayıflatma katsayı en yüksek barit ve selestit (B ve S) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G15 kodlu) 1,3461 cm^{-1}, en düşük barit ve hematit (B ve H) tipi agrega ile üretilen numunelerde (G16 kodlu) 1,1082 cm^{-1} olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. Lineer zayıflatma katsayı en yüksek barit ve selestit (B ve S) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G20 numunesinde 1,4066 cm^{-1}, en düşük barit ve hematit (B ve H) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G23 numunesinde 0,2682 cm^{-1} olarak elde edilmiştir.

4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, kolemanit manyetit, hematit, limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin lineer zayıflatma katsayı sırasıyla %4, %3, %15, %14 ve %111 oranında artışa sebep olmuştur.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. Lineer zayıflatma katsayı en yüksek barit, selestit ve kolemanit (B, S ve K) tipi agrega ile üretilen G25 numunesinde 1,1458 cm^{-1}, en düşük barit, selestit, kolemanit ve manyetit (B, S, K ve M) tipi agrega ile üretilen G26 numunesinde 0,5363 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. Numune üretiminde kullanılan barit oranının azalmasıyla beraber lineer zayıflatma katsayısının da azaldığı sonucuna ulaşılmıştır (Mutlu, 2020; Demir 2009; Biber Temircik 2015, Oto 2012).

6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde lineer zayıflatma katsayı en yüksek 1,3034 cm^{-1} (G32 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük katsayı ise 1,0901 cm^{-1} (G30 kodlu) olarak bulunmuştur. Barit oranı yüksek olan numunelerin lineer zayıflatma katsayısı da yüksek bulunmuştur (Demir, 2009; Tüfekçi, 2017).

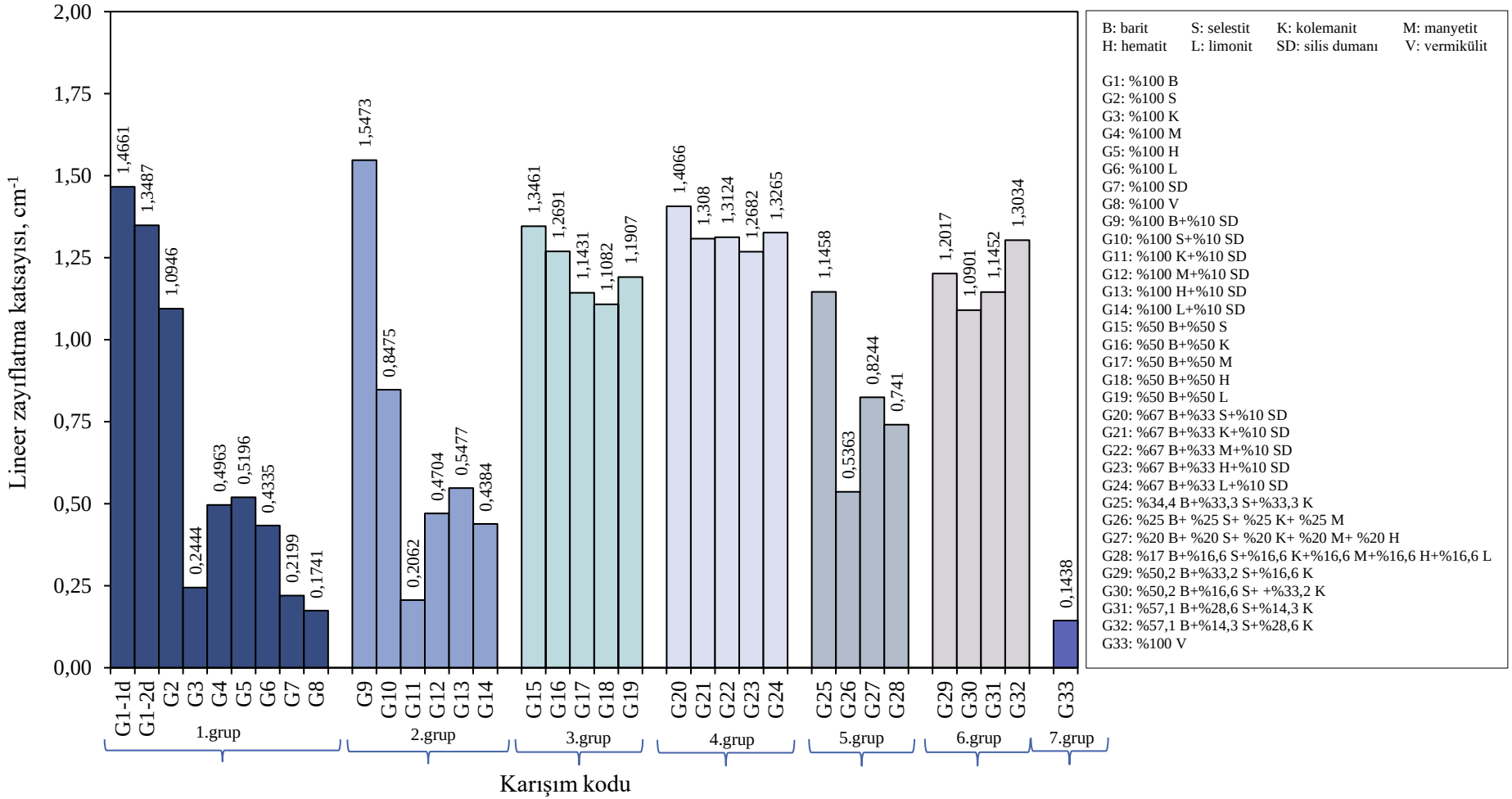
Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) lineer zayıflatma katsayısı 0,1438 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. Buna karşılık aynı karışıma sahip sıkıştırılarak üretilen

numunenin (1.grup G8 kodlu) lineer zayıflatma katsayısı ise 0,1741 cm^{-1} belirlenmiştir. Basınç altında sıkıştırılarak üretilen vermikülit agregalı numunelerin elle sıkıştırılanlara kıyasla birim hacim ağırlığında ve buna bağlı olarak da lineer zayıflatma katsayısında %21 artış gözlemlenmiştir. Mutlu (2020) barit, hematit, limonit, manyetit, vermikülit ve silis dumanı tipi agrega ile kompozit harçlar üreterek numunelerin lineer zayıflatma katsayısını tespit etmiştir.

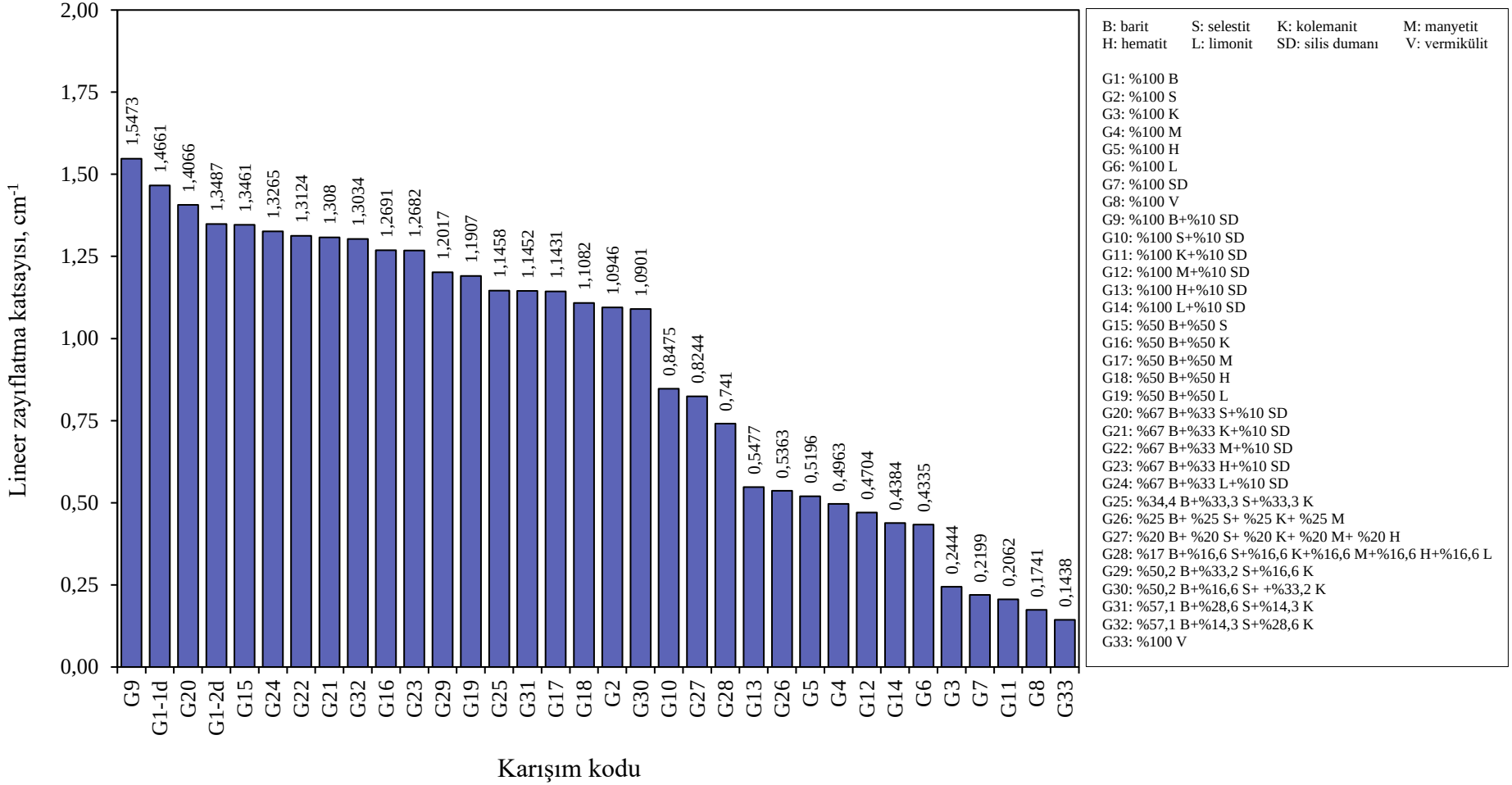
Numunelerin lineer zayıflatma katsayısı sıralı değerleri Şekil 4.27'de verilmiştir. Lineer zayıflatma katsayı en yüksek 210 bar basınç altında barit ve %10 silis dumanı ile üretilen (G9 kodlu) numunelerde 1,5473 cm^{-1} olmasına rağmen, sadece vermikülit agregası ile üretilen harçlarda (G33 kodlu) 0,1438 cm^{-1} olarak tespit edilmiştir. Mutlu (2019) çalışmasında sadece barit agregası kullanılarak üretilen harçların lineer zayıflatma katsayısını 1,213 cm^{-1} olarak tespit etmiştir. Silis dumanının mineral katkı olarak kullanıldığı numunelerde lineer zayıflatma katsayısı %28 daha fazla yüksek değerler elde edilmiştir (Mutlu, 2019). Kılınçarslan vd. (2006) çalışmasında, barit ve normal agrega kullanarak betonlar üreterek radyasyon azaltma katsayılarını bulmuştur. Normal agrega yerine barit kullanılması ve barit oranının artması ile lineer azaltma katsayısında da artışlar elde etmiştir.

Üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin içerisinde (32 karışım, elle sıkıştırılarak üretilen vermikülit agregalı karışım hariç) lineer zayıflatma katsayısı değerleri 0,1741-1,5473 cm^{-1} arasında değişmektedir. En yüksek lineer zayıflatma katsayısı değeri %10 silis dumanı içeren barit agregalı kompozit karışımlarda (G9) 1,5473 cm^{-1}, en düşük ise vermikülit agrega tipi ile üretilen (G33) karışımlarda 0,1438 cm^{-1}olarak belirlenmiştir. Lineer zayıflatma katsayısı ile agrega tipi ve üretilen kaplama numunelerinin yoğunlukları arasında önemli doğrusal ilişki tespit edilmiştir. 150 keV enerji değerinde barit agregalı ve %10 silis dumanı katkılı G9 kodlu numunelerin lineer zayıflatma katsayısının en yüksek değere ulaşmış olmasının nedeni zıhlama malzemesinin atom numarası ve fotonların madde ile etkileşimlerin meydana gelmesidir. Bu nedenle atom numarası yüksek olan malzemeler (barit, Z=56) daha etkin zırhlama performasına sahiptir.

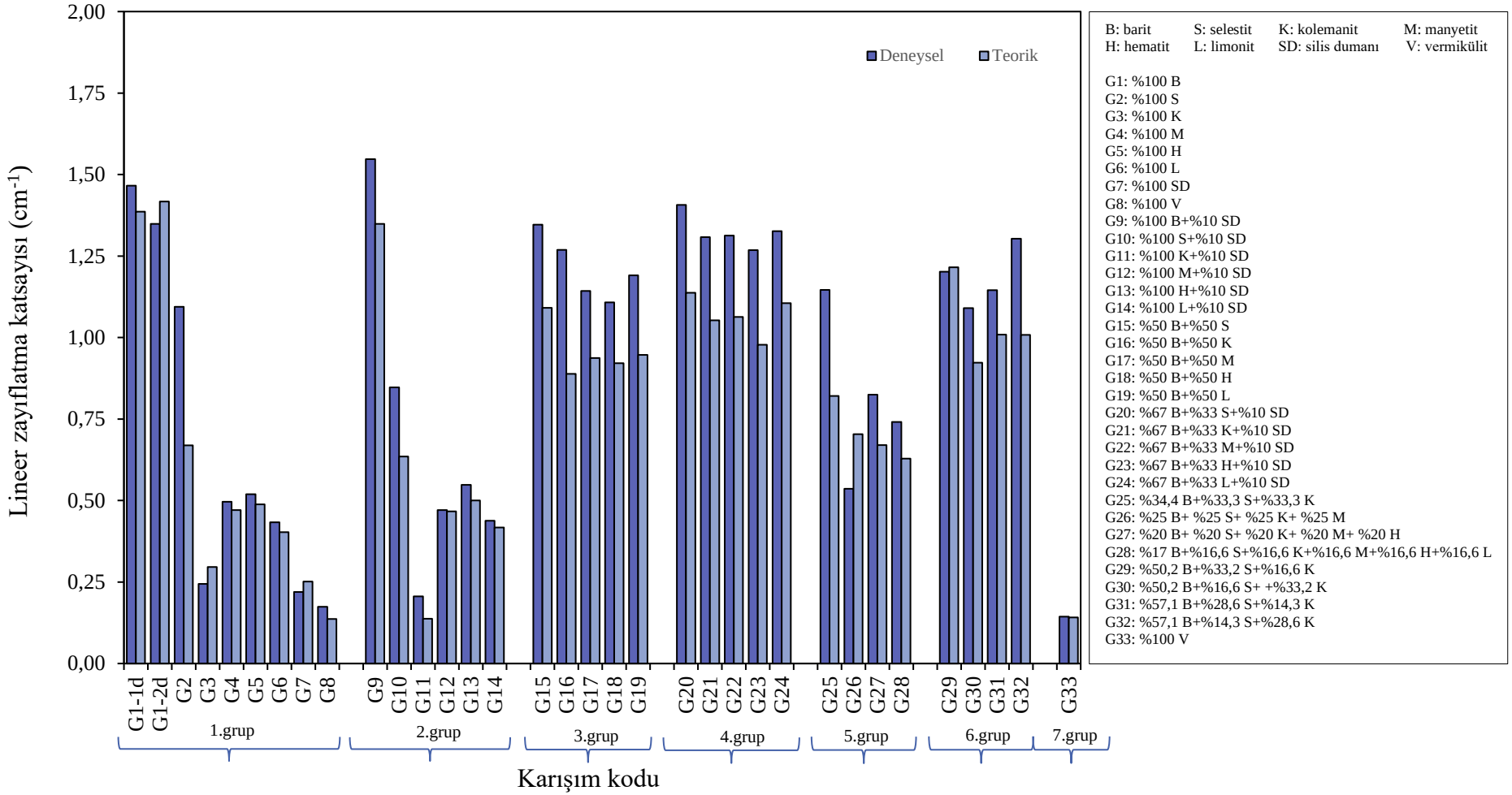
150 keV X-ışını deneysel ve XCOM programı ile teorik olarak elde edilen lineer zayıflatma katsayı arasındaki fark Şekil 4.28'de verilmiştir. Deneysel ve teorik lineer zayıflatma katsayıları literatürde diğer çalışmalarla yakın sonuçlar elde edilmiştir. Genel olarak deneysel lineer zayıflatma katsayısı 150 keV enerji değerinde teorik olarak hesaplanan değerden fazla bulunmuştur.



Şekil 4.26. Numunelerin 150 keV X-ışını deneysel lineer zayıflatma katsayısı değerleri



Şekil 4.27. Numunelerin 150 keV X-ışını deneysel lineer zayıflatma katsayısı sıralı değerleri



Şekil 4.28. Numunelerin 150 keV X-ışını deneysel ve teorik lineer zayıflatma katsayı farkı

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin 150 keV X-ışını yarı kalınlık değerleri (Half Value Layer-HVL) Şekil 4.29'da verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. Yarı kalınlık değeri en yüksek vermikülit (V) tipi agrega ile üretilen G8 numunesinde 3,97 cm ve en düşük barit (B) tipi agrega ile üretilen G1 numunesinde 0,47 cm olarak elde edilmiştir. Barit (B) agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numuneler farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin yarı kalınlık değeri 0,51 cm, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ki ise 0,47 cm olduğu tespit edilmiştir.

2.grupta G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek yarı kalınlık değeri kolemanit (K) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G11 kodlu) numunesinde 3,35 cm olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük yarı kalınlık değeri ise barit (B) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G9 kodlu) 0,45 cm olarak bulunmuştur.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, hematit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin yarı kalınlık değeri sırasıyla %9, %5 ve %1 azaldığı tespit edilmiştir. Buna karşın selestit, kolemanit ve manyetit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numuneler de ise %29, %19 ve %6 oranında artışa sebep olmuştur.

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek yarı kalınlık değeri en yüksek barit ve hematit (B ve H) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G18 kodlu) 0,63 cm, en düşük barit ve selestit (B ve S) tipi agrega ile üretilen numunelerde (G15 kodlu) 0,52 cm olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. Yarı kalınlık değeri en yüksek barit ve hematit (B ve H) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G23 numunesinde 0,54 cm, en düşük barit ve

selestit (B ve S) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G20 numunesinde 0,49 cm olarak elde edilmiştir.

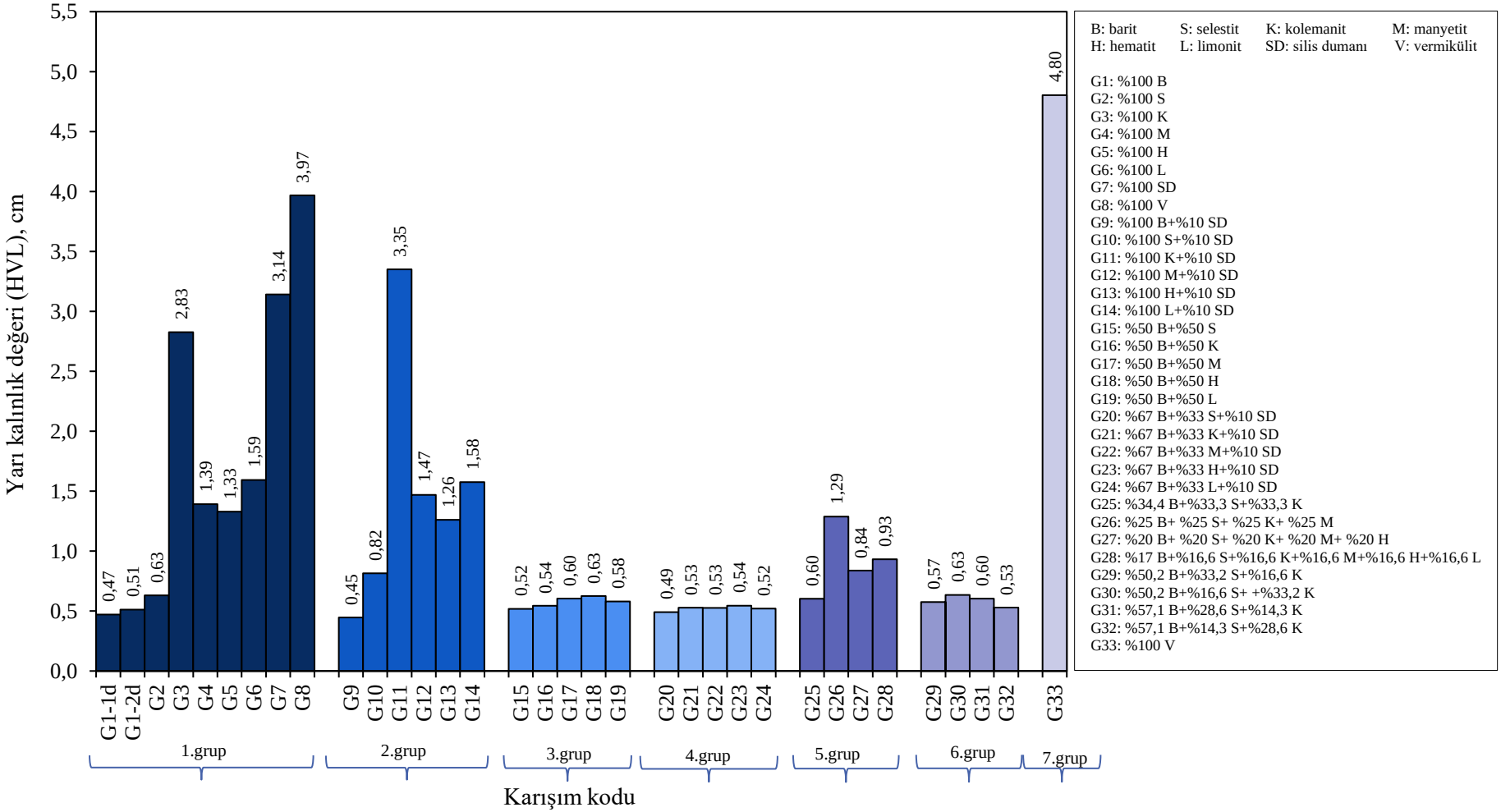
4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, kolemanit manyetit, hematit, limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin yarı kalınlık değeri sırasıyla %5, %3, %13, %13 ve %10 oranında azalmaya sebep olmuştur.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. Yarı kalınlık değeri en yüksek barit, selestit, kolemanit ve manyetit (B, S, K ve M) tipi agrega ile üretilen G26 numunesinde 1,29 cm, en düşük barit, selestit ve kolemanit (B, S ve K) tipi agrega ile üretilen G25 numunesinde 0,60 cm olarak elde edilmiştir. Numune üretiminde kullanılan barit oranının azalmasıyla beraber yarı kalınlık değerinin de azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

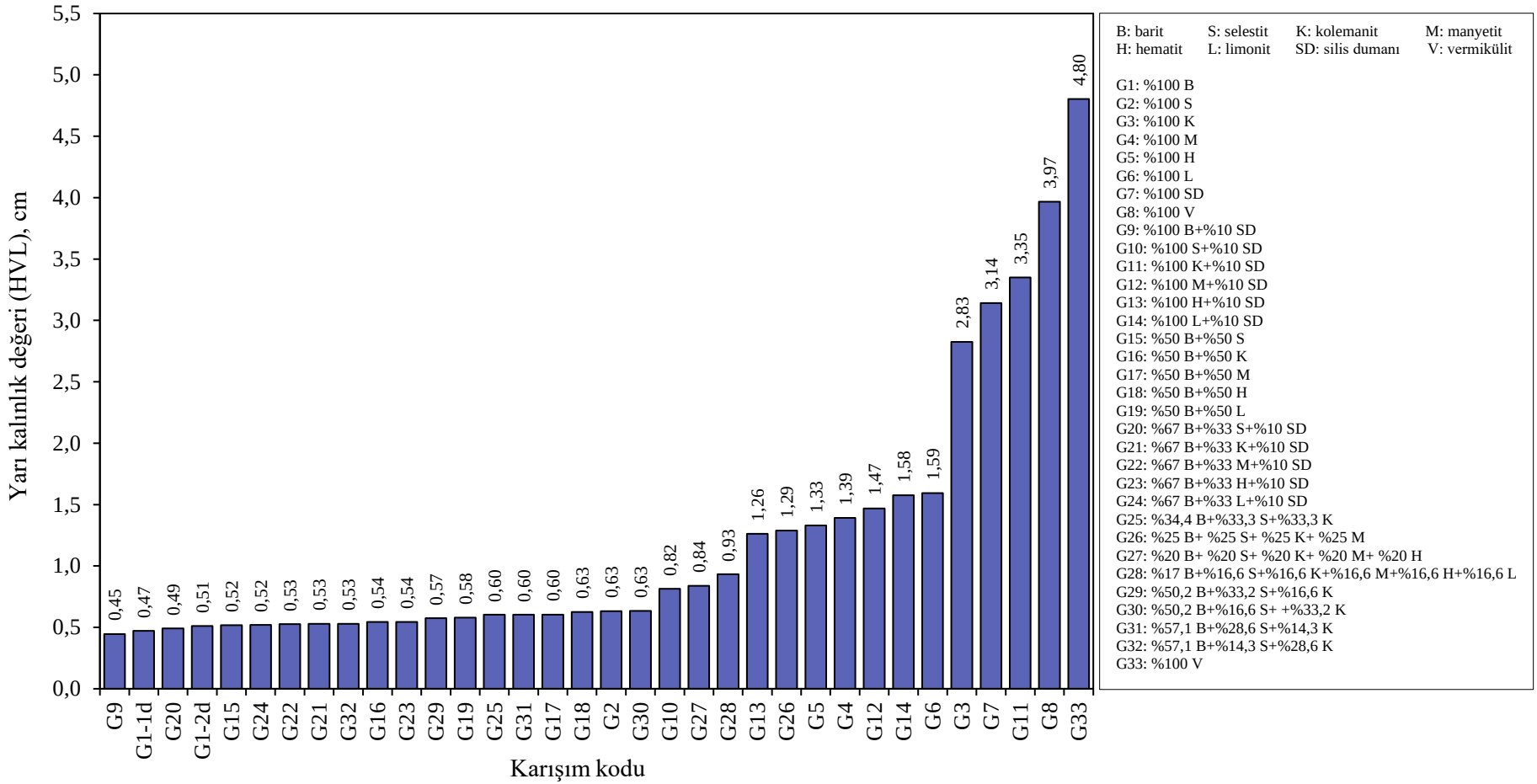
6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde yarı kalınlık değeri en yüksek 0,63 cm (G30 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük katsayı ise 0,53 cm (G32 kodlu) olarak bulunmuştur.

Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) yarı kalınlık değeri 4,80 cm olarak elde edilmiştir. Buna karşılık aynı karışıma sahip sıkıştırılarak üretilen numunenin (1.grup G8 kodlu) yarı kalınlık değeri ise 3,97 cm belirlenmiştir. Basınç altında sıkıştırılarak üretilen vermikülit agregalı numunelerin elle sıkıştırılanlara kıyasla birim hacim ağırlığında ve buna bağlı olarak da yarı kalınlık değerinde %21 artış gözlemlenmiştir.

Radyasyon şiddetini yarı değerine düşüren zırhlama malzemesine özgü kalınlığı (HVL) zırhlama kılavuzunda maksimum tüp gerilim 150 kv X ışınları kurşun ve beton için sırasıyla 0,30 mm ve 2,24 cm olarak belirtilmiştir. HVL değeri en düşük 210 bar basınç altında barit ve %10 silis dumanı ile üretilen (G9 kodlu) numunelerde 0,45 cm olarak tespit edilmiştir. Buna karşılık en yüksek yarı kalınlık değeri (HVL) ise elle sıkıştırılarak vermikülit ile üretilen G33 kodlu numunelerde 4,80 cm olarak bulunmuştur (Şekil 4.30).



Şekil 4.29. Numunelerin 150 keV X-ışını yarı kalınlık değeri (HVL)



Şekil 4.30. Numunelerin 150 keV X-ışını yarı kalınlık sıralı değeri (HVL)

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin 150 keV X-ışını yüzde bir değerlerine düşüren kalınlık değerleri (Tent Value Layer-2TVL) Şekil 4.31'de verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. 2TVL kalınlık değeri en yüksek vermikülit (V) tipi agrega ile üretilen G8 numunesinde 26,45 cm ve en düşük barit (B) tipi agrega ile üretilen G1 numunesinde 3,14 cm olarak elde edilmiştir. Barit (B) agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numuneler farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin yarı kalınlık değeri 3,41 cm, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ki ise 3,14 cm olduğu tespit edilmiştir.

2.grupta G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek 2TVL kalınlık değeri kolemanit (K) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G11 kodlu) numunesinde 22,34 cm olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük yarı kalınlık değeri ise barit (B) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G9 kodlu) 2,98 cm olarak bulunmuştur.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, hematit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin 2TVL kalınlık değeri sırasıyla %9, %5 ve %1 azaldığı tespit edilmiştir. Buna karşın selestit, kolemanit ve manyetit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numuneler de ise %29, %19 ve %6 oranında artışa sebep olmuştur.

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek 2TVL kalınlık değeri en yüksek barit ve hematit (B ve H) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G18 kodlu) 4,17 cm, en düşük barit ve selestit (B ve S) tipi agrega ile üretilen numunelerde (G15 kodlu) 3,46 cm olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. 2TVL kalınlık değeri en yüksek barit ve hematit (B ve H) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G23 numunesinde 3,63 cm, en düşük barit ve

selestit (B ve S) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G20 numunesinde 3,27 cm olarak elde edilmiştir.

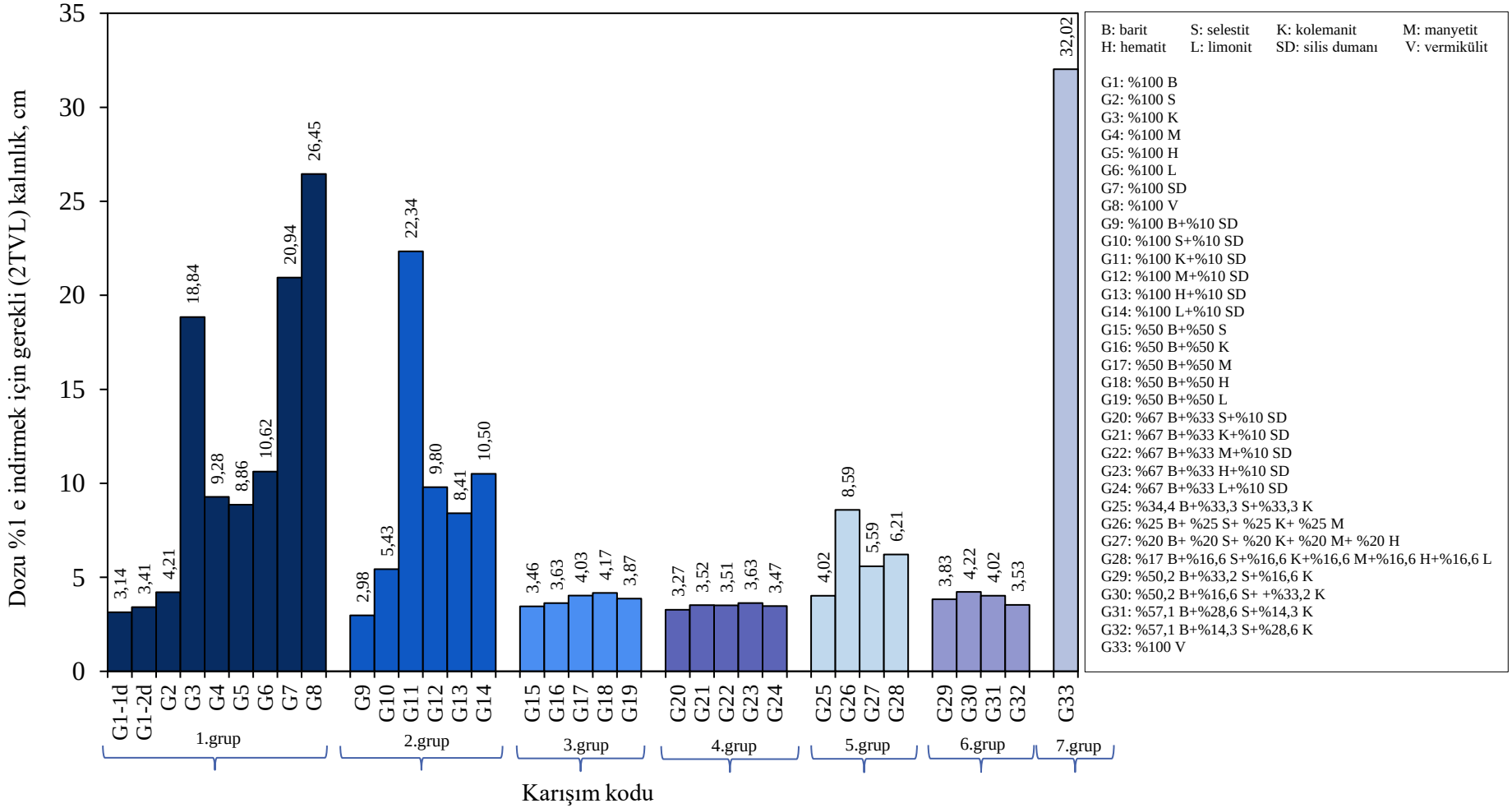
4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, kolemanit manyetit, hematit, limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin 2TVL kalınlık değeri sırasıyla %5, %3, %13, %13 ve %10 oranında azalmaya sebep olmuştur.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. 2TVL kalınlık değeri en yüksek barit, selestit, kolemanit ve manyetit (B, S, K ve M) tipi agrega ile üretilen G26 numunesinde 8,599 cm, en düşük barit, selestit ve kolemanit (B, S ve K) tipi agrega ile üretilen G25 numunesinde 4,02 cm olarak elde edilmiştir. Numune üretiminde kullanılan barit oranının azalmasıyla beraber yarı kalınlık değerinin de azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

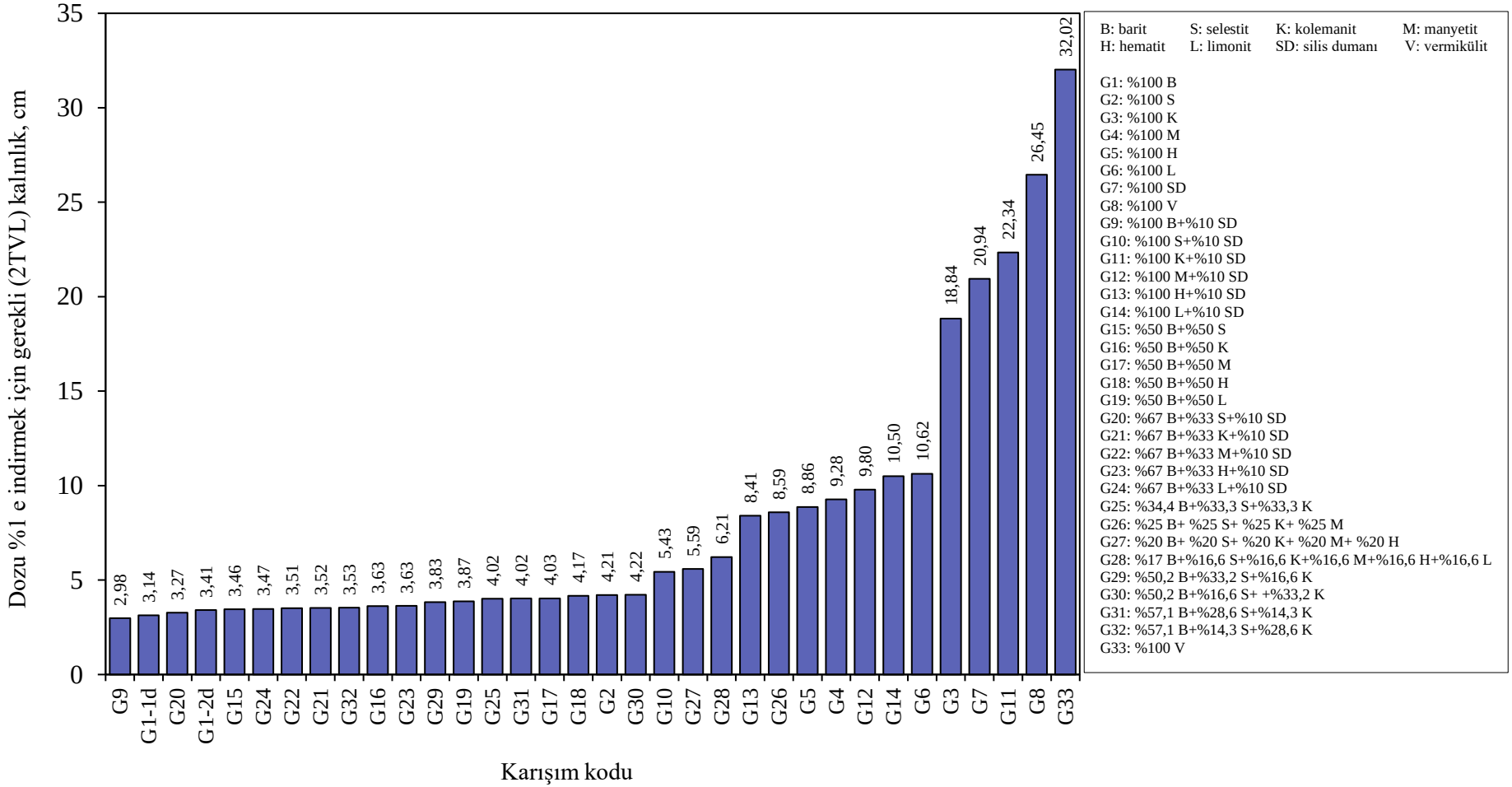
6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde 2TVL kalınlık değeri en yüksek 4,22 cm (G30 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük katsayı ise 3,53 cm (G32 kodlu) olarak bulunmuştur.

Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) 2TVL kalınlık değeri 32,02 cm olarak elde edilmiştir. Buna karşılık aynı karışıma sahip sıkıştırılarak üretilen numunenin (1.grup G8 kodlu) yarı kalınlık değeri ise 26,45 cm belirlenmiştir. Basınç altında sıkıştırılarak üretilen vermikülit agregalı numunelerin elle sıkıştırılanlara kıyasla birim hacim ağırlığında ve buna bağlı olarak da 2TVL kalınlık değerinde %21 artış gözlemlenmiştir.

2TVL değeri en düşük 210 bar basınç altında barit ve %10 silis dumanı ile üretilen (G9 kodlu) numunelerde 2,98 cm olarak tespit edilmiştir. Buna karşılık en yüksek yarı kalınlık değeri (HVL) ise elle sıkıştırılarak vermikülit ile üretilen G33 kodlu numunelerde 32,02 cm olarak bulunmuştur (Şekil 4.32).



Şekil 4.31. Numunelerin 150 keV X-ışını Dozu %1 e indirmek için gerekli kalınlık (2TVL) değeri



Şekil 4.32. Numunelerin 150 keV X-ışını Dozu %1 e indirmek için gerekli kalınlık (2TVL) sıralı değeri

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin 150 keV X-ışını 1 mm kurşun eş değer kalınlıkları Şekil 4.33'te verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. 1 mm kurşun eş değer kalınlığı en yüksek vermikülit (V) tipi agrega ile üretilen G8 numunesinde 124,73 mmPb ve en düşük barit (B) tipi agrega ile üretilen G1 numunesinde 14,81 mmPb olarak elde edilmiştir. Barit (B) agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numuneler farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin 1 mm kurşun eş değer kalınlığı 16,10 mmPb, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ki ise 14,81 mmPb olduğu tespit edilmiştir.

2.grupta G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek 1 mm kurşun eş değer kalınlığı limonit (L) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G14 kodlu) numunesinde 49,53 mmPb olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük 1 mm kurşun eş değer kalınlığı ise selestit (S) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G10 kodlu) 14,68 mm olduğu görülmektedir.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit ve manyetit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin 1 mm kurşun eş değer kalınlığı sırasıyla %16 ve %6 arttığı tespit edilmiştir. Buna karşın selestit, kolemanit, hematit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numuneler de ise %26, %81, %5 ve %1 oranında azalmaya sebep olmuştur.

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek 1 mm kurşun eş değer kalınlığı barit ve hematit (B ve H) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G18 kodlu) 19,67 mmPb, en düşük barit ve selestit (B ve S) tipi agrega ile üretilen numunelerde (G15 kodlu) 16,30 mmPb olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. 1 mm kurşun eş değer kalınlığı en yüksek barit ve hematit (B ve H) tipi agrega ve

%10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G23 numunesinde 17,12 mmPb, en düşük barit ve selestit (B ve S) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G20 numunesinde 15,44 mmPb olarak elde edilmiştir.

4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, kolemanit manyetit, hematit, limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin 1 mm kurşun eş değer kalınlığı sırasıyla %5, %3, %13, %13 ve %10 oranında azalmaya sebep olmuştur.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. 1 mm kurşun eş değer kalınlığı en yüksek barit, selestit, kolemanit ve manyetit (B, S, K ve M) tipi agrega ile üretilen G26 numunesinde 40,49 mmPb, en düşük barit, selestit ve kolemanit (B, S ve K) tipi agrega ile üretilen G25 numunesinde 18,95 mmPb olarak elde edilmiştir. Numune üretiminde kullanılan barit oranının azalmasıyla beraber yarı kalınlık değerinin de azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde 1 mm kurşun eş değer kalınlığı en yüksek 19,92 mmPb (G30 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük kalınlık ise 16,66 mmPb (G32 kodlu) olarak bulunmuştur. Barit oranı yüksek olan numunelerin 1 mm kurşun eş değer kalınlığı de düşük bulunmuştur.

Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) 1 mm kurşun eş değer kalınlığı 151,01 mm olarak elde edilmiştir. Buna karşılık aynı karışıma sahip sıkıştırılarak üretilen numunenin (1.grup G8 kodlu) 1 mm kurşun eş değer kalınlığı ise 124,73 mm belirlenmiştir. Basınç altında sıkıştırılarak üretilen vermikülit agregalı numunelerin elle sıkıştırılanlara kıyasla birim hacim ağırlığında ve buna bağlı olarak da 1 mm kurşun eş değer kalınlığının daha düşük değerler aldığı gözlemlenmiştir.

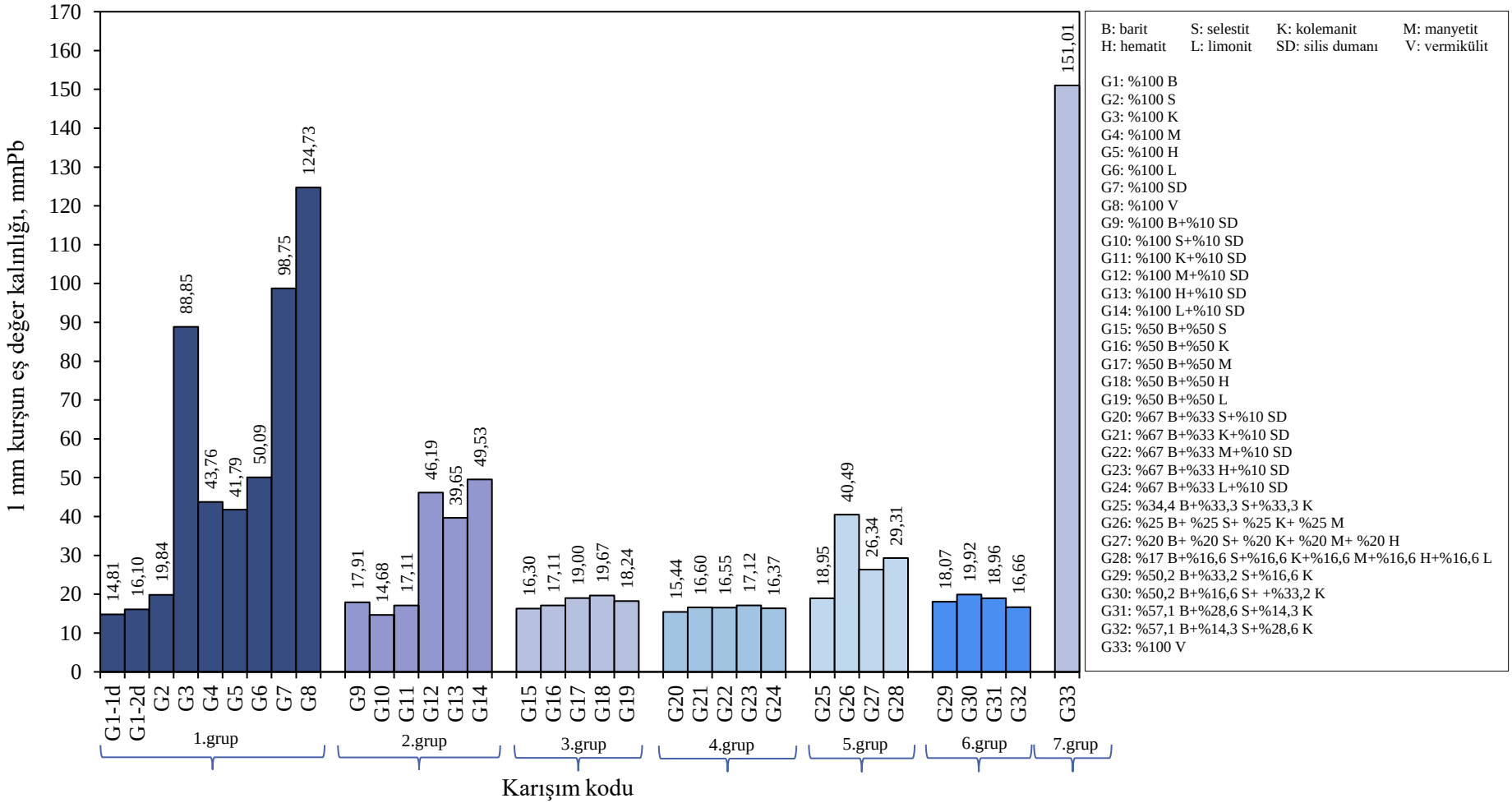
Üretilen numunelerin 1 mm kurşun eş değer sıralı kalınlık değerleri Şekil 4.34'te verilmiştir. 1 mm kurşun eş değeri en düşük 200 bar basınç altında selestit ve %10 silis dumanı ile üretilen (G10 kodlu) numunelerde 14,68 mmPb

olarak tespit edilmiştir. Mutlu (2020) 1 mm kurşun eş değerlerini tespit etmek için yaptığı çalışmasında sadece barit agregası kullanarak ürettiği kompozit harçlarda 17,9 mm kalınlık elde etmiştir (Mutlu, 2020).

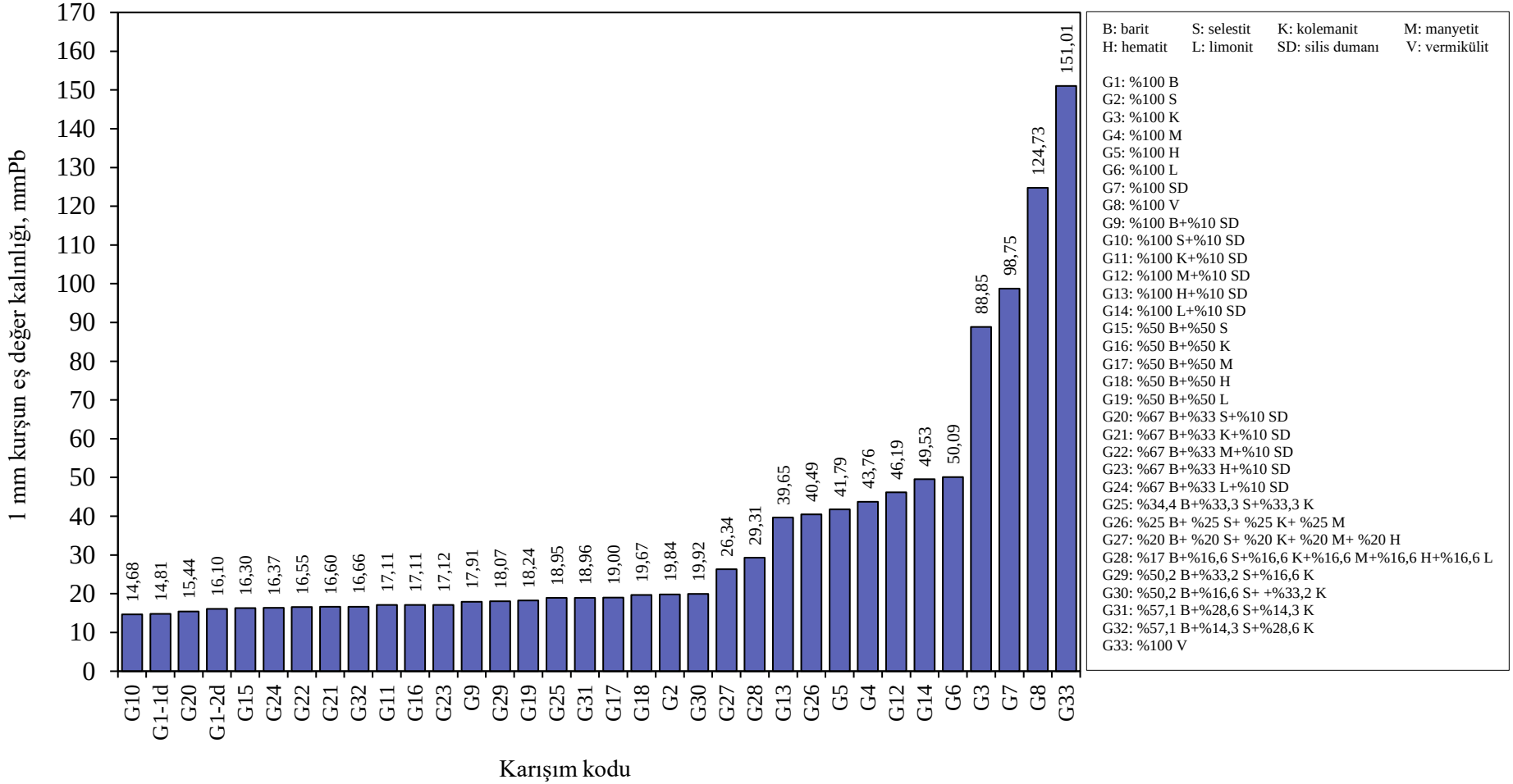
Üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin içerisinde (31 karışım, vermikülit agregalı karışımlar hariç) 1 mm kurşun eş değerleri 14,68-98,75 mmPb arasında değişmektedir.

Numunelerin 150 keV X-ışını 1 mm kurşun eş değer kalınlığı-yoğunluk ilişkisi Şekil 4.35'te verilmiştir. Radyasyondan korunmak için zırhlama önemli bir konu olup malzeme yoğunluğu ile yakından ilgilidir. Bu çalışmada, en ince malzeme ile en iyi soğurma etkisini elde ederek daha hafif bir malzeme geliştirilmesi hedeflenmektedir. 1 mm kurşun eş değer kalınlığı en düşük selestit ve %10 silis dumanı ile üretilen G10 kodlu numunede 14,68 mmPb iken yoğunluk 2,99 g/cm^3 olarak elde edilmiştir. Buna karşılık yoğunluk değeri en yüksek barit ve selestit ile üretilen G15 kodlu numunede 3,23 g/cm^3 olduğunda kalınlık 16,30 mmPb olduğu görülmektedir. Bu durum lineer zayıflatma katsayı değerinin zırh malzemesinin yoğunluğu ve atom numarası (Barit Z=56, Selestit Z=38) ile doğru orantılı olarak artmakta ve kurşun eş değer kalınlığı azaltmaktadır.

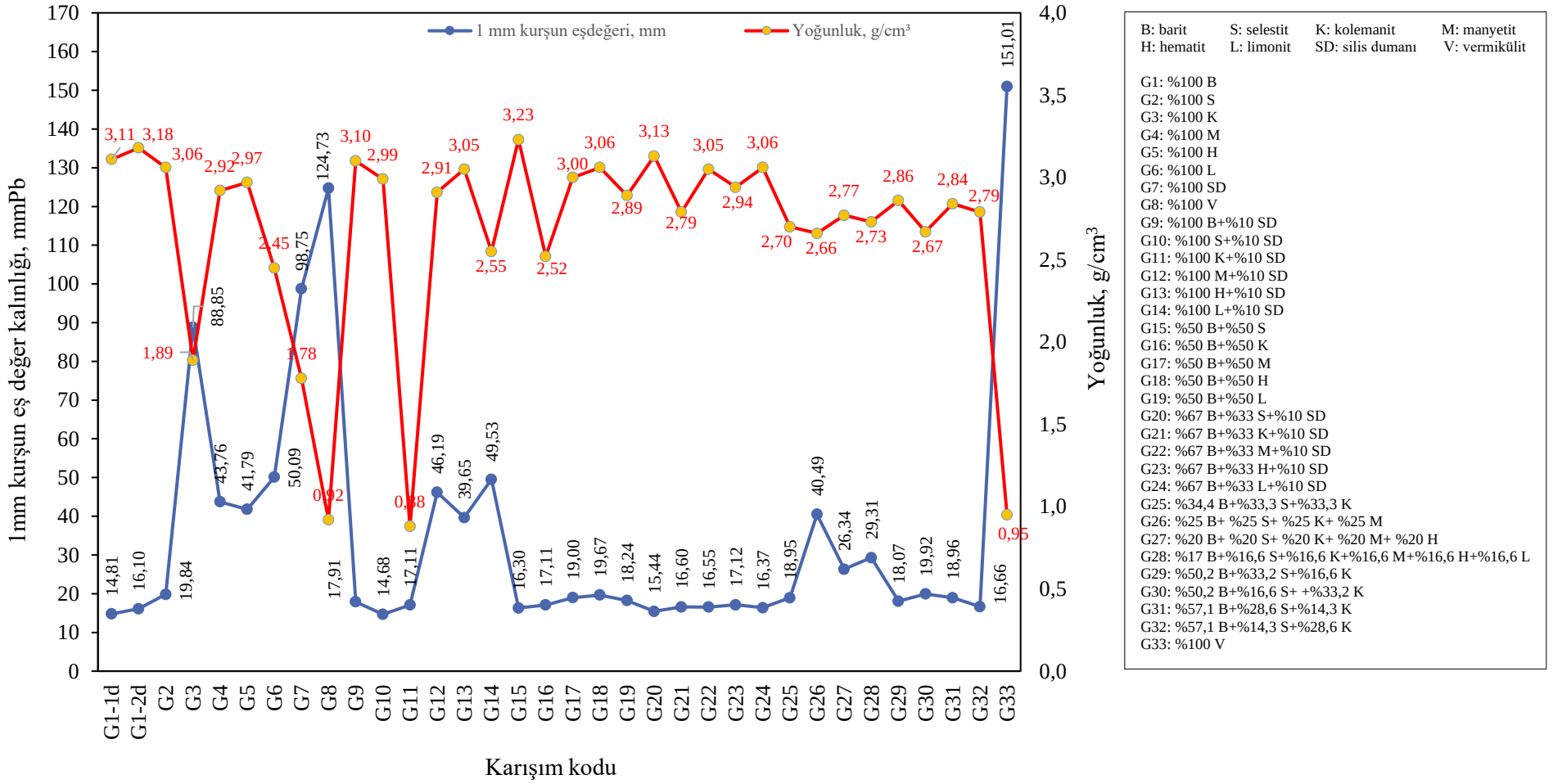
Numunelerin 150 keV X-ışını 1 mm kurşun eş değer kalınlığı-porozite ilişkisi Şekil 4.36'da verilmiştir. 1 mm kurşun eş değer kalınlığı en düşük selestit ve %10 silis dumanı ile üretilen G10 kodlu numunede 14,68 mmPb iken porozite oranı 12,0 olarak elde edilmiştir. Buna karşılık porozite oranı en yüksek vermikülit ile üretilen G33 kodlu numunede 56,5 olduğunda kalınlık 151,01 mmPb olduğu görülmektedir. Porozite oranı, üretilen numunelerin fiziksel, mekanik, radyasyon tutuculuk özelliklerini etkileyen önemli parametredir. Porozite oranı yüksek olan numunelerin 1 mm kurşun eş değerleri büyük olduğu görülmektedir.



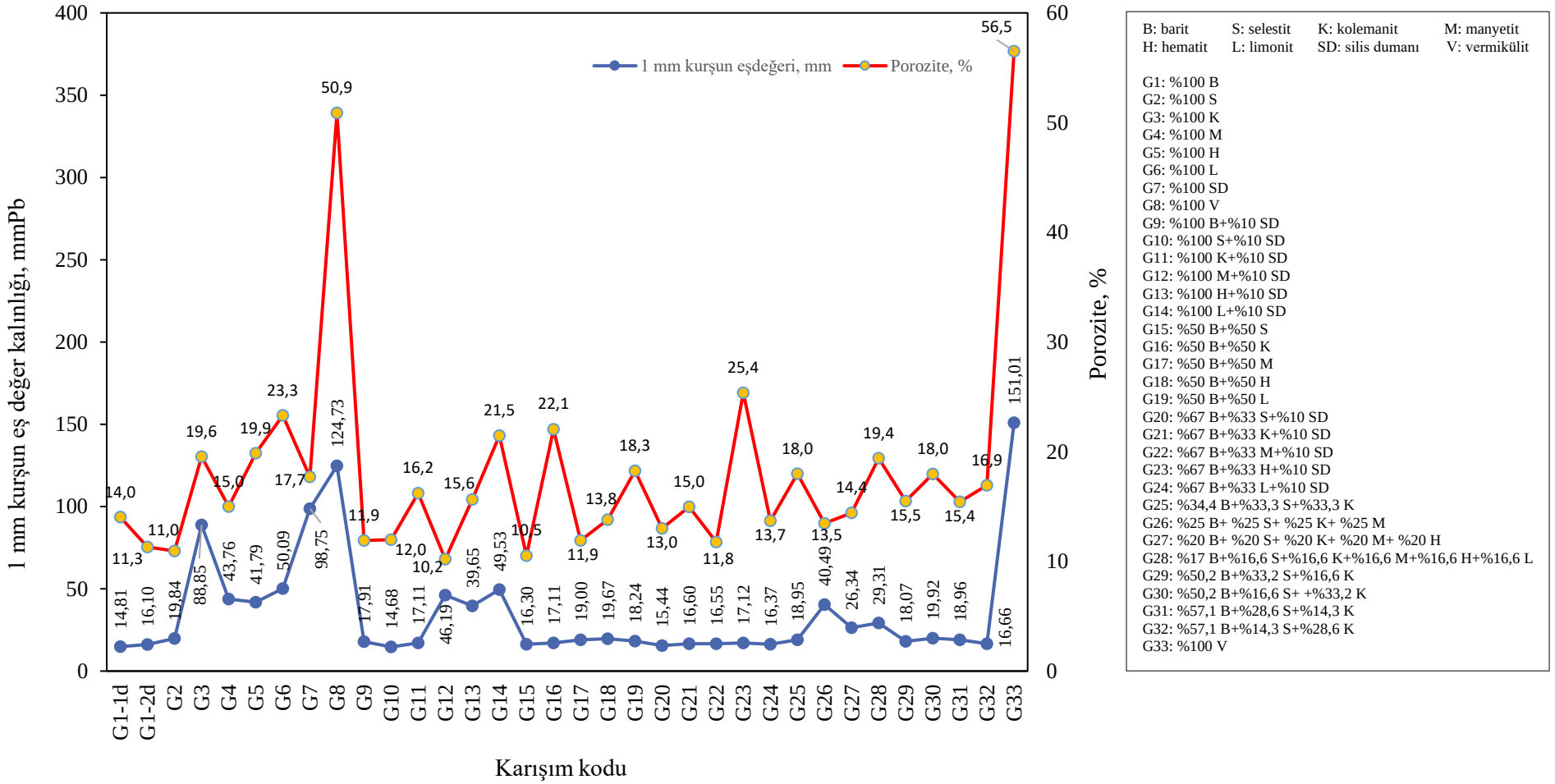
Şekil 4.33. Numunelerin 150 keV X-ışını 1 mm kurşun eş değeri (Dozu %11.4'e indirmek için gerekli kalınlık)



Şekil 4.34. Numunelerin 150 keV X-ışını sıralı 1 mm kurşun eş değeri (Dozu %11.4'e indirmek için gerekli kalınlık)



Şekil 4.35. Numunelerin 150 keV X-ışını 1 mm kurşun eş değer kalınlığı-yoğunluk ilişkisi



Şekil 4.36. Numunelerin 150 keV X-ışını 1 mm kurşun eş değer kalınlığı-porozite ilişkisi

4.4.2. Gama-Işını Tutuculuk

Çalışmada üretilen çimento esaslı kaplama numunelerinin lineer ve kütle zayıflatma katsayısının deneysel olarak belirlenmesi amacıyla İTÜ Enerji Enstitüsü'nde hazırlanan deney düzeneğinde, Cs-137 radyoizotopunun yaydığı 662 keV enerjili gama ışınları ve NaI(Tl) sintilatör tipi detektör ile deneysel ölçümler yapılmıştır. Lineer ve kütle zayıflatma katsayıları Bölüm 3.2.1'de açıklandığı gibi Denklem 3.13 ve 3.14 yardımıyla hesaplanmış ve her bir kaplama numunesinin yarı kalınlık (HVL), dozu %1'e indirmek için 2TVL kalınlık ve 1 mm kurşun eşdeğeri deney sonuçları Çizelge 4.5'te verilmiştir. Ayrıca 662 keV Gama-ışını için yapılan sayımların Denklem 3.13 yardımıyla I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi ve R^2 (regresyon sabiti katsayısı) oranının fonksiyonel grafikleri çizilmiş, sonuçlar Ek-6'da verilmiştir.

Üretilen çimento esaslı kaplama numunelerinin teorik lineer ve kütle zayıflatma katsayıları literatürde yaygın olarak kullanılan XCOM programı kullanılarak elde edilmiştir. XCOM programına harç karışımlarının Ek-5'te verilen oksit cinsinden element bileşenleri ve bunların ağırlıkça yüzdeleri girilerek kütle zayıflatma katsayıları (cm^2/g) belirlenmiş, elde edilen değerler numunelerin birim hacim ağırlığı ile çarpılarak teorik lineer zayıflatma katsayıları (cm^{-1}) hesaplanmıştır. Deneysel ve teorik olarak elde edilen kütle ve lineer zayıflatma katsayıları karşılaştırılmalı olarak Çizelge 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.5. 662 keV γ-ışını için deneysel ve teorik zayıflatma katsayıları ile kurşun eşdeğerleri

Duvar kaplama grubu	Duvar kaplama harç tipi	BHA	μ-katsayısı (Deneysel)	μ-katsayısı (Deneysel)	Yarı kalınlık değeri (HVL)	Dozu %1 e indirmek için gerekli kalınlık (2TVL)	1 mm kurşun eş değeri	μ-katsayısı (XCOM)	μ-katsayısı (XCOM)	Fark (Deneysel-Teorik)
		(g/cm^3)	(cm^{-1})	(cm^2/g)	(cm)	(cm)	(mmPb)	(cm^{-1})	(cm^2/g)	(%)
1. grup	G1-1d	3,11	0,2242	0,0721	3,08	20,54	5,24	0,2373	0,0763	5,83
	G1-2d	3,18	0,2110	0,0664	3,27	21,83	5,57	0,2426	0,0763	14,98
	G2	3,06	0,2220	0,0725	3,11	20,74	5,29	0,2324	0,0760	4,70
	G3	1,89	0,1468	0,0777	4,71	31,37	8,00	0,1469	0,0777	0,07
	G4	2,92	0,2171	0,0743	3,18	21,21	5,41	0,2230	0,0764	2,72
	G5	2,97	0,2059	0,0693	3,35	22,37	5,70	0,2261	0,0761	9,83
	G6	2,45	0,1830	0,0747	3,77	25,17	6,42	0,1866	0,0762	1,95
	G7	1,78	0,1356	0,0762	5,09	33,96	8,66	0,1364	0,0766	0,56
	G8	0,92	0,1159	0,1260	5,96	39,73	10,13	0,0712	0,0774	38,60
2. grup	G9	3,10	0,2347	0,0757	2,94	19,62	5,00	0,2420	0,0781	3,10
	G10	2,99	0,2132	0,0713	3,24	21,60	5,51	0,2273	0,0760	6,63
	G11	0,88	0,1320	0,1500	5,23	34,89	8,90	0,0685	0,0778	48,14
	G12	2,91	0,2132	0,0732	3,24	21,61	5,51	0,2224	0,0764	4,33
	G13	3,05	0,2207	0,0724	3,13	20,87	5,32	0,2324	0,0762	5,29
	G14	2,55	0,1881	0,0738	3,67	24,48	6,24	0,1943	0,0762	3,30
3. grup	G15	3,23	0,2216	0,0686	3,13	20,85	5,30	0,2505	0,0776	13,31
	G16	2,52	0,1955	0,0776	3,53	23,56	6,01	0,1947	0,0773	0,39
	G17	3,00	0,2215	0,0738	3,12	20,79	5,30	0,2318	0,0773	4,63
	G18	3,06	0,2203	0,0721	3,29	21,93	5,33	2,3389	0,7657	962,69
	G19	2,89	0,2099	0,0726	3,29	21,94	5,59	0,2233	0,0773	6,40

Çizelge 4.5. (devam) 662 keV γ-ışını için deneysel ve teorik zayıflatma katsayıları ile kurşun eşdeğerleri

Duvar kaplama grubu	Duvar kaplama harç tipi	BHA	μ-katsayısı (Deneysel)	μ-katsayısı (Deneysel)	Yarı kalınlık değeri (HVL)	Dozu %1 e indirmek için gerekli kalınlık (2TVL)	1 mm kurşun eş değeri	μ-katsayısı (XCOM)	μ-katsayısı (XCOM)	Fark (Deneysel-Teorik)
		(g/cm^3)	(cm^{-1})	(cm^2/g)	(cm)	(cm)	(mmPb)	(cm^{-1})	(cm^2/g)	(%)
4. grup	G20	3,13	0,2247	0,0718	3,07	20,50	5,23	0,2423	0,0774	7,83
	G21	2,79	0,2052	0,0735	3,37	22,44	5,72	0,2176	0,0780	6,03
	G22	3,05	0,2155	0,0707	3,21	21,37	5,45	0,2365	0,0775	9,74
	G23	2,94	0,2191	0,0745	3,15	21,02	5,36	0,2240	0,0762	2,22
	G24	3,06	0,2262	0,0739	3,05	20,36	5,19	0,2373	0,0776	4,92
5. grup	G25	2,70	0,2077	0,0769	3,33	22,17	5,65	0,2085	0,0772	0,41
	G26	2,66	0,1997	0,0751	3,46	23,06	5,88	0,2048	0,0770	2,56
	G27	2,77	0,2044	0,0738	3,38	22,53	5,74	0,2102	0,0759	2,83
	G28	2,73	0,1991	0,0729	3,47	23,13	5,90	0,2094	0,0767	5,18
6. grup	G29	2,86	0,2011	0,0703	3,44	22,90	5,84	0,2225	0,0778	10,62
	G30	2,67	0,2029	0,0760	3,41	22,70	5,79	2,0725	0,7762	921,42
	G31	2,84	0,2050	0,0722	3,37	22,46	5,73	0,2199	0,0774	7,28
	G32	2,79	0,2077	0,0744	3,33	22,17	5,65	0,2168	0,0777	4,36
7. grup	G33	0,95	0,0948	0,0998	7,29	48,58	12,39	0,0735	0,0774	22,49

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin 662 keV Gama-ışını teorik kütle zayıflatma katsayısı değerleri Şekil 4.37'de verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. Teorik kütle zayıflatma katsayı en yüksek kolemanit (K) tipi agrega ile üretilen G3 numunesinde 0,0777 cm^2/g ve en düşük selestit (S) tipi agrega ile üretilen G2 numunesinde 0,0760 cm^2/g olarak elde edilmiştir.

2.grupta G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek kütle zayıflatma katsayı barit (B) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G9 kodlu) numunesinde 0,0781 cm^2/g olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük kütle zayıflatma katsayı ise selestit (S) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G10 kodlu) 0,0760 cm^2/g olarak bulunmuştur.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11-G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G9 kodlu numunelerin kütle zayıflatma katsayı değerinde %2 artış gözlemlenmiştir. SD ilavesinin kütle azaltma katsayısı değerini küçük bir oran olsa da azalttığı ve radyason geçirgenliği üzerine etkin olarak belirleyici bir malzeme olmadığı tespit edilmiştir (Biber Temircik, 2015).

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde kütle zayıflatma katsayı en yüksek barit ve hematit (B ve H) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G18 kodlu) 0,7657 cm^2/g olarak bulunmuştur. Üretim esnasında G18 kodlu numunede aderans (bağlanma) sorunu meydana geldiği için çimento miktarında artışa gidilmiştir.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. Kütle zayıflatma katsayı en yüksek barit ve kolemanit (B ve K) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G21 numunesinde 0,078 cm^2/g, en düşük barit ve hematit (B ve H) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G23 numunesinde 0,0762 cm^2/g olarak elde edilmiştir.

4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, kolemanit manyetit, hematit, limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen

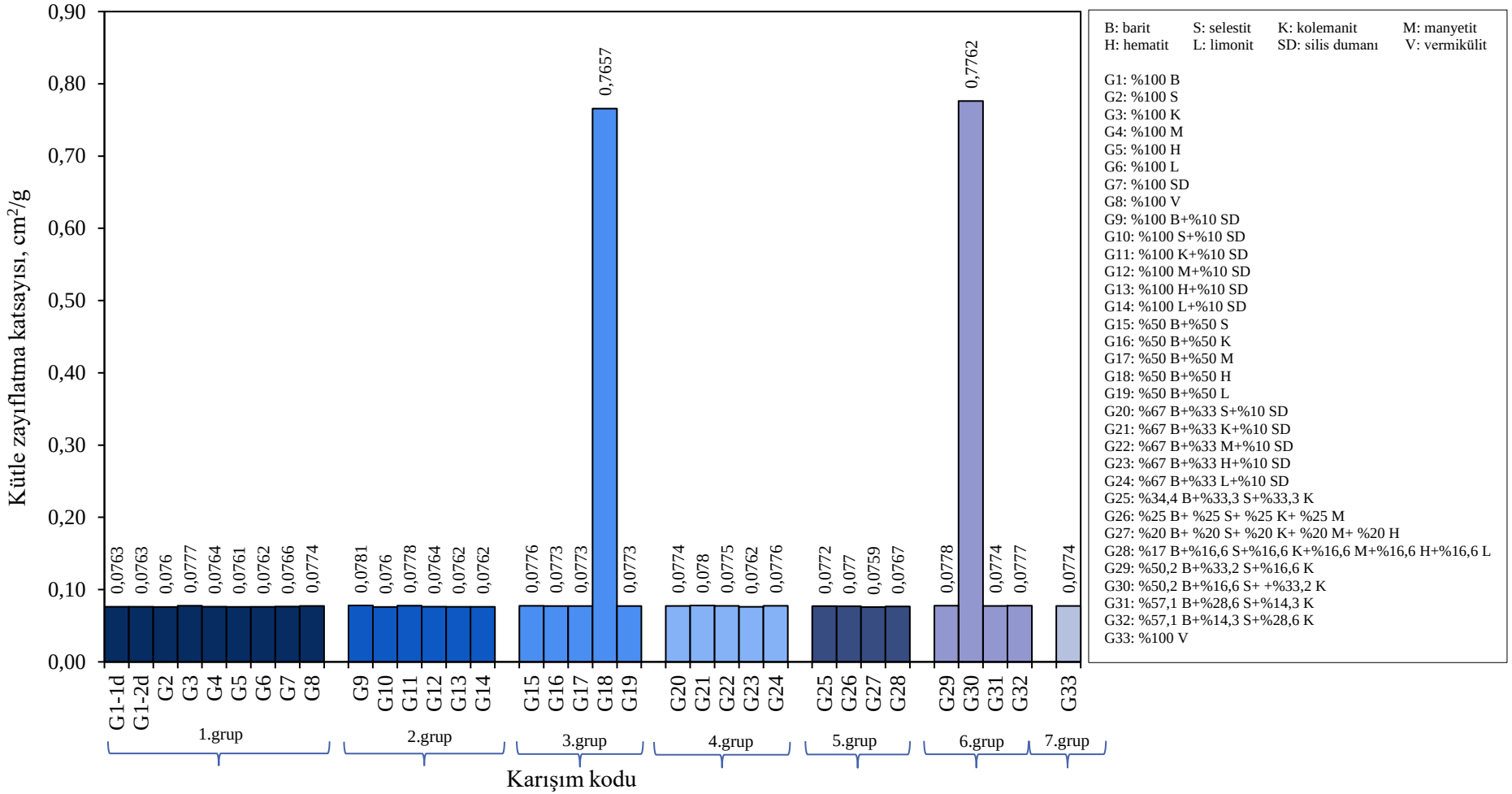
numunelerin kütle zayıflatma katsayılarında (G18 kodlu numune hariç) herhangi bir değişim gözlenmemiştir.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. Kütle zayıflatma katsayı en yüksek barit, selestit ve kolemanit (B, S ve K) tipi agrega ile üretilen G25 numunesinde 0,0772 cm^2/g, en düşük barit, selestit, kolemanit, manyetit ve hematit (B, S, K, M ve H) tipi agrega ile üretilen G27 numunesinde 0,0759 cm^2/g olarak elde edilmiştir. Numune üretiminde kullanılan barit oranının azalmasıyla beraber kütle zayıflatma katsayısının da azaldığı sonucuna ulaşılmıştır (Mutlu, 2020; Demir 2009; Biber Temircik 2015, Oto 2012).

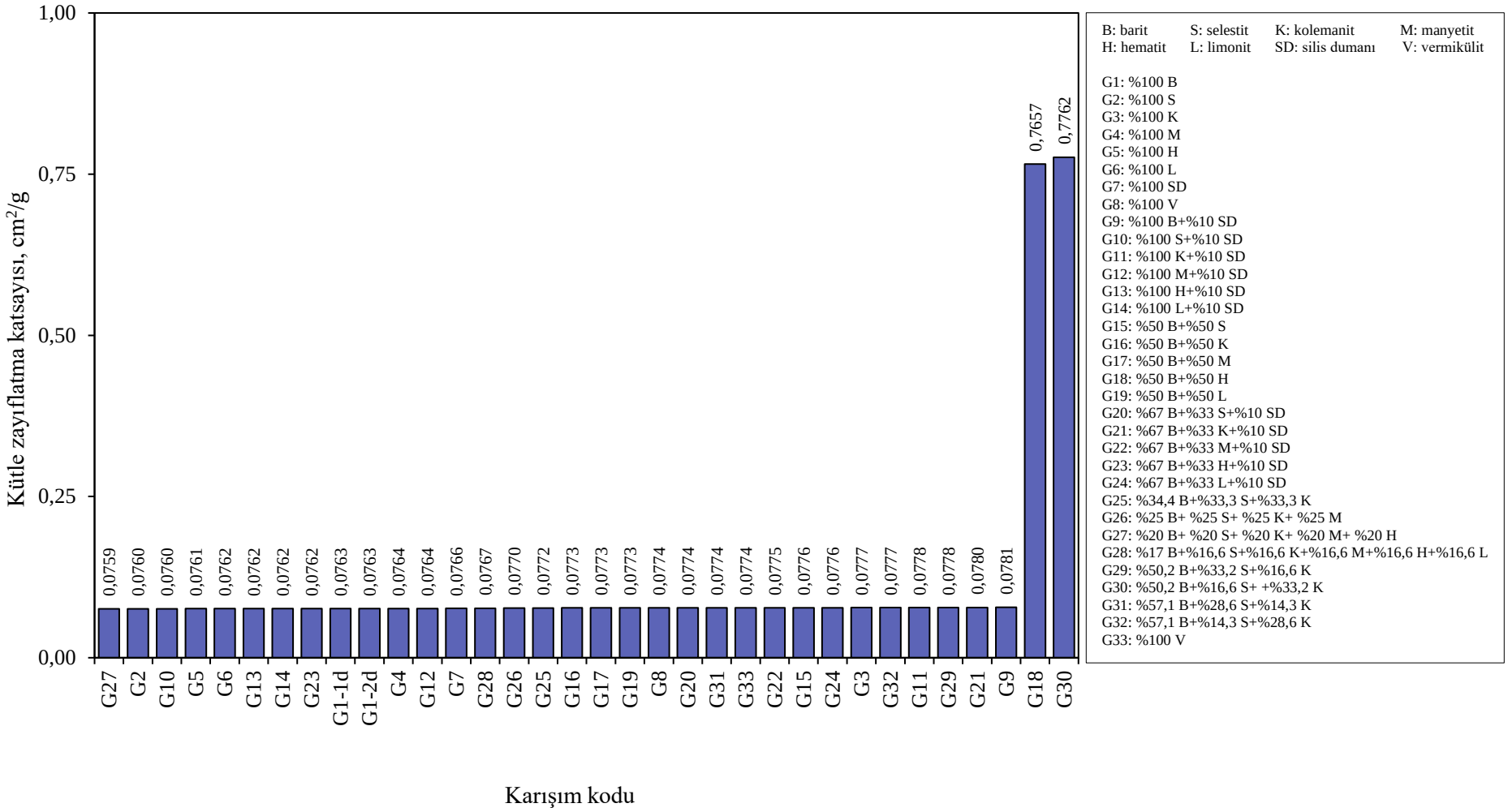
6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde kütle zayıflatma katsayı en yüksek 0,7762 cm^2/g (G30 kodlu) olarak elde edilmiştir. Üretim esnasında G30 kodlu numunede aderans (bağlanma) sorunu meydana geldiği için çimento miktarında artışa gidilmiştir. Buna karşılık en düşük katsayı ise 0,0774 cm^2/g (G31 kodlu) olarak bulunmuştur. Barit oranı yüksek olan numunelerin kütle zayıflatma katsayısı da yüksek bulunmuştur (Demir, 2009; Tüfekçi, 2017).

Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) kütle zayıflatma katsayısı 0,0774 cm^2/g olarak elde edilmiştir.

Numunelerin kütle zayıflatma katsayısı sıralı değerleri Şekil 4.38'de verilmiştir. Kütle zayıflatma katsayısı en yüksek 200 bar basınç altında barit, selestit ve kolemanit agregası ile üretilen (G30 kodlu) numunelerde 0,7762 cm^2/g olmasına rağmen, en düşük 200 bar basınç altında barit, selestit, kolemanit, manyetit ve hematit ile üretilen numunelerde (G27 kodlu) 0,0759 cm^2/g olduğu görülmektedir.



Şekil 4.37. Numunelerin 662 keV γ-ışını teorik kütle zayıflatma katsayısı değerleri



Şekil 4.38. Numunelerin 662 keV γ-ışını teorik kütle zayıflatma katsayısı sıralı değerleri

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin 662 keV Gama-ışını teorik lineer zayıflatma katsayısı değerleri Şekil 4.39'da verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. Teorik lineer zayıflatma katsayı en yüksek barit (B) tipi agrega ile üretilen G1-2d numunesinde 0,2426 cm^{-1} ve en düşük vermikülit (V) tipi agrega ile üretilen G8 numunesinde 0,0712 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. Barit (B) agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numuneler farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin lineer zayıflatma katsayı 0,2426 cm^{-1}, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ki ise 0,2373 cm^{-1} olduğu tespit edilmiştir. Sıkıştırma basıncının yüksek olduğu karışımlarda boşluk oranının düşmesine bağlı olarak birim hacim ağırlık değerleri daha yüksek değerler aldığı görülmüştür. Buna bağlı olarak lineer zayıflatma katsayısının artmıştır (Mutlu, 2020; Demir 2009).

2.grupta G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek lineer zayıflatma katsayı barit (B) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G9 kodlu) numunesinde 0,2420 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük lineer zayıflatma katsayı ise kolemanit (K) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G11 kodlu) 0,0685 cm^{-1} olarak bulunmuştur.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11-G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, hematit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin lineer zayıflatma katsayı değerinde sırasıyla %1, %3 ve %4 artışlar elde edilmiştir. Buna karşılık selestit ve kolemanit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerde ise %2 ve %53 azalma tespit edilmiştir.

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde lineer zayıflatma katsayı en yüksek barit ve hematit (B ve H) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G18 kodlu) 2,3389 cm^{-1}, en düşük barit ve kolemanit (B ve K) tipi agrega ile üretilen numunelerde (G16 kodlu) 0,1947 cm^{-1} olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. Lineer zayıflatma katsayı en yüksek barit ve selestit (B ve S) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G20 numunesinde 0,2423 cm^{-1}, en düşük barit ve kolemanit (B ve

K) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G21 numunesinde 0,2176 cm^{-1} olarak elde edilmiştir.

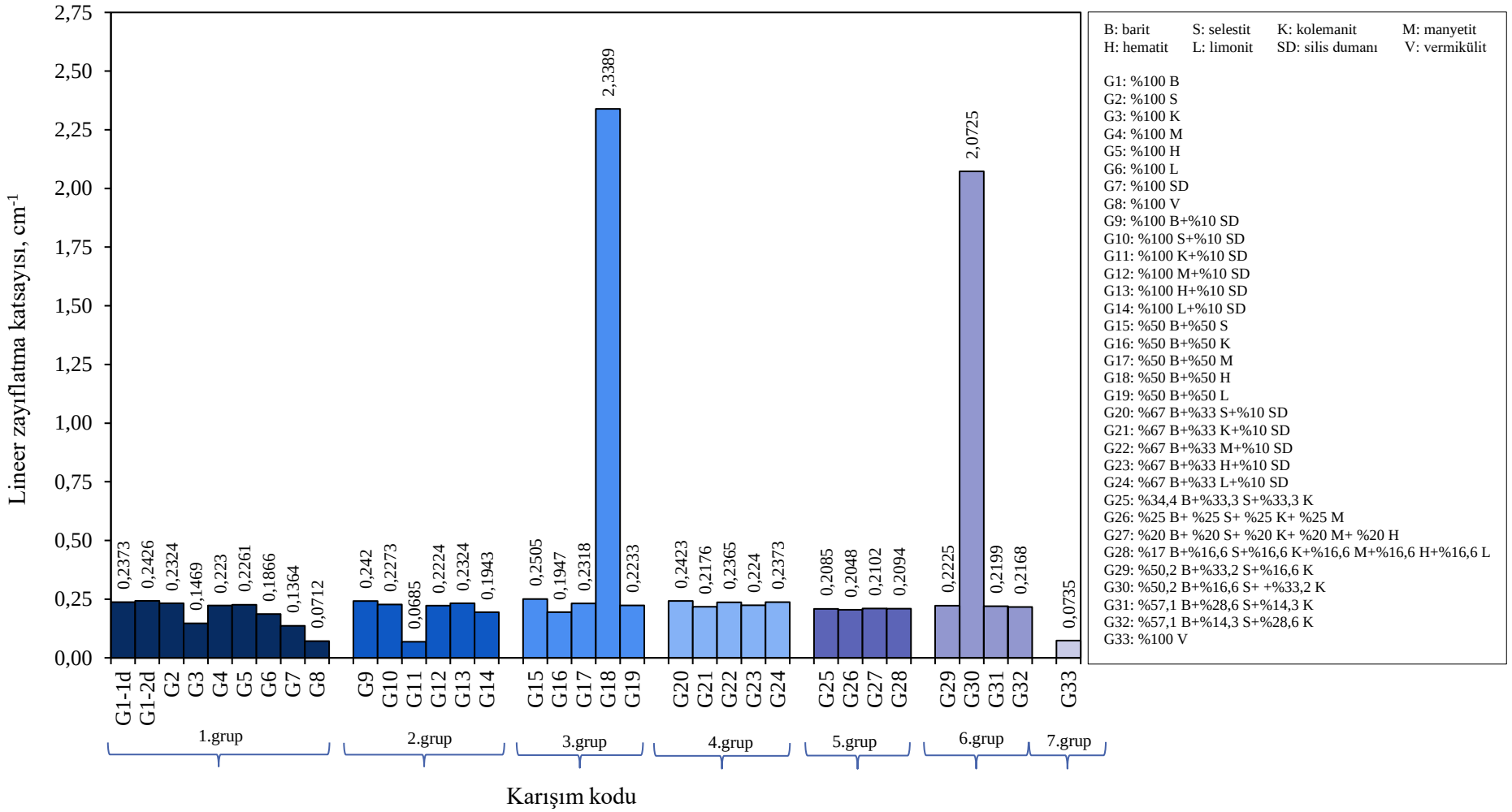
4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit ve hematit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin lineer zayıflatma katsayı sırasıyla %3 ve %90 azalmaya sebep olmuştur. Buna karşın kolemanit, manyetit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerde ise %12, %2 ve %6 artışa neden olduğu görülmektedir.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. Lineer zayıflatma katsayı en yüksek barit, selestit, kolemanit, manyetit ve hematit (B, S, K, M ve H) tipi agrega ile üretilen G27 numunesinde 0,2102 cm^{-1}, en düşük barit, selestit, kolemanit ve manyetit (B, S, K ve M) tipi agrega ile üretilen G26 numunesinde 0,2048 cm^{-1} olarak elde edilmiştir.

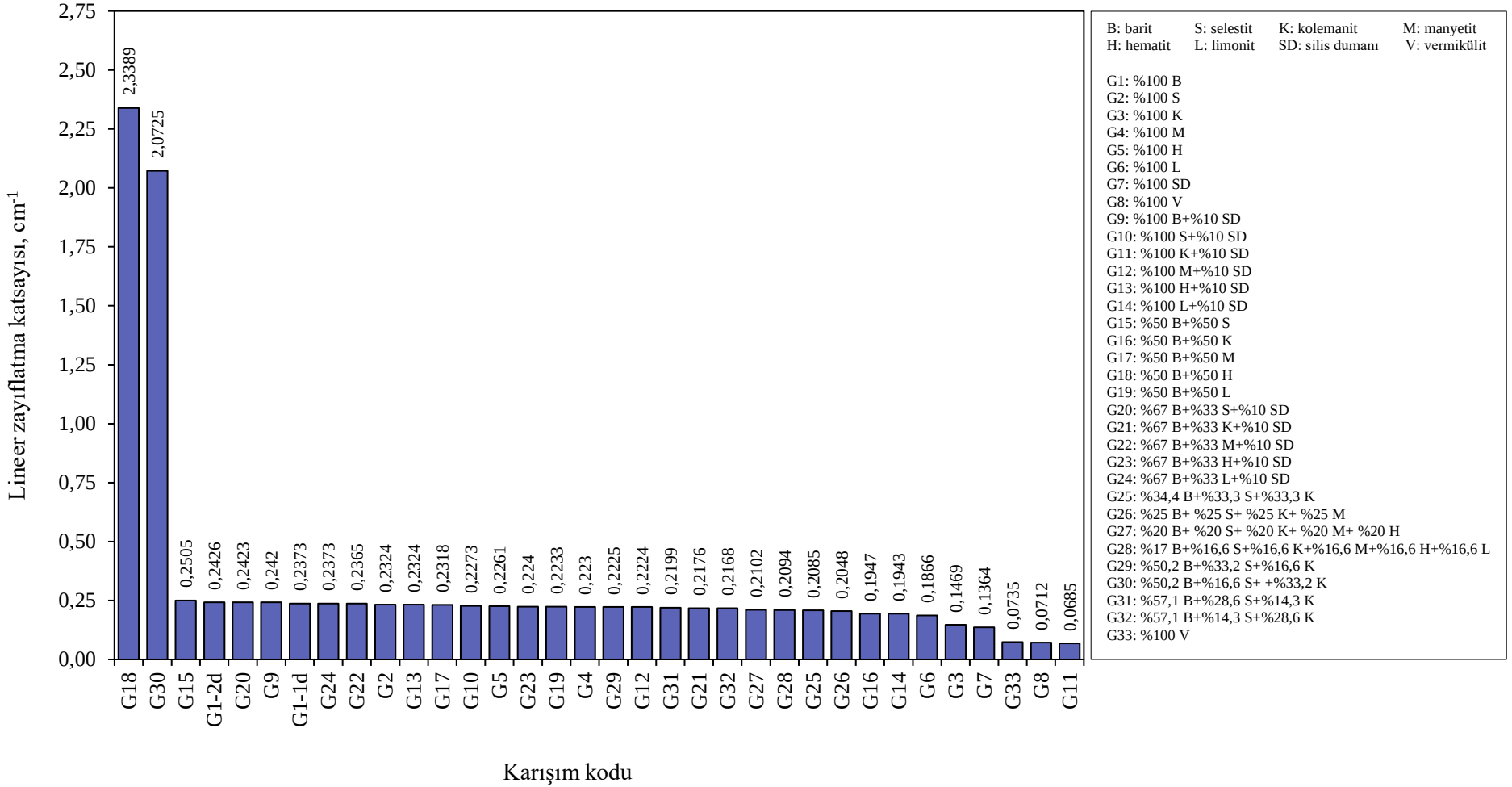
6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde lineer zayıflatma katsayı en yüksek 2,0725 cm^{-1} (G30 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük katsayı ise 0,2168 cm^{-1} (G32 kodlu) olarak bulunmuştur. Barit oranı yüksek olan numunelerin lineer zayıflatma katsayısı da yüksek bulunmuştur (Demir, 2009; Tüfekçi, 2017).

Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) lineer zayıflatma katsayısı 0,0735 cm^{-1} olarak elde edilmiştir.

Numunelerin lineer zayıflatma katsayısı sıralı değerleri Şekil 4.40'da verilmiştir. Lineer zayıflatma katsayı en yüksek 200 bar basınç altında barit ve hematit ile üretilen (G18 kodlu) numunelerde 2,3389 cm^{-1} olarak tespit edilmiştir.



Şekil 4.39. Numunelerin 662 keV γ-ışını teorik lineer zayıflatma katsayısı değerleri



Şekil 4.40. Numunelerin 662 keV γ-ışını teorik lineer zayıflatma katsayısı sıralı değerleri

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin 662 keV Gama-ışını deneysel kütle zayıflatma katsayısı değerleri Şekil 4.41'de verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. Deneysel kütle zayıflatma katsayı en yüksek vermikülit (V) tipi agrega ile üretilen numunesinde (G8 kodlu) 0,1260 cm^2/g ve en düşük barit (B) tipi agrega ile üretilen G1-2d numunesinde 0,0664 cm^2/g olarak elde edilmiştir. Barit (B) agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numuneler farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin kütle zayıflatma katsayı 0,0664 cm^2/g, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ki ise 0,0721 cm^2/g olduğu tespit edilmiştir. Mutlu (2020) yaptığı çalışmada barit, manyetit, hematit ve limonit agregası ile herhangi bir sıkıştırma uygulamadan ürettiği numunelerin kütle zayıflatma katsayı değerlerini daha düşük bulmuştur (Mutlu, 2020).

2.grupta G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek kütle zayıflatma katsayı kolemanit (K) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G11 kodlu) numunesinde 0,1500 cm^2/g olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük kütle zayıflatma katsayı ise selestit (S) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G10 kodlu) 0,0713 cm^2/g olarak bulunmuştur.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11-G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Selestit, manyetit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin kütle zayıflatma katsayı değerinde sırasıyla %2, %1 ve %1 azalmalar gözlemlenmiştir. Buna karşılık barit, kolemanit ve hematit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin kütle zayıflatma katsayı değerinde sırasıyla%9, %93 ve %4 artışlar meydana gelmiştir.

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde kütle zayıflatma katsayı en yüksek barit ve kolemanit (B ve K) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G16 kodlu) 0,0776 cm^2/g, en düşük barit ve selestit (B ve S) tipi agrega ile üretilen G15 numunesinde 0,06896 cm^2/g olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. Kütle zayıflatma katsayı en yüksek barit ve hematit (B ve H) tipi agrega ve %10 silis dumanı

ilave edilerek üretilen G23 numunesinde 0,0745 cm^2/g, en düşük barit ve manyetit (B ve M) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G22 numunesinde 0,0707 cm^2/g olarak elde edilmiştir.

4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, hematit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin kütle zayıflatma katsayı sırasıyla %5, %3 ve %2 oranında artışa sebep olmuştur. Barit, kolemanit ve manyetit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G16 kodlu numunesinde ise kütle zayıflatma katsayısının %5 ve %4 azaldığı görülmektedir.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. Kütle zayıflatma katsayı en yüksek barit, selestit ve kolemanit (B, S ve K) tipi agrega ile üretilen G25 numunesinde 0,0718 cm^2/g, en düşük barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit ve limonit (B, S, K, M, H ve L) tipi agrega ile üretilen G28 numunesinde 0,0729 cm^2/g olarak elde edilmiştir. Numune üretiminde kullanılan barit oranının azalmasıyla beraber kütle zayıflatma katsayısının da azaldığı sonucuna ulaşılmıştır (Mutlu, 2020; Demir 2009; Biber Temircik 2015, Oto 2012).

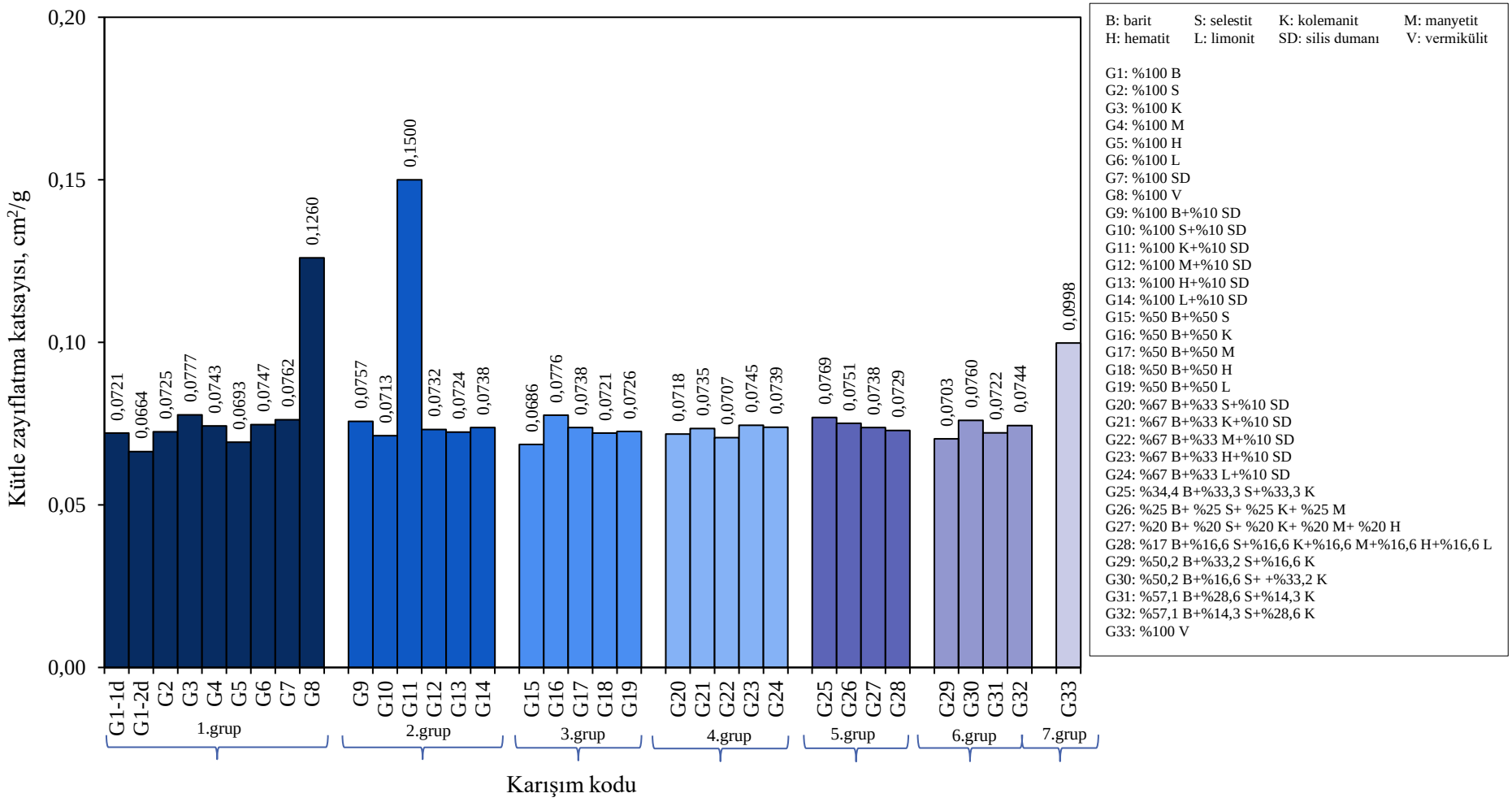
6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde kütle zayıflatma katsayı en yüksek 0,0760 cm^2/g (G30 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük katsayı ise 0,0703 cm^2/g (G29 kodlu) olarak bulunmuştur. Barit oranı yüksek olan numunelerin kütle zayıflatma katsayısı da yüksek bulunmuştur (Demir, 2009; Tüfekçi, 2017).

Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) kütle zayıflatma katsayısı 0,0,0998 cm^2/g olarak elde edilmiştir.

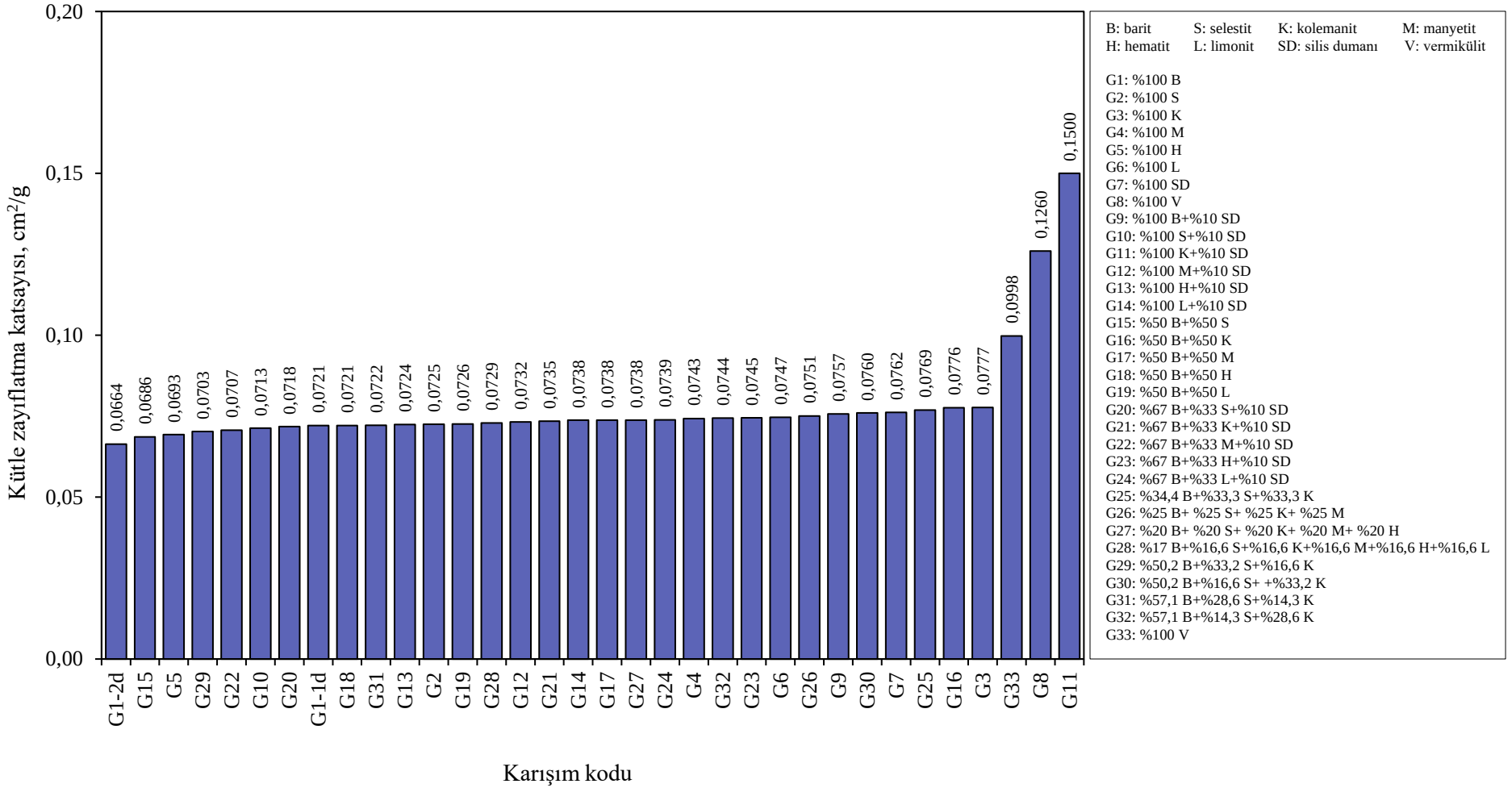
Numunelerin kütle zayıflatma katsayısı sıralı değerleri Şekil 4.2'de verilmiştir. Kütle zayıflatma katsayısı en düşük 200 bar basınç altında barit agregası ile üretilen (G1-2d kodlu) numunelerde 0,0664 cm^2/g olmasına rağmen, en yüksek 100 bar basınç altında silis dumanı ile üretilen numunelerde (G11 kodlu) 0,1500 cm^2/g olduğu görülmektedir. Akkurt ve ark. (2004), 1 keV–300 meV γ-ışınları enerjilerde barit için kütle zayıflatma

katsayılarını hesaplamışlardır. Toplam kütle zayıflatma katsayısı için en iyi değerleri barit sağladığını ifade etmişlerdir. Kütle zayıflatma katsayısı enerjinin dalga boyu ve artan atom numarası (Barit, Z=82) ile yakından ilişkilidir. Dalga boyu büyüdükçe enerji azalacağı için delip geçme gücü azalır, atom numarası arttıkça durdurma gücü artacağından kütle zayıflatma katsayısında artış görülmektedir.

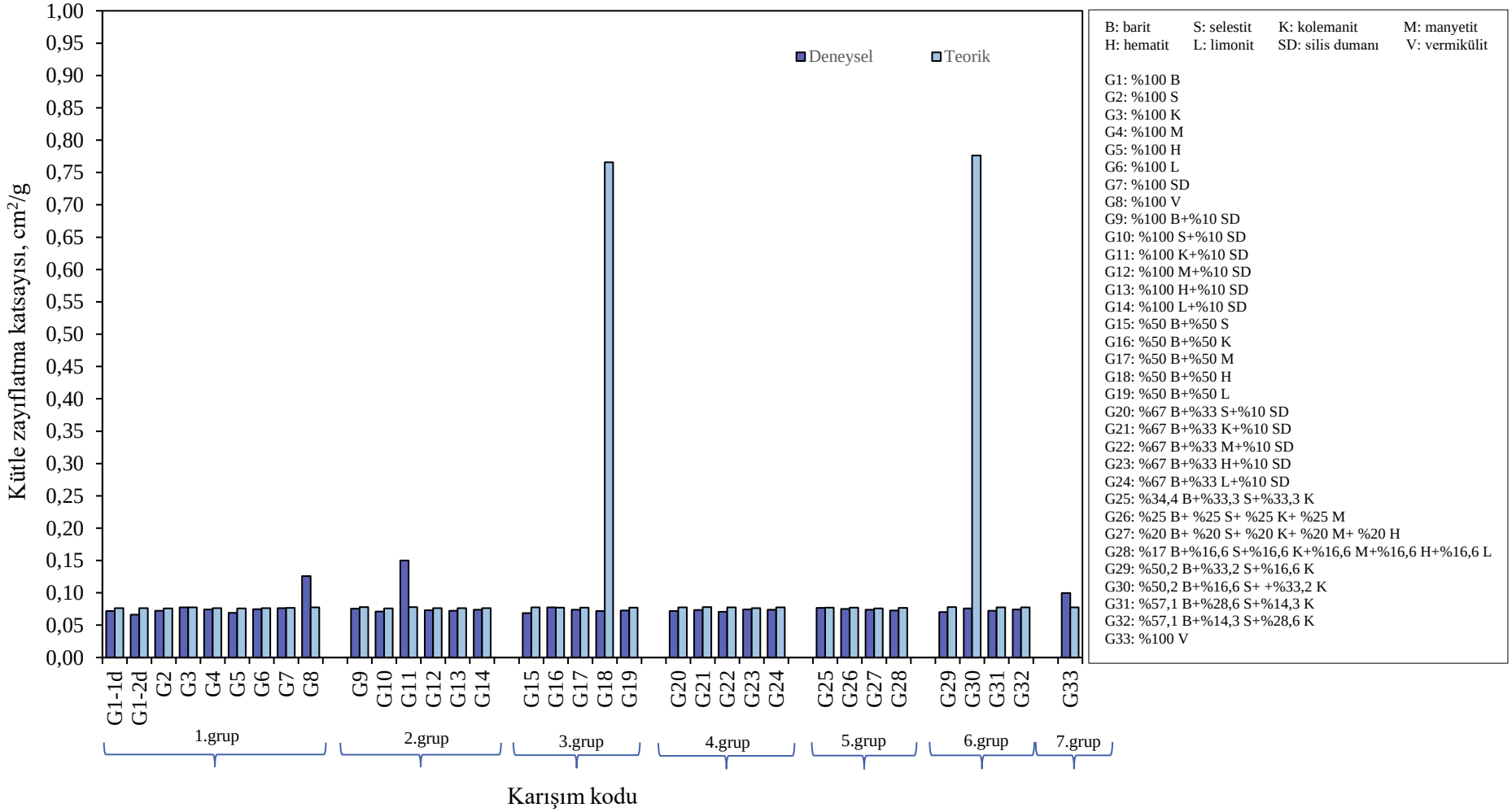
662 keV X-ışını deneysel ve XCOM programı ile teorik olarak elde edilen kütle zayıflatma katsayı arasındaki fark Şekil 4.43'te verilmiştir. Deneysel ve teorik kütle zayıflatma katsayıları literatürde diğer çalışmalarla yakın sonuçlar elde edilmiştir. Genel olarak deneysel kütle zayıflatma katsayısı 662 keV enerji değerinde teorik olarak hesaplanan değerden fazla bulunmuştur. Literatürde yapılan benzer çalışmalarda olduğu gibi kütle zayıflatma katsayısı arasındaki bağıl farkın deney düzeneği, ölçüm hataları gibi değişkenlere bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir.



Şekil 4.41. Numunelerin 662 keV γ-ışını deneysel kütle zayıflatma katsayısı değerleri



Şekil 4.42. Numunelerin 662 keV γ-ışını deneysel kütle zayıflatma katsayısı sıralı değerleri



Şekil 4.43. Numunelerin 662 keV γ-ışını deneysel ve teorik kütle zayıflatma katsayı farkı

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin 662 keV γ-ışını deneysel lineer zayıflatma katsayısı değerleri Şekil 4.44'te verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. Deneysel lineer zayıflatma katsayı en yüksek barit (B) tipi agrega ile üretilen G1-1d numunesinde 0,2242 cm^{-1} ve en düşük vermikülit (V) tipi agrega ile üretilen G8 numunesinde 0,1159 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. Barit (B) agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numuneler farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin lineer zayıflatma katsayı 1,0211 cm^{-1}, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ki ise 0,2242 cm^{-1} olduğu tespit edilmiştir. Barit agregasının yoğunluğunun yüksek olması X-ışını radyasyon tutuculuğunda zırhlama olarak kullanılması açısından büyük avantaj olduğu görülmektedir. Akkurt ve ark. (2005), farklı oranlarda barit agregası kullanarak üretilen betonların γ ışınları zırh malzemesi olarak kullanılması için lineer soğurma katsayılarının betonun özgül ağırlıkları ile doğru orantılı olarak arttığını tespit etmişlerdir. Akkurt ve ark. (2004), 1 keV–300 meV γ-ışınları enerjilerde barit için lineer zayıflatma katsayılarını hesaplayarak en iyi lineer zayıflatma katsayı değerlerin baritin sağladığını ifade etmişlerdir.

2.grupta G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek lineer zayıflatma katsayı barit (B) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G9 kodlu) numunesinde 0,2347 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük lineer zayıflatma katsayı ise kolemanit (K) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G11 kodlu) 0,1320 cm^{-1} olarak bulunmuştur. Sevinç (2011) tarafından radyasyon zırhlaması için yapılan çalışmada lineer soğurma katsayısı en yüksek barit katkılı harçlarda, en düşük ise kolemanit katkılı harçlarda olduğu sonucuna varılmıştır.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11-G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Selestit, kolemanit ve manyetit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin lineer zayıflatma katsayı değerinde sırasıyla %4, %10 ve %2 arasında azalmalar elde edilmiştir. Buna karşılık barit, hematit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerde ise %8, %7 ve %3 artışlar tespit edilmiştir.

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde lineer zayıflatma katsayı en yüksek barit ve selestit (B ve S) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G15 kodlu) 0,2216 cm^{-1}, en düşük barit ve hematit (B ve H) tipi agrega ile üretilen numunelerde (G16 kodlu) 0,1955 cm^{-1} olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. Lineer zayıflatma katsayı en yüksek barit ve limonit (B ve L) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G24 numunesinde 0,2262 cm^{-1}, en düşük barit ve kolemanit (B ve K) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G21 numunesinde 0,2052 cm^{-1} olarak elde edilmiştir.

4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, kolemanit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin lineer zayıflatma katsayı sırasıyla %1, %5 ve %8 oranında artışa sebep olmuştur. Buna karşılık barit, manyetit ve hematit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin lineer zayıflatma katsayı ise sırasıyla %3 ve %1 azalttığı görülmektedir.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. Lineer zayıflatma katsayı en yüksek barit, selestit ve kolemanit (B, S ve K) tipi agrega ile üretilen G25 numunesinde 1,2077 cm^{-1}, en düşük barit, selestit, kolemanit ve manyetit (B, S, K, M, H ve L) tipi agrega ile üretilen G28 numunesinde 0,1991 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. Numune üretiminde kullanılan barit oranının azalmasıyla beraber lineer zayıflatma katsayısının da azaldığı sonucuna ulaşılmıştır (Mutlu, 2020; Demir 2009; Biber Temircik 2015, Oto 2012).

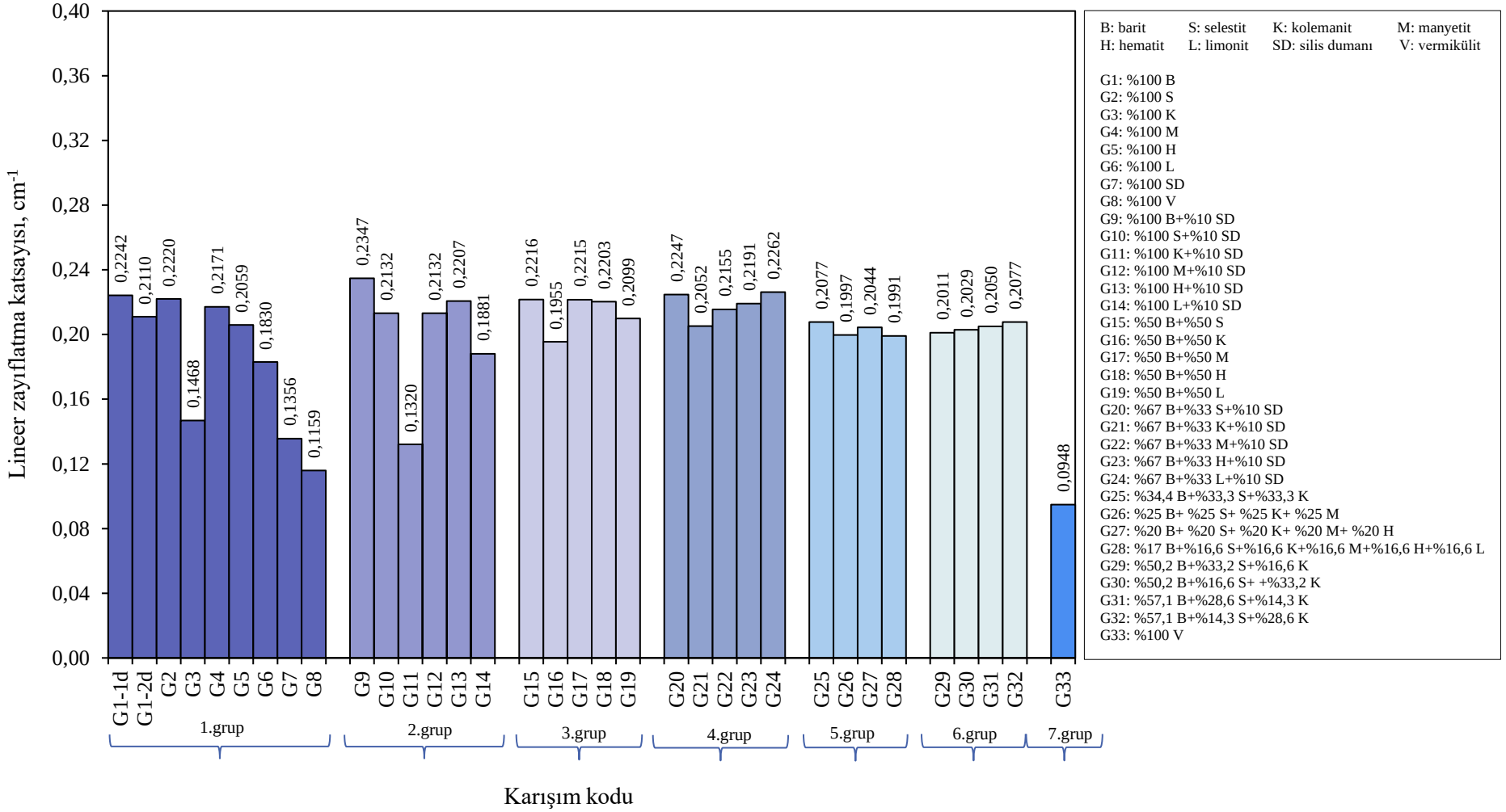
6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde lineer zayıflatma katsayı en yüksek 0,2077 cm^{-1} (G32 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük katsayı ise 0,2011 cm^{-1} (G29 kodlu) olarak bulunmuştur. Barit oranı yüksek olan numunelerin lineer zayıflatma katsayısı da yüksek bulunmuştur (Demir, 2009; Tüfekçi, 2017).

Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) lineer zayıflatma katsayısı 0,0948 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. Buna karşılık aynı karışıma sahip sıkıştırılarak üretilen numunenin (1.grup G8

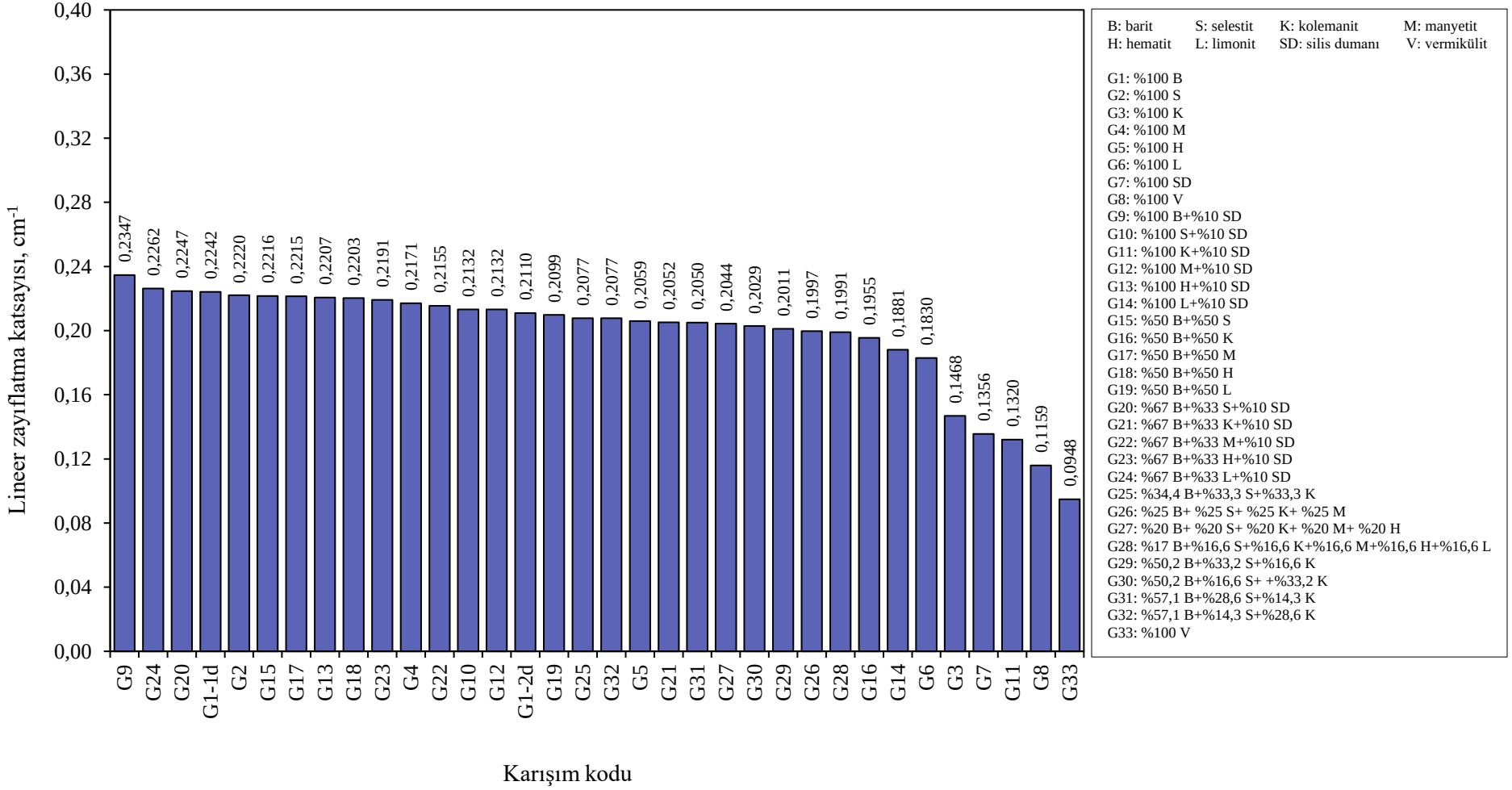
kodlu) lineer zayıflatma katsayısı ise 0,1159 cm^{-1} belirlenmiştir. Basınç altında sıkıştırılarak üretilen vermikülit agregalı numunelerin elle sıkıştırılanlara kıyasla birim hacim ağırlığında ve buna bağlı olarak da lineer zayıflatma katsayısında %22 artış gözlemlenmiştir. Mutlu (2020) vermikülit tipi agrega ile kompozit harçlar üreterek numunelerin lineer zayıflatma katsayısını 0,053 cm^{-1} olarak tespit etmiştir. Sıkıştırma faktörünün lineer zayıflatma katsayısı arttırdığı açık bir şekilde görülmektedir.

Numunelerin lineer zayıflatma katsayısı sıralı değerleri Şekil 4.45'te verilmiştir. Lineer zayıflatma katsayı en yüksek 210 bar basınç altında barit ve %10 silis dumanı ile üretilen (G9 kodlu) numunelerde 0,2347 cm^{-1} olmasına rağmen, sadece vermikülit agregası ile üretilen harçlarda (G33 kodlu) 0,0948 cm^{-1} olarak tespit edilmiştir. Kılınçarslan vd. (2006) çalışmasında, barit ve normal agrega kullanarak betonlar üreterek radyasyon azaltma katsayılarını bulmuştur. Normal agrega yerine barit kullanılması ve barit oranının artması ile lineer azaltma katsayısında da artışlar elde etmiştir. Demir (2009) barit agregalı betonların daha soğurgan olduklarını açıkta ifade etmiştir. Atom numarası (barit, Z=56) yüksek olan malzemelerin lineer zayıflatma katsayılarının da yüksek olduğu açık bir şekilde görülmektedir.

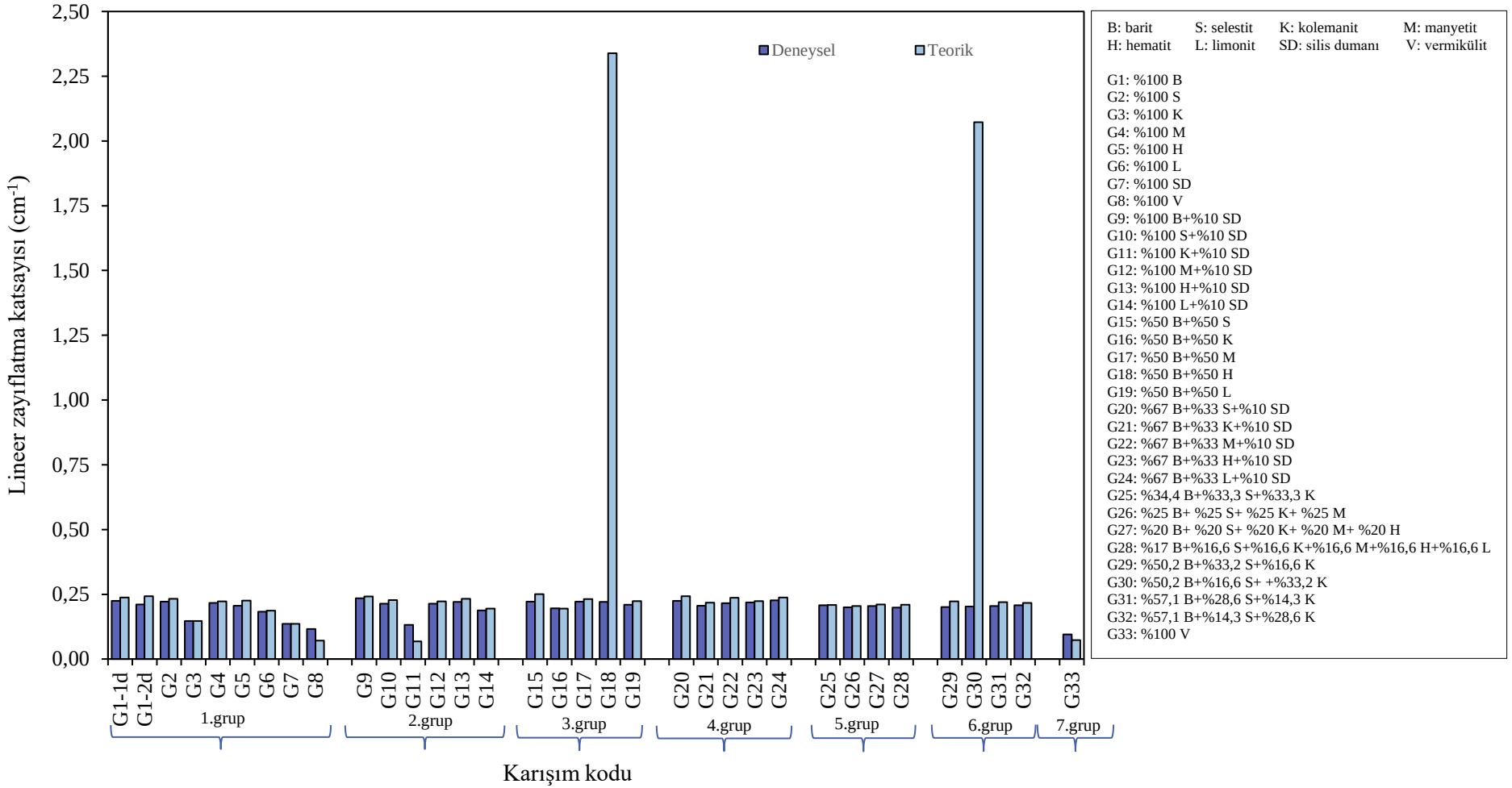
662 keV γ-ışını deneysel ve XCOM programı ile teorik olarak elde edilen lineer zayıflatma katsayı arasındaki fark Şekil 4.46'da verilmiştir. Deneysel ve teorik lineer zayıflatma katsayıları (G18 ve G30 kodlu numuneler hariç) birbirine yakın değerlerde olup literatürde diğer çalışmalarla yakın sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 4.44. Numunelerin 662 keV γ-ışını deneysel lineer zayıflatma katsayısı değerleri



Şekil 4.45. Numunelerin 662 keV γ-ışını deneysel lineer zayıflatma katsayısı sıralı değerleri



Şekil 4.46. Numunelerin 662 keV γ-ışını deneysel ve teorik lineer zayıflatma katsayı farkı

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin 662 keV γ-ışını yarı kalınlık değerleri (Half Value Layer-HVL) Şekil 4.47'de verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. Yarı kalınlık değeri en yüksek vermikülit (V) tipi agrega ile üretilen G8 numunesinde 5,96 cm ve en düşük barit (B) tipi agrega ile üretilen G1 numunesinde 3,08 cm olarak elde edilmiştir. Barit (B) agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numuneler farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin yarı kalınlık değeri 3,27 cm, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ki ise 3,08 cm olduğu tespit edilmiştir.

2.grupta G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek yarı kalınlık değeri kolemanit (K) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G11 kodlu) numunesinde 5,23 cm olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük yarı kalınlık değeri ise barit (B) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G9 kodlu) 2,94 cm olarak bulunmuştur.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, hematit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin yarı kalınlık değeri sırasıyla %7, %7 ve %3 azaldığı tespit edilmiştir. Buna karşın selestit, kolemanit ve manyetit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numuneler de ise %4, %11 ve %2 oranında artışa sebep olmuştur.

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek yarı kalınlık değeri en yüksek barit ve kolemanit (B ve K) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G21 kodlu) 3,37 cm, en düşük barit ve manyetit (B ve M) tipi agrega ile üretilen numunelerde (G17 kodlu) 3,13 cm olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. Yarı kalınlık değeri en yüksek barit ve kolemanit (B ve K) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G21 numunesinde 3,37 cm, en düşük barit ve hematit (B ve H) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G24 numunesinde 3,05 cm olarak elde edilmiştir.

4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, kolemanit manyetit, hematit, limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin yarı kalınlık değeri sırasıyla %2, %5, %3, %4 ve %7 oranında azalmaya sebep olmuştur.

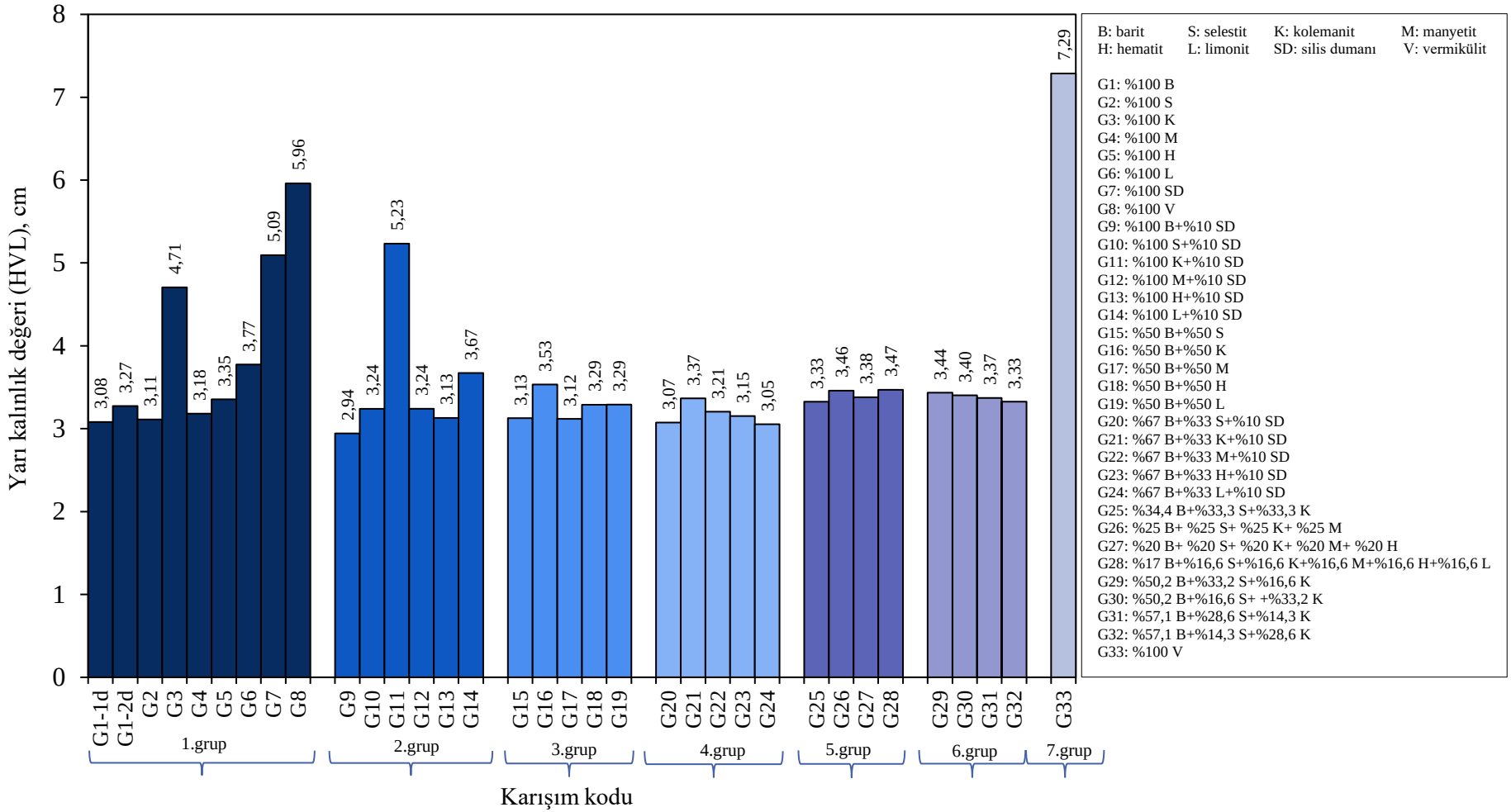
5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. Yarı kalınlık değeri en yüksek barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit ve limonit (B, S, K, M, H ve L) tipi agrega ile üretilen G28 numunesinde 3,47 cm, en düşük barit, selestit ve kolemanit (B, S ve K) tipi agrega ile üretilen G25 numunesinde 3,33 cm olarak elde edilmiştir.

6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde yarı kalınlık değeri en yüksek 3,44 cm (G29 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük katsayı ise 3,33 cm (G32 kodlu) olarak bulunmuştur. Barit oranı yüksek olan numunelerin yarı kalınlık değeri de düşük bulunmuştur.

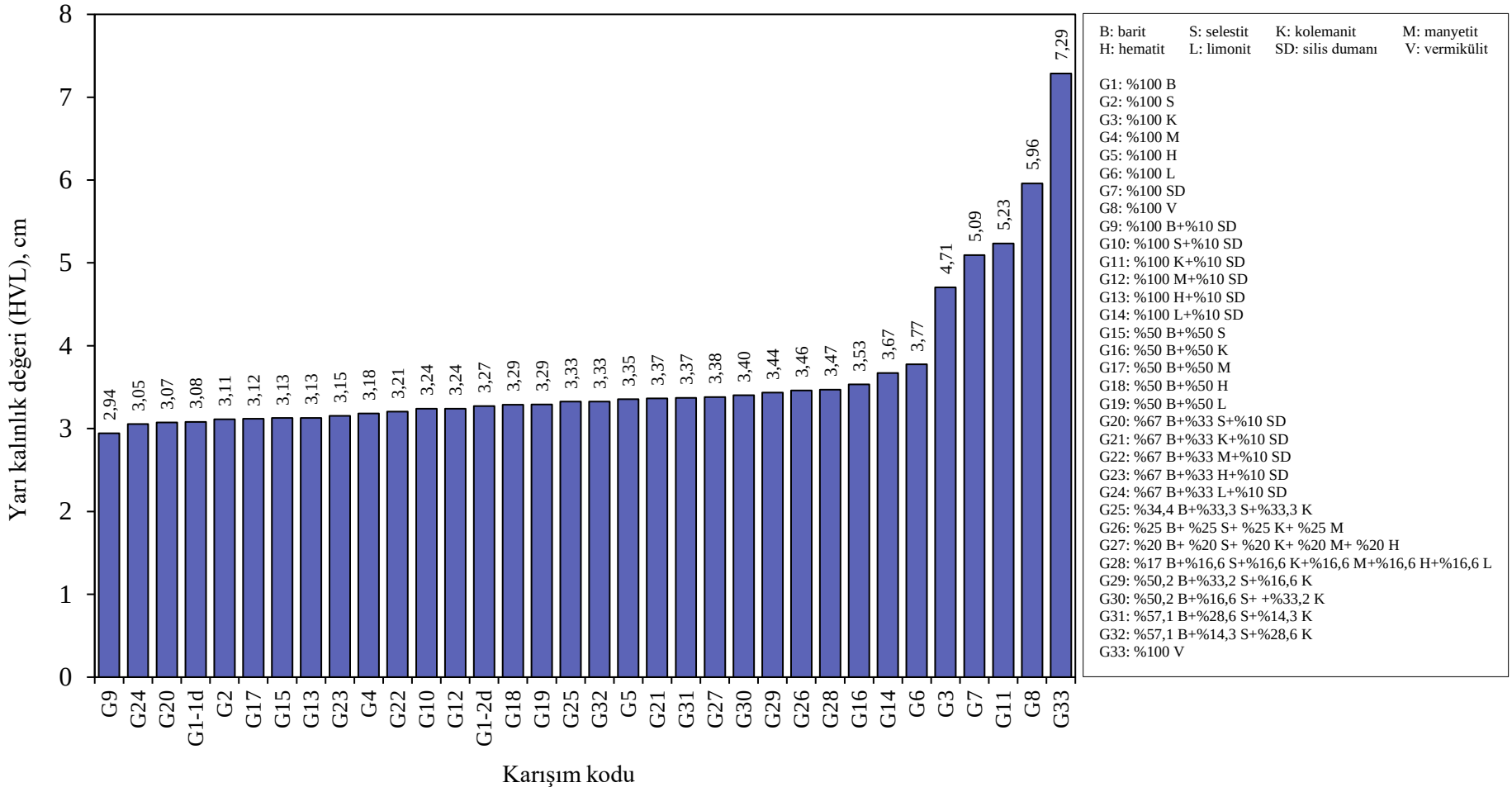
Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) yarı kalınlık değeri 7,29 cm olarak elde edilmiştir. Buna karşılık aynı karışıma sahip sıkıştırılarak üretilen numunenin (1.grup G8 kodlu) yarı kalınlık değeri ise 5,96 cm belirlenmiştir. Sıkıştırma faktörü üretilen numunenin yarı kalınlık değerini %22 arttırmış.

Radyasyon şiddetini yarı değerine düşüren zırhlama malzemesine özgü kalınlığı (HVL) zırhlama kılavuzunda maksimum tüp gerilim 150 Kv X ışınları kurşun ve beton için sırasıyla 0,30 mm ve 2,24 cm olarak belirtilmiştir. Numunelerin Şekil 4.48'de yarı kalınlık sıralı değerleri verilmiştir. HVL değeri en düşük 210 bar basınç altında barit ve %10 silis dumanı ile üretilen (G9 kodlu) numunelerde 2,94 cm olarak tespit edilmiştir. Bu karşılık en yüksek yarı kalınlık değeri (HVL) ise elle sıkıştırılarak vermikülit ile üretilen G33 kodlu numunelerde 7,29 cm olarak bulunmuştur.

Akkurt ve ark. (2010b) ve Akkurt, vd., (2010c) yaptıkları çalışmada 662 keV Gama enerjisi HVL (yarı kalınlık) özelliklerini incelemişlerdir. Barit oranının artmasıyla zayıflatma kabiliyetinin arttığı ve baritin gama soğurucu olduğu sonucuna varmışlardır.



Şekil 4.47. Numunelerin 662 keV γ-ışını yarın kalınlık değeri (HVL)



Şekil 4.48. Numunelerin 662 keV γ-ışını yarı kalınlık sıralı değeri (HVL)

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin 662 keV γ-ışını yüzde bir kalınlık değeri (Tent Value Layer-2TVL) Şekil 4.49'da verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. 2TVL kalınlık değeri en yüksek vermikülit (V) tipi agrega ile üretilen G8 numunesinde 39,73 cm ve en düşük barit (B) tipi agrega ile üretilen G1 numunesinde 20,54 cm olarak elde edilmiştir. Barit (B) agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numuneler farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin yüzde bir kalınlık değeri 21,83 cm, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ki ise 20,54 cm olduğu tespit edilmiştir.

2.grupta G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek 2TVL kalınlık değeri kolemanit (K) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G11 kodlu) numunesinde 34,89 cm olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük yarı kalınlık değeri ise barit (B) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G9 kodlu) 19,62 cm olarak bulunmuştur.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, hematit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin 2TVL kalınlık değeri sırasıyla %7, %7 ve %3 azaldığı tespit edilmiştir. Buna karşın selestit, kolemanit ve manyetit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numuneler de ise %4, %11 ve %2 oranında artışa sebep olmuştur.

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek 2TVL kalınlık değeri en yüksek barit ve kolemanit (B ve K) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G16 kodlu) 23,56 cm, en düşük barit ve selestit (B ve S) tipi agrega ile üretilen numunelerde (G15 kodlu) 20,85 cm olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. 2TVL kalınlık değeri en yüksek barit ve kolemanit (B ve K) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G21 numunesinde 22,44 cm, en düşük barit ve limonit (B ve L) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G24 numunesinde 2,36 cm olarak elde edilmiştir.

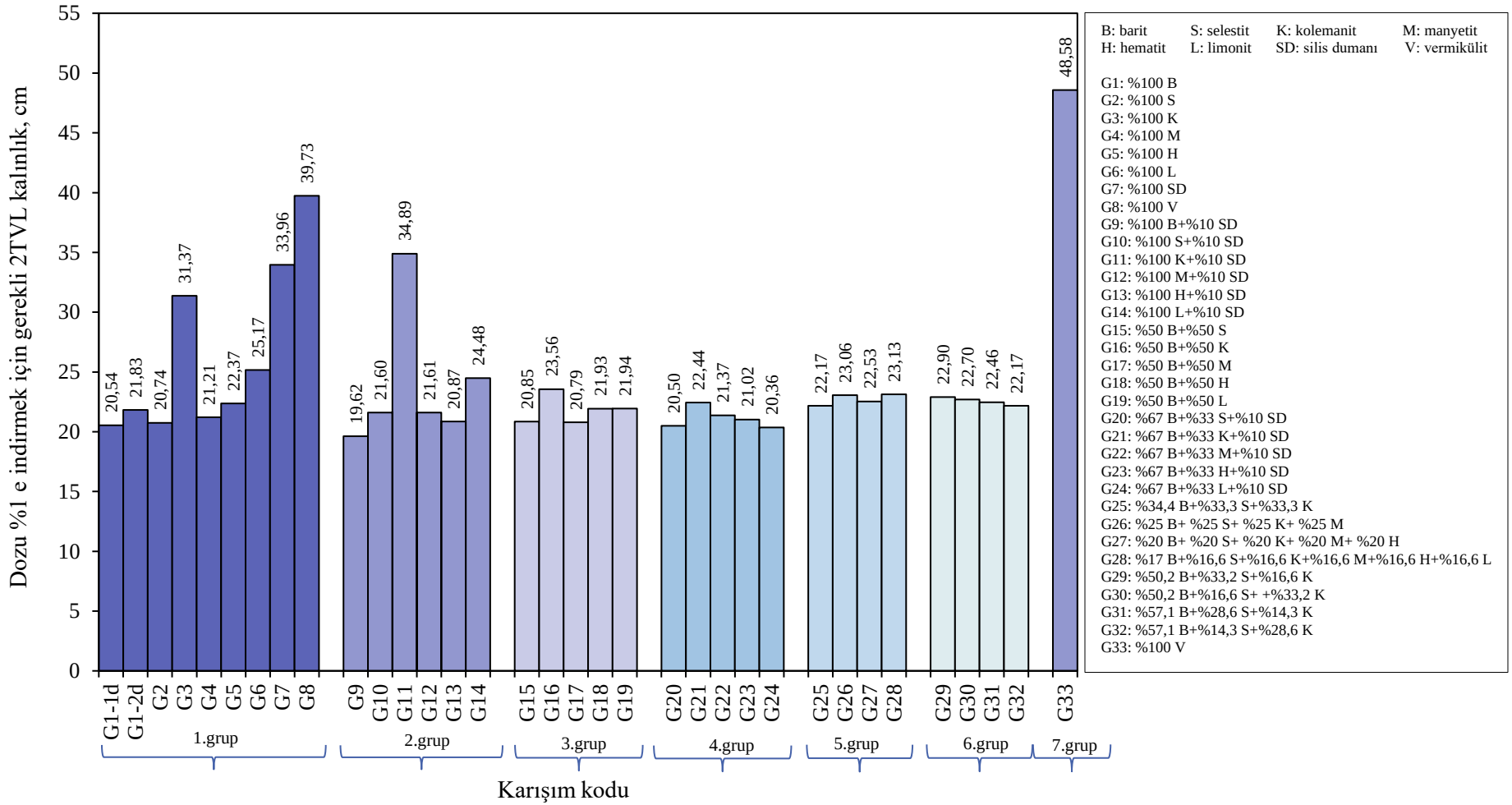
4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, kolemanit, hematit, limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin 2TVL kalınlık değeri sırasıyla %2, %5, %4 ve %7 oranında azalmaya olurken, manyetit kullanılan numunelerde ise %3 artışa sebep olmuştur.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. 2TVL kalınlık değeri en yüksek barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit ve limonit (B, S, K, M, H ve L) tipi agrega ile üretilen G28 numunesinde 23,13 cm, en düşük barit, selestit ve kolemanit (B, S ve K) tipi agrega ile üretilen G25 numunesinde 22,17 cm olarak elde edilmiştir.

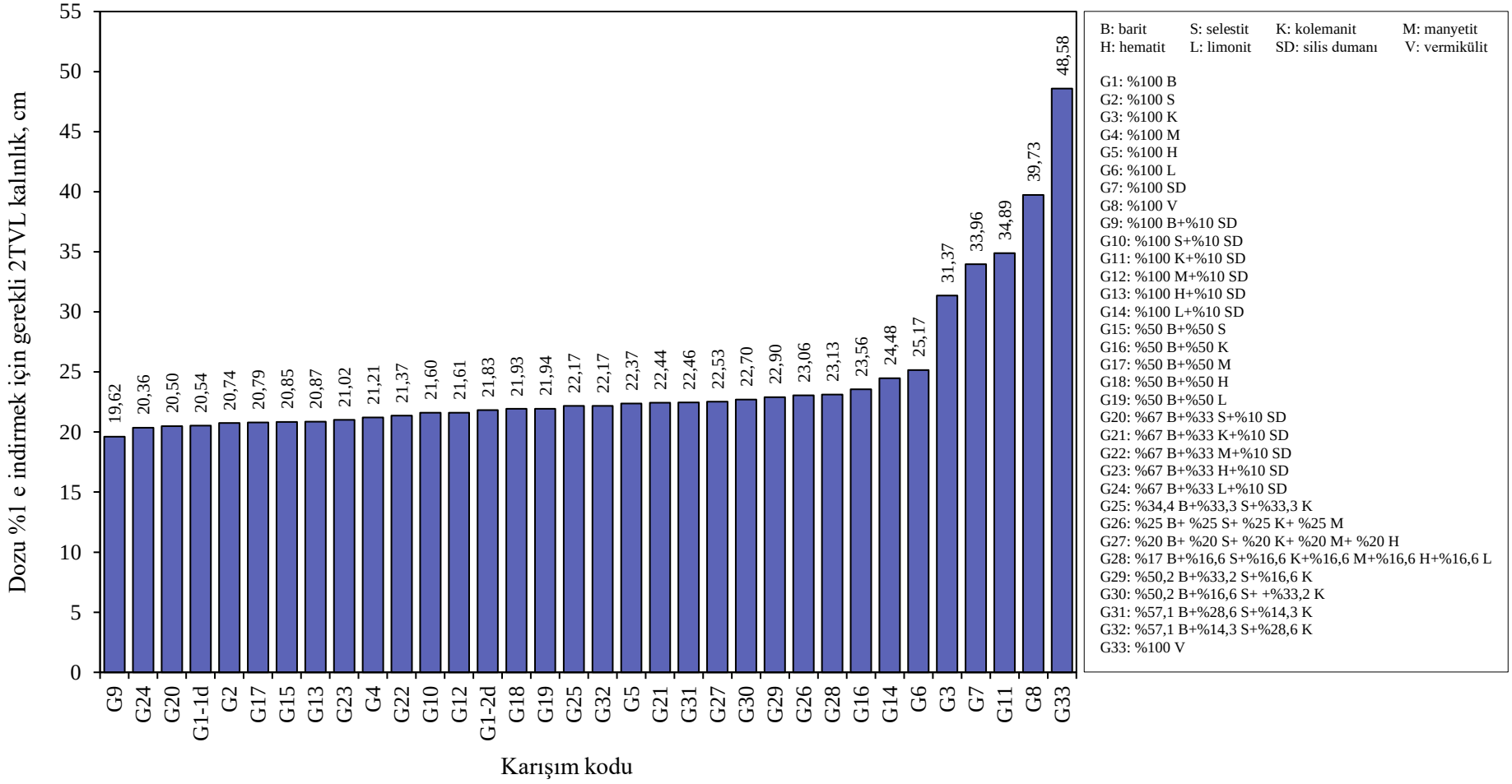
6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde 2TVL kalınlık değeri en yüksek 22,90 cm (G29 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük katsayı ise 22,17 cm (G32 kodlu) olarak bulunmuştur. Barit oranı yüksek olan numunelerin 2TVL kalınlık değeri de düşük bulunmuştur.

Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) 2TVL kalınlık değeri 48,58 cm olarak elde edilmiştir. Buna karşılık aynı karışıma sahip sıkıştırılarak üretilen numunenin (1.grup G8 kodlu) yarı kalınlık değeri ise 39,73 cm belirlenmiştir. Basınç altında sıkıştırılarak üretilen vermikülit agregalı numunelerin elle sıkıştırılanlara kıyasla birim hacim ağırlığında ve buna bağlı olarak da 2TVL kalınlık değerinde %18 artış gözlemlenmiştir.

Numunelerin Şekil 4.50'de 2TVL kalınlık sıralı değerleri verilmiştir. 2TVL değeri en düşük 210 bar basınç altında barit ve %10 silis dumanı ile üretilen (G9 kodlu) numunelerde 19,62 cm olarak tespit edilmiştir. Buna karşılık en yüksek yüzde bir kalınlık değeri (2TVL) ise elle sıkıştırılarak vermikülit ile üretilen G33 kodlu numunelerde 48,58 cm olarak bulunmuştur.



Şekil 4.49. Numunelerin 662 keV γ-ışını Dozu %1 e indirmek için gerekli 2TVL kalınlık değeri



Şekil 4.50. Numunelerin 662 keV γ-ışını Dozu %1 e indirmek için gerekli 2TVL kalınlık sıralı değeri

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin 662 keV γ-ışını 1 mm kurşun eş değer kalınlıkları Şekil 4.51'de verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. 1 mm kurşun eş değer kalınlığı en yüksek vermikülit (V) tipi agrega ile üretilen G8 numunesinde 10,13 mmPb ve en düşük barit (B) tipi agrega ile üretilen G1 numunesinde 5,24 mmPb olarak elde edilmiştir. Barit (B) agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numuneler farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin 1 mm kurşun eş değer kalınlığı 5,57 mmPb, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ki ise 5,24 mmPb olduğu tespit edilmiştir.

2.grupta G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek 1 mm kurşun eş değer kalınlığı kolemanit (K) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G11 kodlu) numunesinde 8,90 mmPb olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük 1 mm kurşun eş değer kalınlığı ise barit (B) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G9 kodlu) 5,00 mmPb olduğu görülmektedir.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Selestit, kolemanit ve manyetit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin 1 mm kurşun eş değer kalınlığı sırasıyla %4, %11 ve %2 arttığı tespit edilmiştir. Buna karşın barit, hematit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numuneler de ise %7, %7, %5 ve %3 oranında azalmaya sebep olmuştur.

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek 1 mm kurşun eş değer kalınlığı barit ve kolemanit (B ve K) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G16 kodlu) 6,01 mmPb, en düşük barit, selestit ve barit, manyetit (B-S ve B-M) tipi agrega ile üretilen numunelerde (G15 ve G17 kodlu) 15,30 mmPb olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. 1 mm kurşun eş değer kalınlığı en yüksek barit ve kolemanit (B ve K) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G21 numunesinde 5,72 mmPb, en düşük barit ve limonit (B ve L)

tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G24 numunesinde 5,19 mmPb olarak elde edilmiştir.

4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit, kolemanit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin 1 mm kurşun eş değer kalınlığı sırasıyla %1, %5 ve %7 oranında azalmaya sebep olurken, barit, manyetit ve hematit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numuneler de ise %3 ve %1 artışa neden olduğu görülmektedir.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. 1 mm kurşun eş değer kalınlığı en yüksek barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit ve limonit (B, S, K, M, H ve L) tipi agrega ile üretilen G28 numunesinde 5,90 mmPb, en düşük barit, selestit ve kolemanit (B, S ve K) tipi agrega ile üretilen G25 numunesinde 5,65 mmPb olarak elde edilmiştir. Numune üretiminde kullanılan barit oranının azalmasıyla beraber yarı kalınlık değerinin de azaldığı sonucuna ulaşılmıştır.

6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde 1 mm kurşun eş değer kalınlığı en yüksek 5,84 mmPb (G29 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük kalınlık ise 5,65 mmPb (G32 kodlu) olarak bulunmuştur. Barit oranı yüksek olan numunelerin 1 mm kurşun eş değer kalınlığı de düşük bulunmuştur.

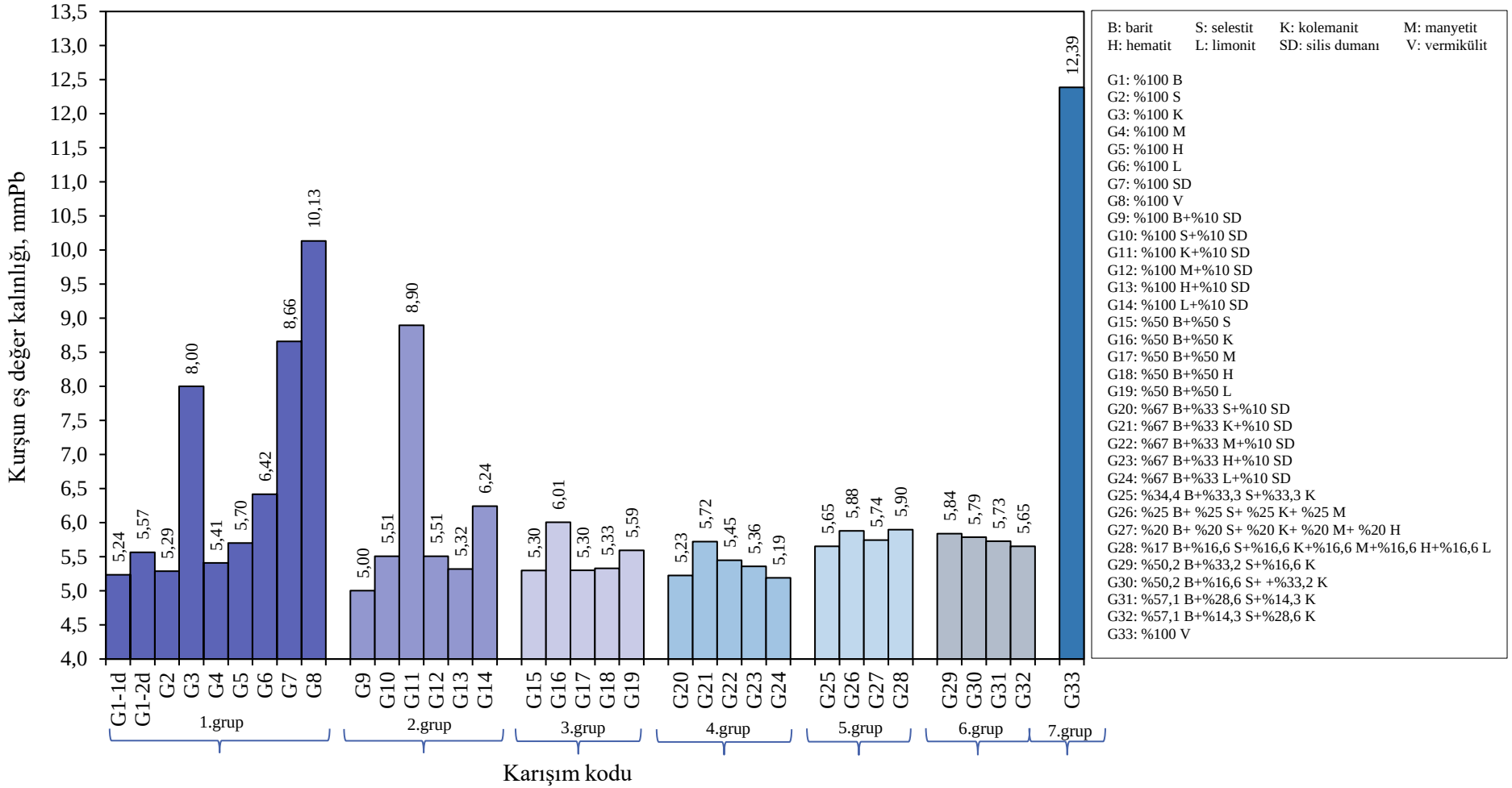
Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) 1 mm kurşun eş değer kalınlığı 12,39 mm olarak elde edilmiştir. Buna karşılık aynı karışıma sahip sıkıştırılarak üretilen numunenin (1.grup G8 kodlu) 1 mm kurşun eş değer kalınlığı ise 10,13 mm belirlenmiştir. Basınç altında sıkıştırılarak üretilen vermikülit agregalı numunelerin elle sıkıştırılanlara kıyasla birim hacim ağırlığında ve buna bağlı olarak da 1 mm kurşun eş değer kalınlığının daha düşük değerler aldığı gözlemlenmiştir.

Üretilen numunelerin 1 mm kurşun eş değer sıralı kalınlık değerleri Şekil 4.52'de verilmiştir. 1 mm kurşun eş değeri en düşük 210 bar basınç altında barit ve %10 silis dumanı ile üretilen (G9 kodlu) numunelerde 5,00 mmPb olarak tespit edilmiştir. Üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin içerisinde (31 karışım, vermikülit

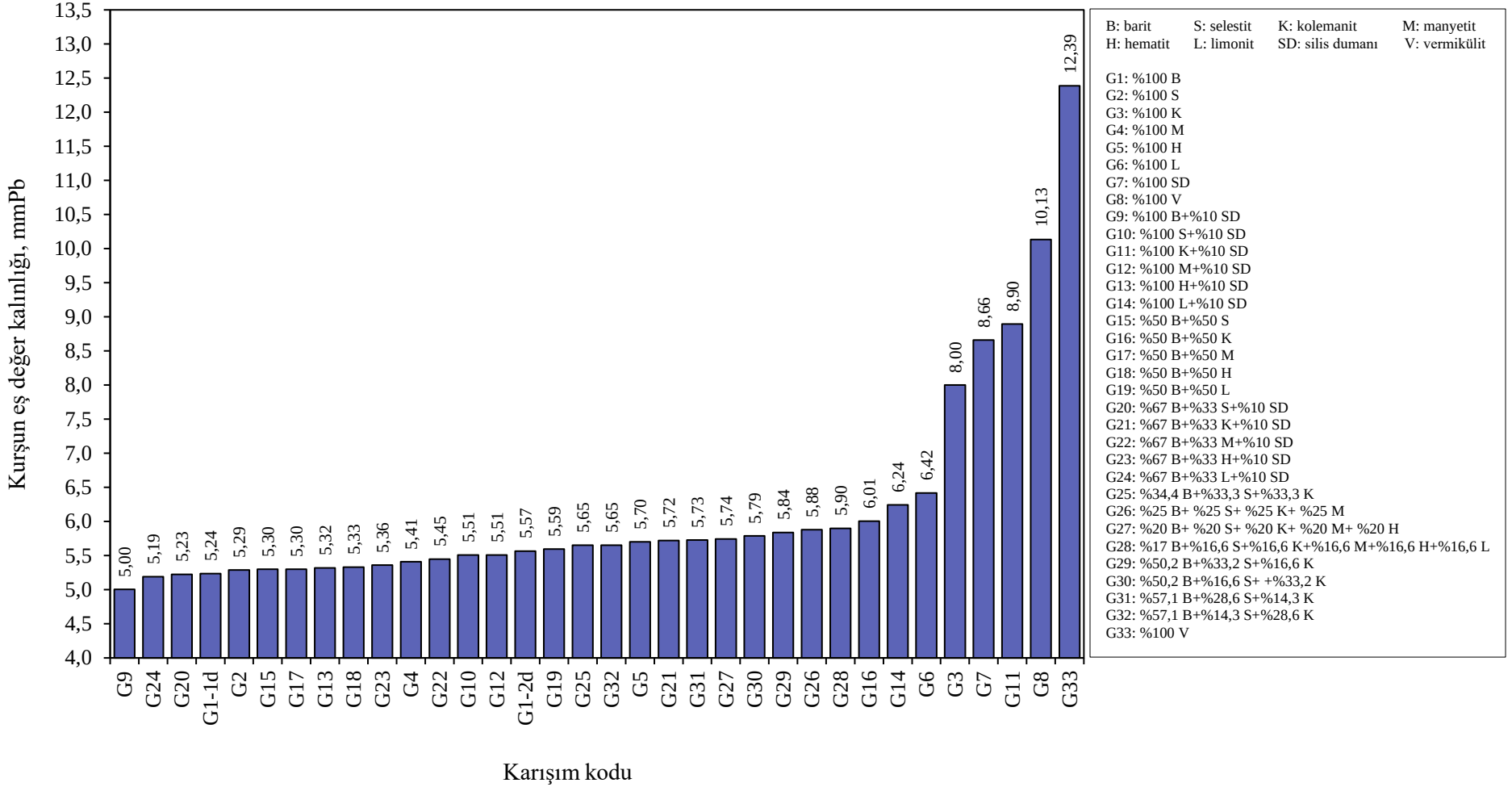
agregalı karışımlar hariç) 1 mm kurşun eş değerler kalınlıkları 5,00-10,13 mmPb arasında değişmektedir.

Numunelerin 662 keV γ-ışını 1 mm kurşun eş değer kalınlığı-yoğunluk ilişkisi Şekil 4.53'te verilmiştir. 1 mm kurşun eş değer kalınlığı en düşük barit ve %10 silis dumanı ile üretilen G9 kodlu numunede 5,00 mmPb iken yoğunluk 3,10 g/cm^3 olarak elde edilmiştir. Buna karşılık yoğunluk değeri en yüksek barit ve selestit ile üretilen G15 kodlu numunede 3,23 g/cm^3 olduğunda kalınlık 5,30 mmPb olduğu görülmektedir.

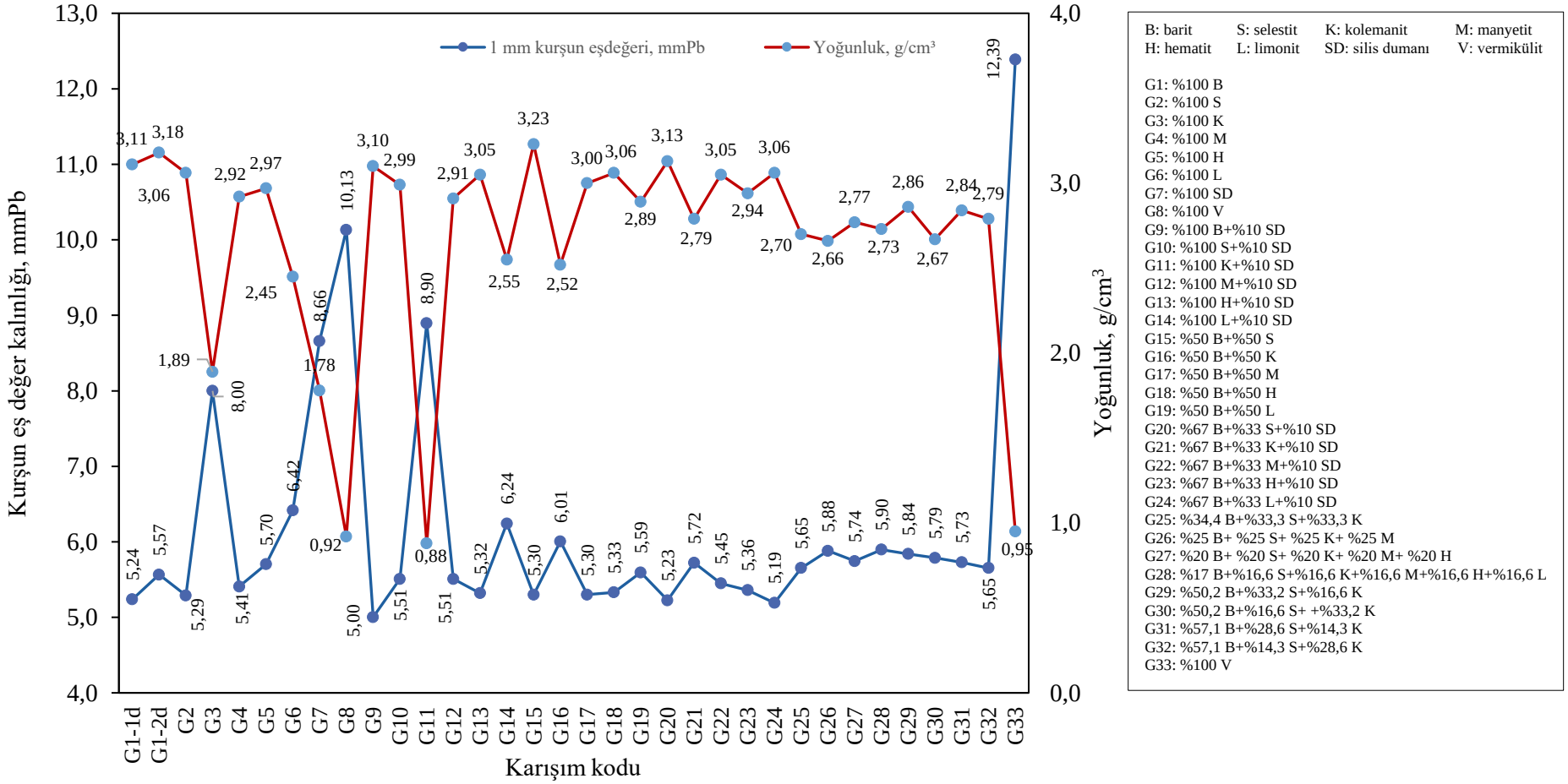
Numunelerin 662 keV γ-ışını 1 mm kurşun eş değer kalınlığı-porozite ilişkisi Şekil 4.54te verilmiştir. 1 mm kurşun eş değer kalınlığı en düşük barit ve %10 silis dumanı ile üretilen G9 kodlu numunede 5,00 mmPb iken porozite oranı %12,0 olarak elde edilmiştir. Buna karşılık porozite oranı en yüksek vermikülit ile üretilen G33 kodlu numunede 56,5 olduğunda kalınlık 12,39 mmPb olduğu görülmektedir. Porozite oranı, üretilen numunelerin fiziksel, mekanik, radyasyon tutuculuk özelliklerini etkileyen önemli parametrelerden biridir. Porozite oranı arttıkça birim ağırlığında azalmaya bağlı olarak numunenin kurşun eş değer kalınlığında bir artış olduğu görülmektedir.



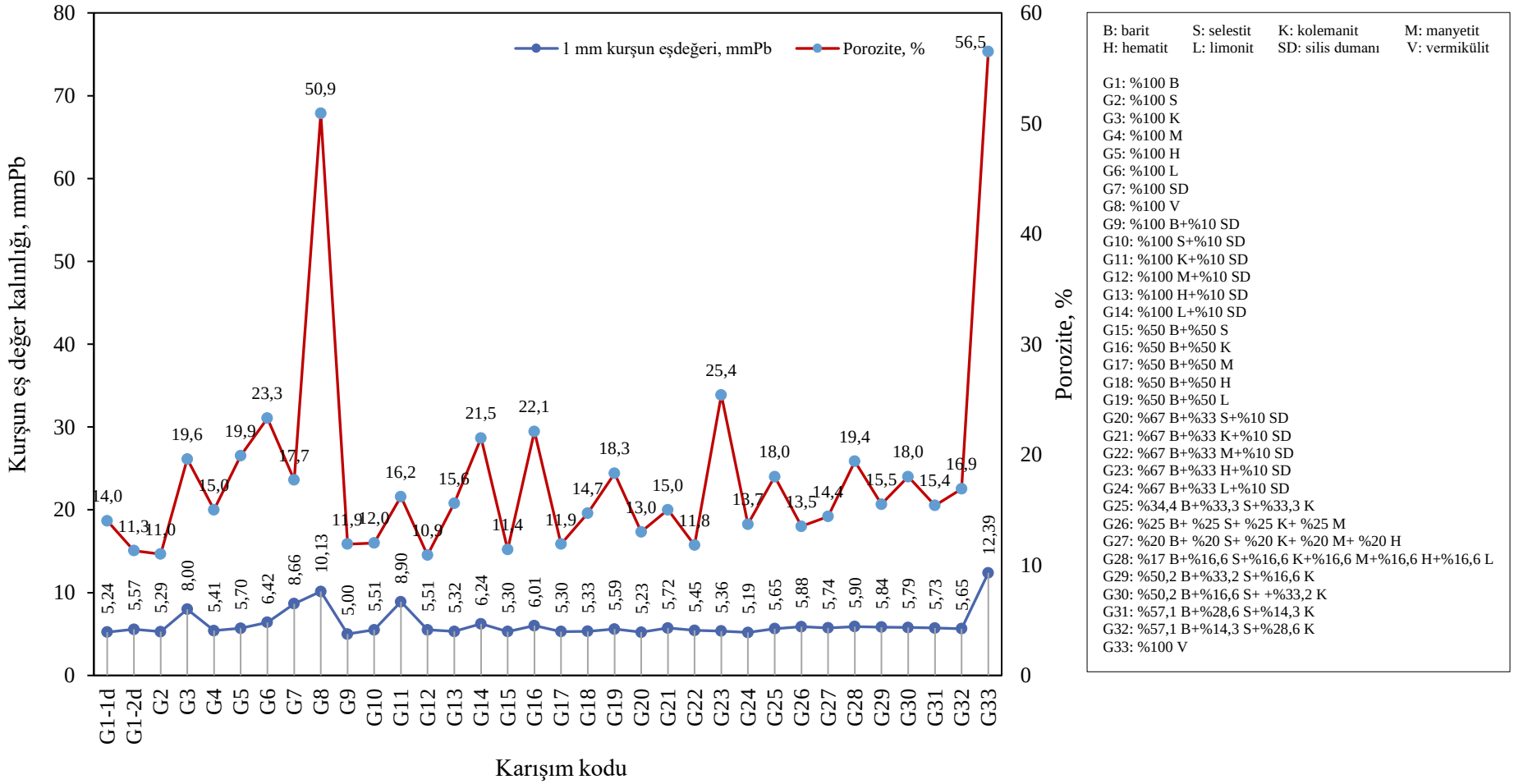
Şekil 4.51. Numunelerin 662 keV γ-ışını 1 mm kurşun eş değeri (dozu %88,9'a indirmek için gerekli kalınlık)



Şekil 4.52. Numunelerin 662 keV γ-ışını sıralı 1 mm kurşun eş değeri (dozu %88,9'a indirmek için gerekli kalınlık)



Şekil 4.53. Numunelerin 662 keV γ-ışını 1 mm kurşun eşdeğer kalınlığı-yoğunluk ilişkisi



Şekil 4.54. Numunelerin 662 keV γ-ışını 1 mm kurşun eşdeğer kalınlığı-porozite ilişkisi

4.4.3. Nötron Tutuculuk

Çalışmada üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin nötron geçirgenliklerinin incelenebilmesi için İTÜ Enerji Enstitüsü'nde bulunan (Pu-Be) Nötron Howitzer-3 (NH-3) kaynağı, nötron dedektörü, nötron kolimatör ve nötron zırh elemanları kullanılarak deney düzeneği oluşturulmuştur. Lineer ve kütle zayıflatma katsayıları Bölüm 3.2.1'de açıklandığı gibi Denklem 3.13 ve 3.14 yardımıyla hesaplanmış ve her bir kaplama numunesinin yarı kalınlık (HVL), radyasyon şiddeti dozunu onda bir ve yüzde bire indirmek için TVL ve 2TVL kalınlık değerleri hesaplanmıştır. Deney sonuçları Çizelge 4.6'fda verilmiştir. Ayrıca termal nötronlar için yapılan sayımların Denklem 3.13 yardımıyla I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi ve R^2 (regresyon sabiti katsayısı) oranının fonksiyonel grafikleri çizilmiş, sonuçlar Ek-6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6. Termal nötronlar için deneysel zayıflatma katsayı, HVL, 2TVL ve 5TVL kalınlık değeri

Karışım grubu	Karışım kodu	BHA	μ-katsayısı (Deneysel)	μ-katsayısı (Deneysel)	Yarı kalınlık değeri (HVL)	Onda bir kalınlık değeri (TVL)	Dozu %1 e indirmek için gerekli kalınlık (2TVL)
		(g/cm^3)	(cm^{-1})	(cm^2/g)	(cm)	(cm)	(cm)
1. grup	G1-1d	3,11	0,3965	0,1275	1,74	5,81	11,62
	G1-2d	3,18	0,3538	0,1113	1,95	6,51	13,02
	G2	3,06	0,3462	0,1131	2,00	6,65	13,30
	G3	1,89	2,4003	1,2700	0,29	0,96	1,92
	G4	2,92	0,5051	0,1730	1,37	4,56	9,12
	G5	2,97	0,5667	0,1908	1,22	4,07	8,13
	G6	2,45	0,7556	0,3084	0,91	3,05	6,10
	G7	1,78	0,5532	0,3108	1,25	4,17	8,33
	G8	0,92	0,6779	0,7368	1,02	3,40	6,79
2. grup	G9	3,10	0,4117	0,1328	1,68	5,60	11,19
	G10	2,99	0,3972	0,1328	1,74	5,80	11,59
	G11	0,88	2,0205	2,2960	0,34	1,14	2,28
	G12	2,91	0,4697	0,1613	1,48	4,92	9,84
	G13	3,05	0,5567	0,1825	1,24	4,14	8,27
	G14	2,55	0,6992	0,2742	0,99	3,30	6,59
3. grup	G15	3,23	0,3410	0,1055	2,04	6,79	13,58
	G16	2,52	1,9888	0,7892	0,35	1,16	2,32
	G17	3,00	0,4051	0,1350	1,71	5,69	11,37
	G18	3,06	0,4948	0,1621	1,40	4,66	9,31
	G19	2,89	0,5489	0,1899	1,26	4,20	8,39
4. grup	G20	3,13	0,3791	0,1211	1,82	6,08	12,15
	G21	2,79	1,5077	0,5404	0,46	1,53	3,05
	G22	3,05	0,3812	0,1250	1,81	6,04	12,08
	G23	2,94	0,4445	0,1512	1,55	5,18	10,36
	G24	3,06	0,4598	0,1503	1,50	5,01	10,02
5. grup	G25	2,70	1,5090	0,5589	0,46	1,53	3,05
	G26	2,66	1,3611	0,5117	0,51	1,69	3,38
	G27	2,77	1,1878	0,4288	0,59	1,94	3,88
	G28	2,73	1,0721	0,3927	0,64	2,15	4,30
6. grup	G29	2,86	0,9676	0,3383	0,71	2,38	4,76
	G30	2,67	1,4108	0,5284	0,49	1,63	3,26
	G31	2,84	0,7981	0,2810	0,87	2,89	5,77
	G32	2,79	1,2859	0,4609	0,54	1,79	3,58
7. grup	G33	0,95	0,6857	0,7218	1,01	3,36	6,72

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin deneysel nötron kütle zayıflatma katsayı değerleri Şekil 4.55'te verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. Kütle zayıflatma katsayı en yüksek kolemanit (K) tipi agrega ile üretilen G3 numunesinde 1,27 cm^2/g ve en düşük barit (B) tipi agrega ile üretilen G1 numunesinde 0,1113 cm^2/g olarak elde edilmiştir. Barit (B) agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numuneler farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin kütle zayıflatma katsayı 0,1113 cm^2/g, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ki ise 0,1275 cm^2/g olduğu tespit edilmiştir.

2.grupta G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek kütle zayıflatma katsayı kolemanit (K) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G11 kodlu) numunesinde 02,2960 cm^2/g olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük kütle zayıflatma katsayı ise barit (B) ve selestit (S) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G9 ve G10 kodlu) 0,1328 cm^2/g olarak bulunmuştur.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11-G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, selestit ve kolemanit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin kütle zayıflatma katsayı değerinde %11, %17 ve %81 artış gözlemlenmiştir. Buna karşın manyetit, hematit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerde ise %7, %4 ve %11 azaltığı sonucuna varılmıştır.

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde kütle zayıflatma katsayı en yüksek barit ve kolemanit (B ve K) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G16 kodlu) 0,7892 cm^2/g, en düşük barit ve selestit (B ve S) tipi agrega ile üretilen G15 numunesinde 0,1055 cm^2/g olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. Kütle zayıflatma katsayı en yüksek barit ve kolemanit (B ve K) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G21 numunesinde 0,5404 cm^2/g, en düşük barit ve selestit (B ve S) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G20 numunesinde 0,1211 cm^2/g olarak elde edilmiştir.

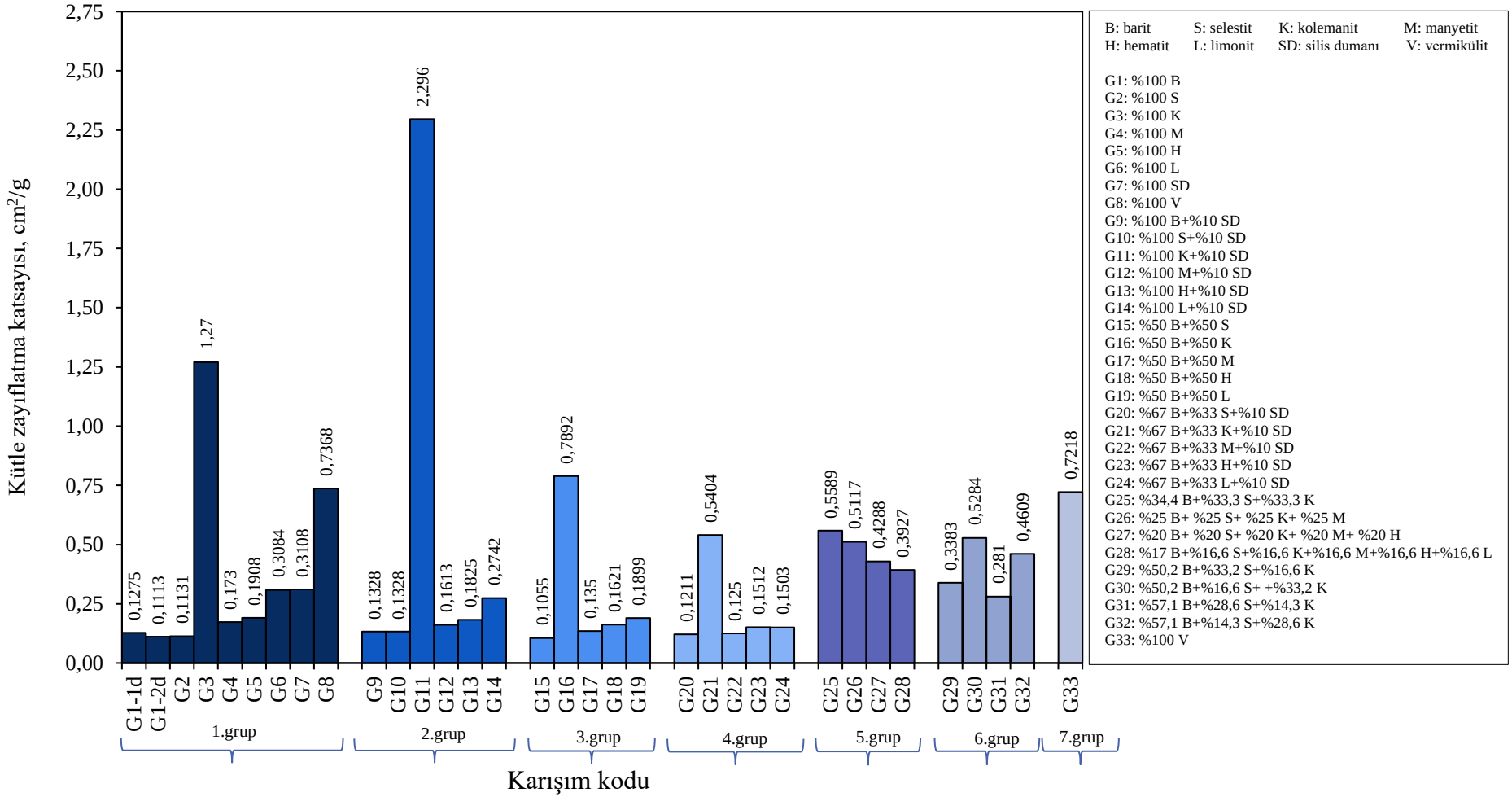
4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit agregasının kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin kütle zayıflatma katsayısı %15 artışa sebep olmuştur (Biber Temircik, 2015).

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. Kütle zayıflatma katsayı en yüksek barit, selestit ve kolemanit (B, S ve K) tipi agrega ile üretilen G25 numunesinde 0,5589 cm^2/g, en düşük barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit ve limonit (B, S, K, M, H ve L) tipi agrega ile üretilen G28 numunesinde 0,3927 cm^2/g olarak elde edilmiştir. Numune üretiminde kullanılan barit oranının azalmasıyla beraber kütle zayıflatma katsayısının da azaldığı sonucuna ulaşılmıştır (Mutlu, 2020; Demir 2009; Biber Temircik 2015, Oto 2012).

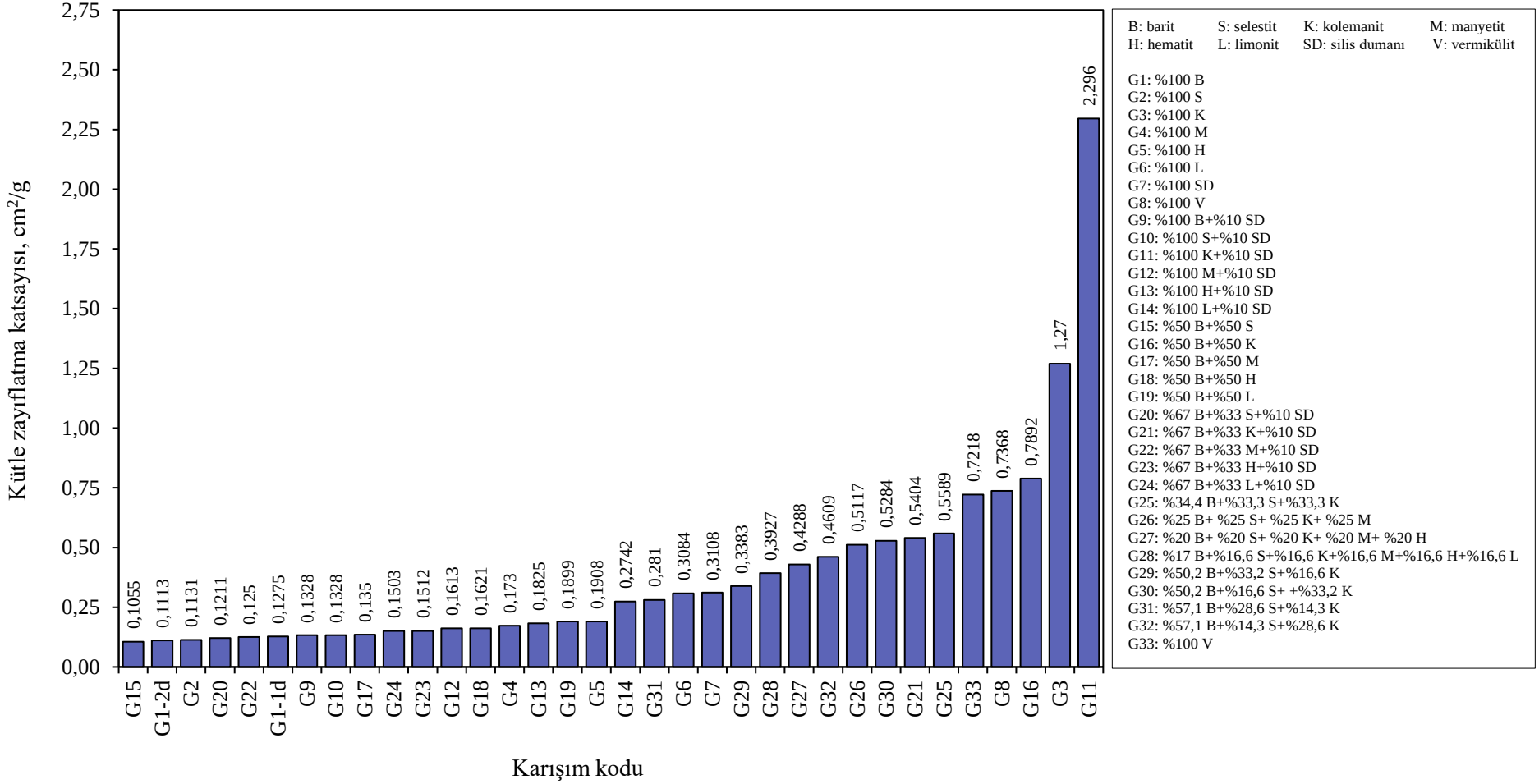
6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde kütle zayıflatma katsayı en yüksek 0,5284 cm^2/g (G30 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük katsayı ise 0,2810 cm^2/g (G31 kodlu) olarak bulunmuştur. Barit oranı yüksek olan numunelerin kütle zayıflatma katsayısı da yüksek bulunmuştur (Demir, 2009; Tüfekçi, 2017).

Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) kütle zayıflatma katsayısı 0,7218 cm^2/g olarak elde edilmiştir.

Numunelerin kütle zayıflatma katsayısı sıralı değerleri Şekil 4.56'da verilmiştir. Kütle zayıflatma katsayısı en yüksek 100 bar basınç altında barit agregası ile üretilen (G11 kodlu) numunelerde 2,2960 cm^2/g olmasına rağmen, en düşük 200 bar basınç altında silis dumanı ile üretilen numunelerde (G15 kodlu) 0,1055 cm^2/g olduğu görülmektedir.



Şekil 4.55. Numunelerin termal nötron deneysel kütle zayıflatma katsayısı değerleri



Şekil 4.56. Numunelerin termal nötron deneysel kütle zayıflatma katsayısı sıralı değerleri

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin deneysel nötron kütle zayıflatma katsayı değerleri Şekil 4.57'de verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. Lineer zayıflatma katsayı en yüksek kolemanit (K) tipi agrega ile üretilen G3 numunesinde 2,4003 cm^{-1} ve en düşük selestit (S) tipi agrega ile üretilen G2 numunesinde 0,3462 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. Barit (B) agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numuneler farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin lineer zayıflatma katsayı 0,3538 cm^{-1}, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ki ise 0,3965 cm^{-1} olduğu tespit edilmiştir.

2.grupta G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek lineer zayıflatma katsayı kolemanit (K) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G11 kodlu) numunesinde 2,0205 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük lineer zayıflatma katsayı ise selestit (S) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G10 kodlu) 0,3972 cm^{-1} olarak bulunmuştur.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11-G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit ve selestit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin lineer zayıflatma katsayı değerinde %10 ve %15 arasında artış elde edilmiştir. Buna karşılık kolemanit, manyetit, hematit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerde ise %16, %7, %2 ve %7 azalış tespit edilmiştir.

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Lineer zayıflatma katsayı en yüksek barit ve kolemanit (B ve K) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G16 kodlu) 1,9888 cm^{-1}, en düşük barit ve selestit (B ve S) tipi agrega ile üretilen numunelerde (G15 kodlu) 0,3410 cm^{-1} olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde lineer zayıflatma katsayı en yüksek barit ve kolemanit (B ve K) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G21 kodlu) 1,5077 cm^{-1}, en düşük barit ve selestit (B ve S) tipi agrega ile üretilen numunelerde (G20 kodlu) 0,3791 cm^{-1} olarak bulunmuştur.

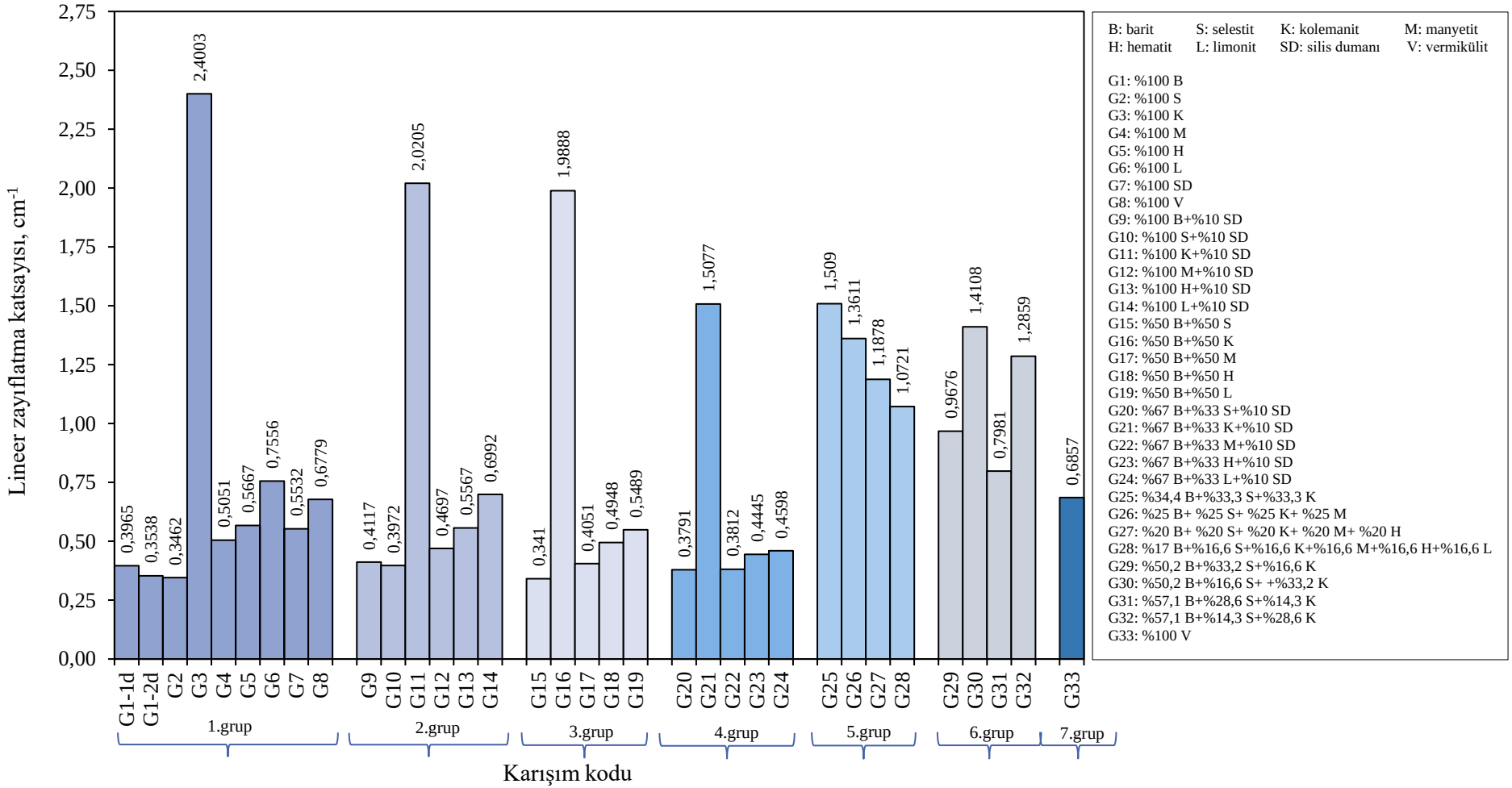
4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Bu grupta sadece barit, selestit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin lineer zayıflatma katsayı %11 oranında artışa sebep olmuştur. Diğer numunelerde ise %10 silis dumanı ilavesi lineer zayıflatma katsayı değerini sırasıyla %24, %6, %10 ve %16 azalttığı görülmektedir.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. Lineer zayıflatma katsayı en yüksek barit, selestit ve kolemanit (B, S ve K) tipi agrega ile üretilen G25 numunesinde 1,509 cm^{-1}, en düşük barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit ve limonit (B, S, K, M, H ve L) tipi agrega ile üretilen G28 numunesinde 1,0721 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. Numune üretiminde kullanılan barit oranının azalmasıyla beraber lineer zayıflatma katsayısının da azaldığı sonucuna ulaşılmıştır (Mutlu, 2020; Demir 2009; Biber Temircik 2015, Oto 2012).

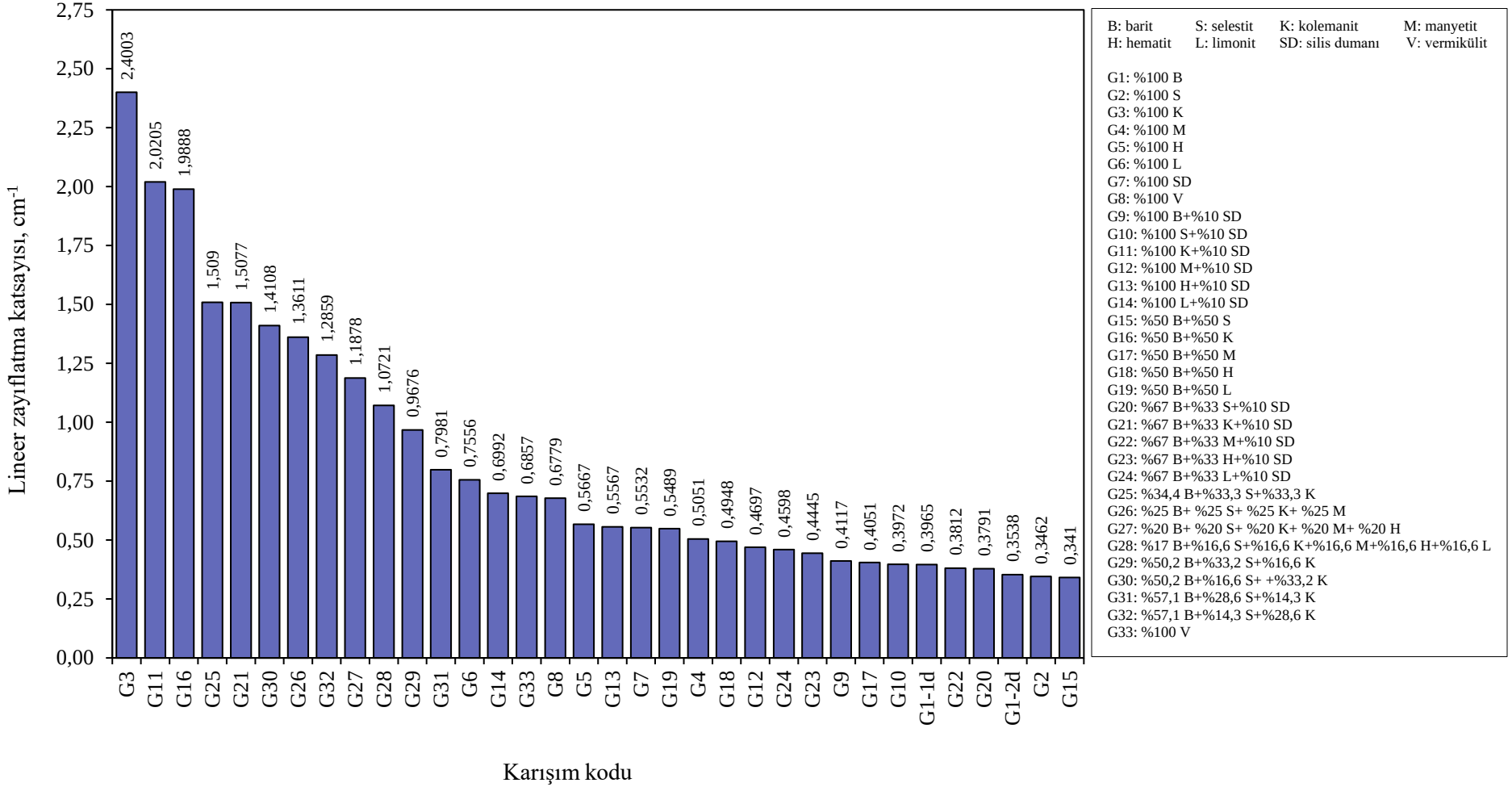
6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde lineer zayıflatma katsayı en yüksek 1,4108 cm^{-1} (G30 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük katsayı ise 0,7981 cm^{-1} (G31 kodlu) olarak bulunmuştur. Barit oranı yüksek olan numunelerin lineer zayıflatma katsayısı da yüksek bulunmuştur (Demir, 2009; Tüfekçi, 2017).

Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) lineer zayıflatma katsayısı 0,6857 cm^{-1} olarak elde edilmiştir. Buna karşılık aynı karışıma sahip sıkıştırılarak üretilen numunenin (1.grup G8 kodlu) lineer zayıflatma katsayısı ise 0,6779 cm^{-1} belirlenmiştir. Basınç altında sıkıştırılarak üretilen vermikülit agregalı numunelerin elle sıkıştırılanlara kıyasla birim hacim ağırlığında ve lineer zayıflatma katsayısında artış gözlemlenmiştir.

Numunelerin lineer zayıflatma katsayısı sıralı değerleri Şekil 4.58'de verilmiştir. 100 bar basınç altında kolemanit ile üretilen G3 kodlu numunenin nötron geçirgenlik testine göre en iyi olduğu, buna karşın 200 bar basınç altında barit ile üretilen G15 kodlu numunenin ise en kötü olduğu görülmektedir. Gençel (2009) beton içeriğindeki kolemanit oranının artması ile betonların zırhlama yeteneğinin arttığı sonucuna varmıştır.



Şekil 4.57. Numunelerin termal nötron deneysel lineer zayıflatma katsayısı değerleri



Şekil 4.58. Numunelerin termal nötron deneysel lineer zayıflatma katsayısı sıralı değerleri

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin nötronlar için radyasyon demeti şiddetini yarı değerine düşüren zırhlama malzemesine özgü kalınlık değerleri (Half Value Layer-HVL) Şekil 4.59'da verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. Yarı kalınlık değeri en yüksek selestit (S) tipi agrega ile üretilen G2 numunesinde 2,00 cm ve en düşük kolemanit (K) tipi agrega ile üretilen G1 numunesinde 0,29 cm olarak elde edilmiştir. Barit (B) agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numuneler farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin yarı kalınlık değeri 1,95 cm, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ki ise 1,74 cm olduğu tespit edilmiştir.

2.grupta G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek yarı kalınlık değeri selestit (S) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G10 kodlu) numunesinde 1,74 cm olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük yarı kalınlık değeri ise kolemanit (K) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G119 kodlu) 0,34 cm olarak bulunmuştur.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit ve selestit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin yarı kalınlık değeri %9 ve %13 azaldığı tespit edilmiştir. Buna karşın kolemanit, manyetit, hematit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numuneler de ise sırasıyla %17, %8, %2 ve %9 oranında artışa sebep olmuştur.

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek yarı kalınlık değeri en yüksek barit ve selestit (B ve S) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G15 kodlu) 2,04 cm, en düşük barit ve kolemanit (B ve K) tipi agrega ile üretilen numunelerde (G16 kodlu) 0,35 cm olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. Yarı kalınlık değeri en yüksek barit ve selestit (B ve S) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G20 numunesinde 1,82 cm, en düşük barit ve kolemanit (B ve K) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G21 numunesinde 0,46 cm olarak elde edilmiştir.

4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit ve selestit agregaların

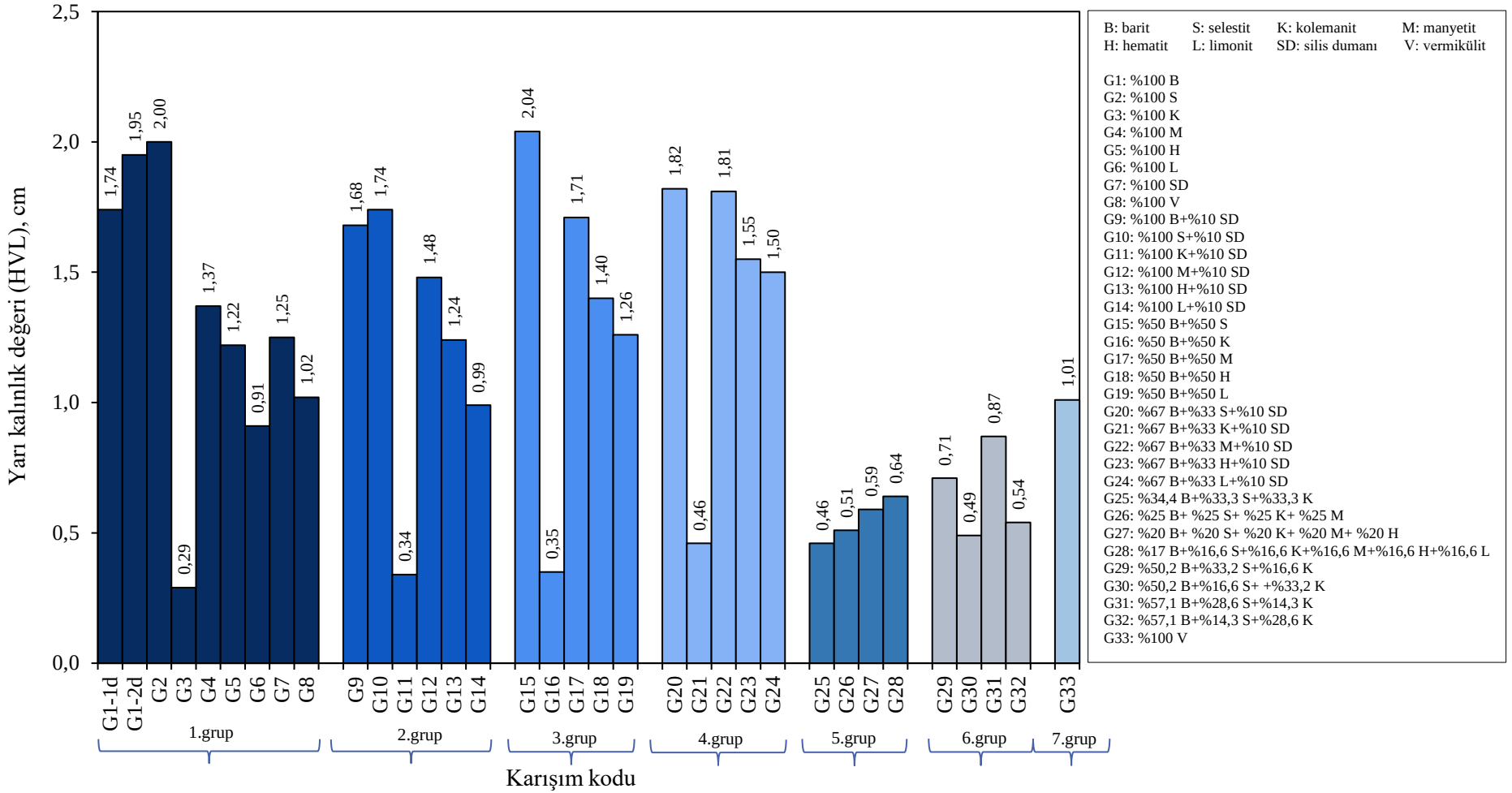
kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin yarı kalınlık değeri %11 azalırken; barit, manyetit, hematit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerde ise sırasıyla %31, %6, %11 ve %19 artışa sebap olmuştur.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. Yarı kalınlık değeri en yüksek barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit ve limonit (B, S, K, M, H VE L) tipi agrega ile üretilen G28 numunesinde 0,64 cm, en düşük barit, selestit ve kolemanit (B, S ve K) tipi agrega ile üretilen G25 numunesinde 0,46 cm olarak elde edilmiştir.

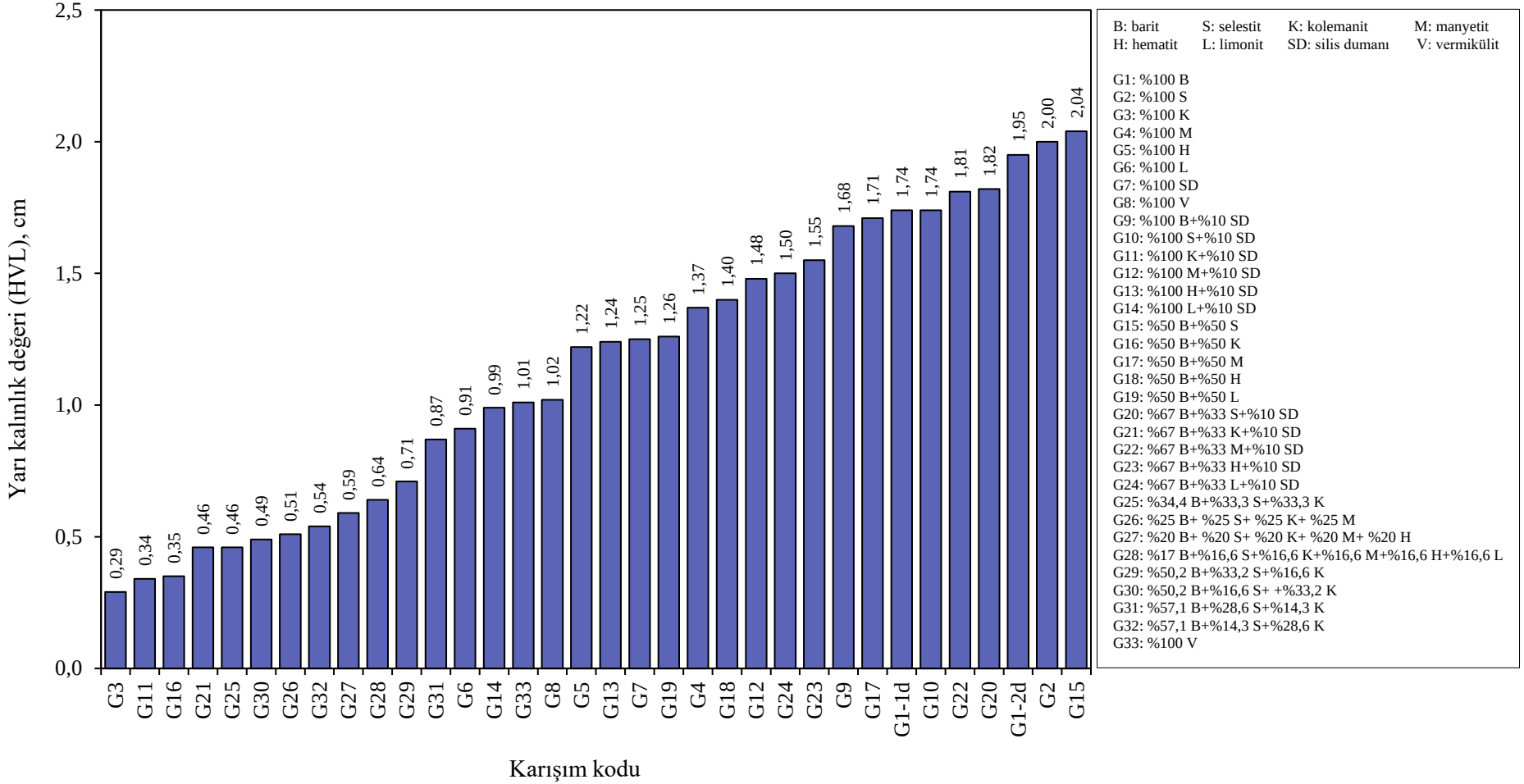
6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde yarı kalınlık değeri en yüksek 0,87 cm (G31 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük katsayı ise 0,49 cm (G30 kodlu) olarak bulunmuştur.

Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) yarı kalınlık değeri 1,01 cm olarak elde edilmiştir.

Numunelerin Şekil 4.57'de yarı kalınlık sıralı değerleri Şekil 4.60'da verilmiştir. HVL değeri en düşük 100 bar basınç altında barit agregası ile üretilen (G3 kodlu) numunelerde 0,29 cm olarak tespit edilmiştir. Buna karşılık en yüksek yarı kalınlık değeri (HVL) ise elle sıkıştırılarak vermikülit ile üretilen G33 kodlu numunelerde 2,04 cm olarak bulunmuştur. Gençel (2009) beton içeriğindeki kolemanit oranının artması ile betonların nötronlara karşı yeteneğinin azaldığı sonucuna varmıştır.



Şekil 4.59. Numunelerin termal nötron yarı kalınlık değeri (HVL)



Şekil 4.60. Numunelerin termal nötron yarı kalınlık sıralı değeri (HVL)

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin nötronlar için radyasyon demeti şiddetini onda bir değerine düşüren zırhlama malzemesine özgü kalınlık değerleri (Tent Value Layer-TVL) Şekil 4.61'de verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. TVL kalınlık değeri en yüksek selestit (S) tipi agrega ile üretilen G2 numunesinde 6,65 cm ve en düşük kolemanit (K) tipi agrega ile üretilen G3 numunesinde 0,96 cm olarak elde edilmiştir. Barit (B) agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numuneler farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin kalınlık değeri 6,51 cm, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ki ise 5,81 cm olduğu tespit edilmiştir.

2.grupta G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek TVL kalınlık değeri selestit (S) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G10 kodlu) numunesinde 5,80 cm olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük kalınlık değeri ise kolemanit (K) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G11 kodlu) 1,14 cm olarak bulunmuştur.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit ve selestit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin TVL kalınlık değeri sırasıyla %9 ve %13 azaldığı tespit edilmiştir. Buna karşın kolemanit, manyetit, hematit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numuneler de ise %19, %8, %2 ve %8 oranında artışa sebep olmuştur.

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek TVL kalınlık değeri en yüksek barit ve selestit (B ve S) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G15 kodlu) 6,79 cm, en düşük barit ve kolemanit (B ve K) tipi agrega ile üretilen numunelerde (G16 kodlu) 1,16 cm olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. TVL kalınlık değeri en yüksek barit ve selestit (B ve S) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G20 numunesinde 6,08cm, en düşük barit ve kolemanit (B ve K) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G21 numunesinde 1,53 cm olarak elde edilmiştir.

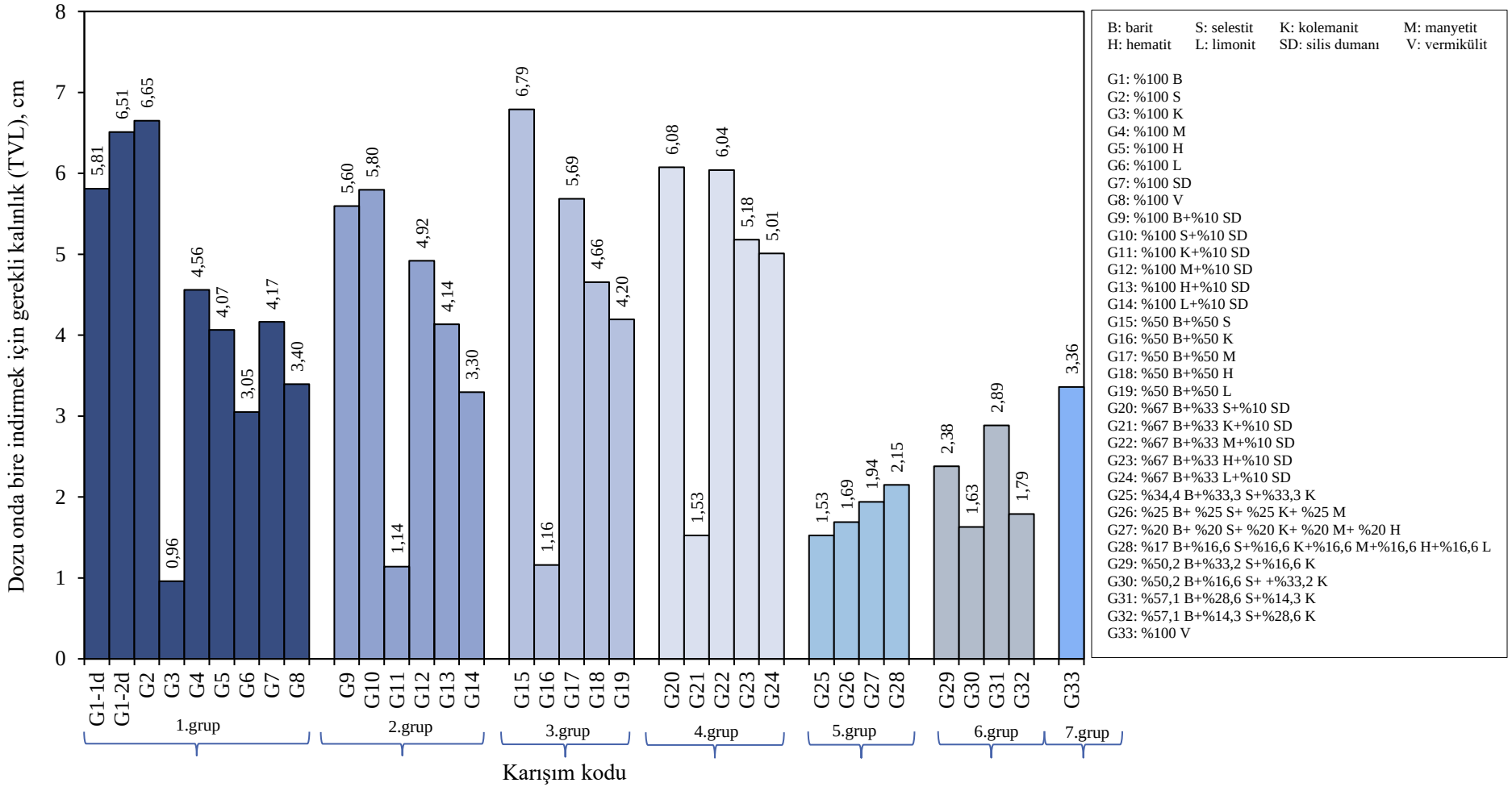
4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, kolemanit manyetit, hematit, limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin TVL kalınlık değeri sırasıyla %31, %6, %11 ve %19 arttığı tespit edilmiştir. Buna karşın barit ve selestit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerde ise TVL kalınlık değeri %11 azalmıştır.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. TVL kalınlık değeri en yüksek barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit ve limonit (B, S, K, M, H ve L) tipi agrega ile üretilen G28 numunesinde 2,15 cm, en düşük barit, selestit ve kolemanit (B, S ve K) tipi agrega ile üretilen G25 numunesinde 1,53 cm olarak elde edilmiştir. Numune üretiminde kullanılan barit oranının azalmasıyla beraber TVL kalınlık değerinin de arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

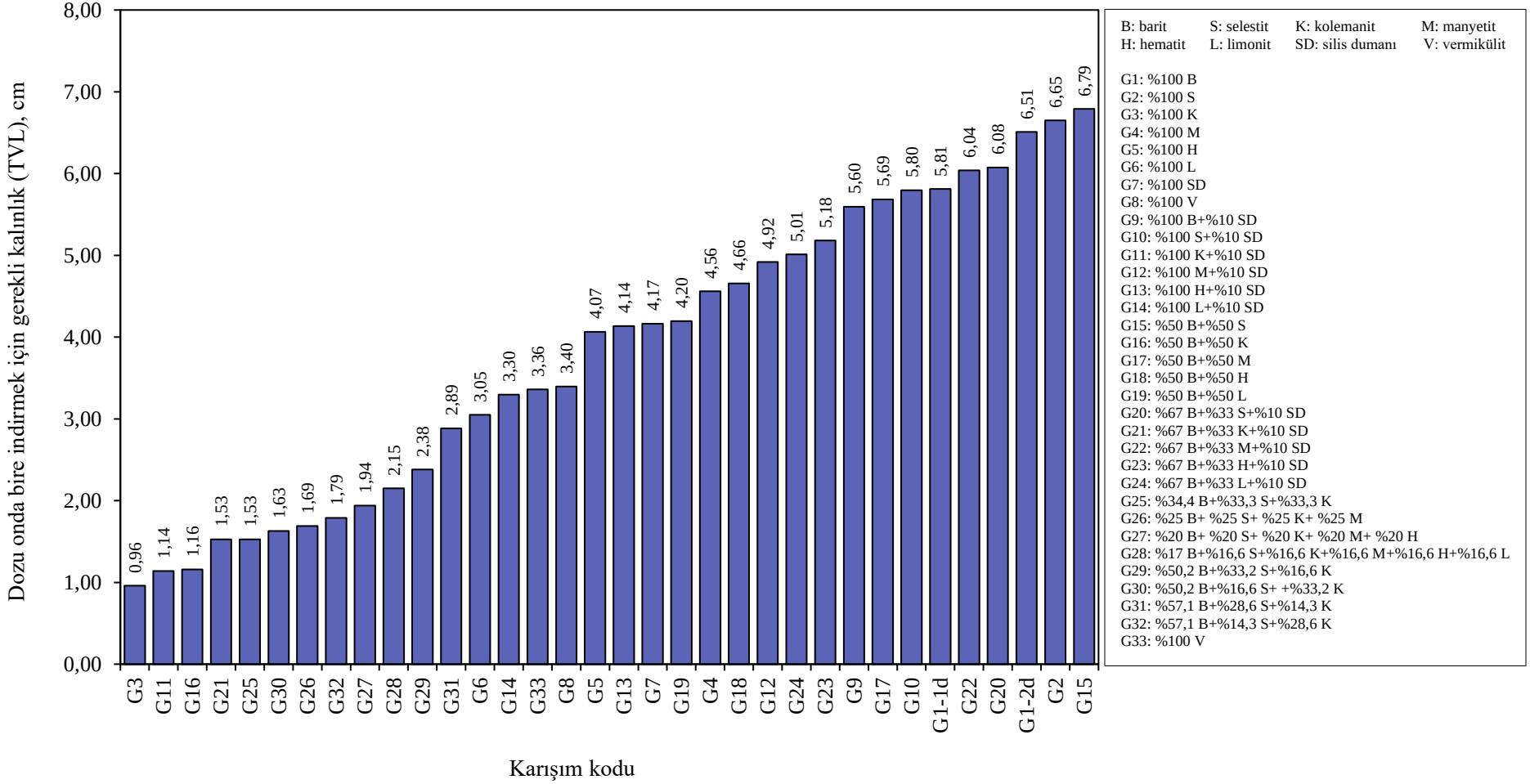
6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde TVL kalınlık değeri en yüksek 2,89 cm (G31 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük katsayı ise 1,63 cm (G30 kodlu) olarak bulunmuştur.

Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) TVL kalınlık değeri 3,36 cm olarak elde edilmiştir. Buna karşılık aynı karışıma sahip sıkıştırılarak üretilen numunenin (1.grup G8 kodlu) yarı kalınlık değeri ise 3,40 cm belirlenmiştir.

Üretilen kompozit kaplama numunelerine ait TVL kalınlık sıralı değerleri Şekil 4.62'da verilmiştir. TVL değeri en düşük 100 bar basınç altında kolemanit agregası ile üretilen (G3 kodlu) numunelerde 0,96 cm olarak tespit edilmiştir. Radyasyon demeti şiddetini onda bir değerine düşüren zırhlama malzemesine özgü kalınlıkların (TVL) 0,96-6,79 cm arasında değerler aldığı görülmektedir.



Şekil 4.61. Numunelerin termal nötron dozu onda bire indirmek için gerekli kalınlık değeri (TVL)



Şekil 4.62. Numunelerin termal nötron dozu onda bire indirmek için gerekli kalınlık (TVL) sıralı değeri

Farklı agregalar kullanılarak üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numunelerinin nötronlar için radyasyon demeti şiddetini yüzde bir değerine düşüren zırhlama malzemesine özgü kalınlık değerleri (Tent Value Layer-2TVL) Şekil 4.63'de verilmiştir.

1.grupta G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8 kodlu numuneler yer almaktadır. 2TVL kalınlık değeri en yüksek selestit (S) tipi agrega ile üretilen G2 numunesinde 13,30 cm ve en düşük kolemanit (K) tipi agrega ile üretilen G3 numunesinde 1,92 cm olarak elde edilmiştir. Barit (B) agrega tipi ile üretilen G1 kodlu numuneler farklı basınçlar altında iki döküm olarak üretilmiştir. Yüksek basınçta sıkıştırılan G1-2d numunesinin kalınlık değeri 13,02 cm, düşük basınçta sıkıştırılan G1-1d numunesinin ki ise 11,62 cm olduğu tespit edilmiştir.

2.grupta G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek 2TVL kalınlık değeri selestit (S) tipi agreganın kullanıldığı ve %10 silis dumanı içeren numunelerde (G10 kodlu) numunesinde 11,59 cm olarak elde edilmiştir. Buna karşılık, en düşük kalınlık değeri ise kolemanit (K) tipi agregalı ve %10 silis dumanı içeren numunesinde (G11 kodlu) 2,28 cm olarak bulunmuştur.

2.grup olarak üretilen G9-G10-G11- G12-G13-G14 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit ve selestit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin 2TVL kalınlık değeri sırasıyla %9 ve %13 azaldığı tespit edilmiştir. Buna karşın kolemanit, manyetit, hematit ve limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numuneler de ise %19, %8, %2 ve %8 oranında artışa sebep olmuştur.

3.grupta G15-G16-G17-G18-G19 kodlu numuneler yer almaktadır. Bu grup içerisinde en yüksek 2TVL kalınlık değeri en yüksek barit ve selestit (B ve S) tipi agreganın kullanıldığı numunelerde (G15 kodlu) 13,58 cm, en düşük barit ve kolemanit (B ve K) tipi agrega ile üretilen numunelerde (G16 kodlu) 2,32 cm olarak bulunmuştur.

4.grupta G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler yer almaktadır. 2TVL kalınlık değeri en yüksek barit ve selestit (B ve S) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G20 numunesinde 12,15 cm, en düşük barit ve kolemanit (B ve K) tipi agrega ve %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen G21 numunesinde 3,05 cm olarak elde edilmiştir.

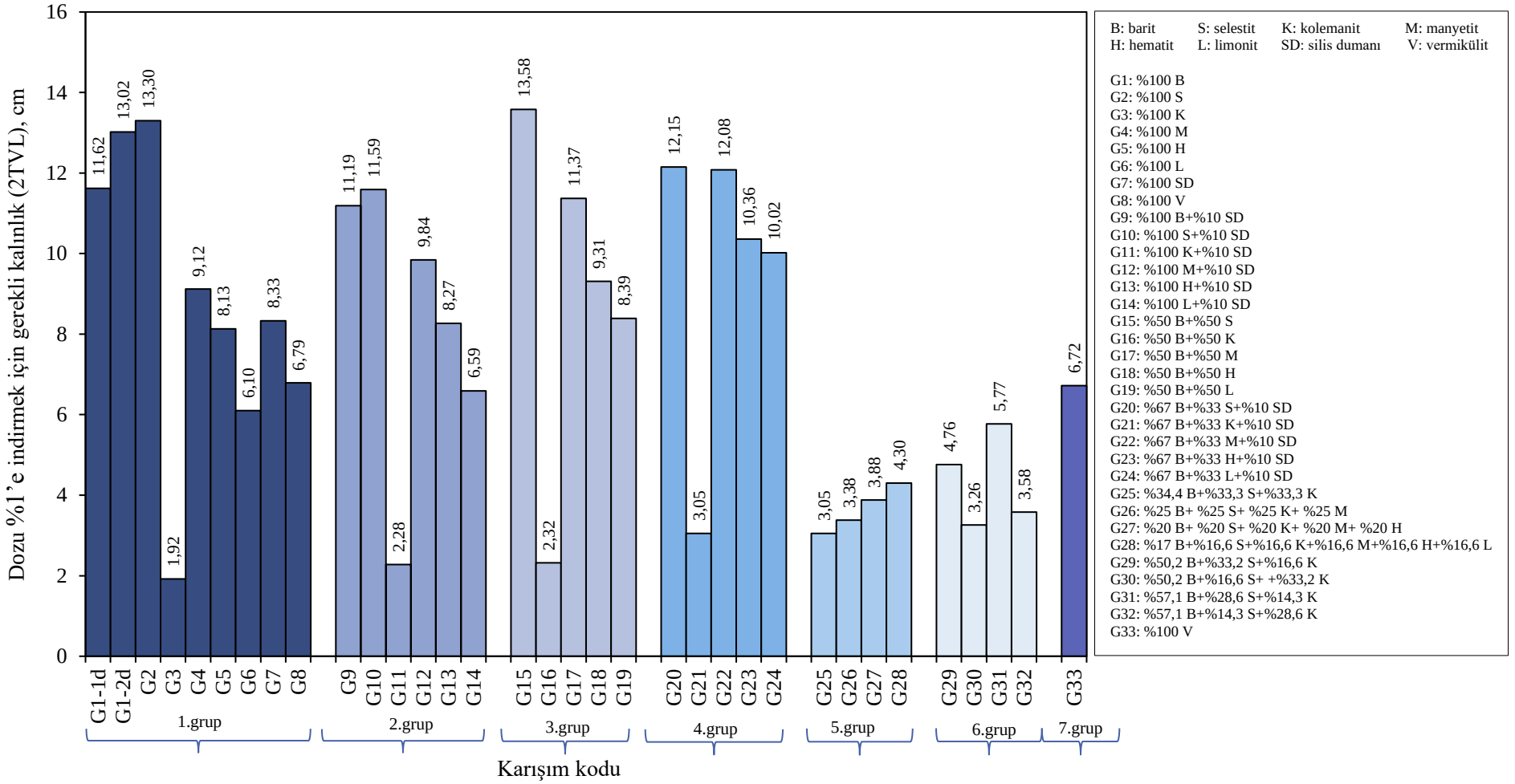
4.grup olarak üretilen G20-G21-G22-G23-G24 kodlu numuneler %10 silis dumanı içeren mineral katkı ilave edilerek üretilmiştir. Barit, kolemanit manyetit, hematit, limonit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerin TVL kalınlık değeri sırasıyla %31, %6, %11 ve %19 arttığı tespit edilmiştir. Buna karşın barit ve selestit agregaların kullanıldığı %10 silis dumanı ilave edilerek üretilen numunelerde ise 2TVL kalınlık değeri %11 azalmıştır.

5.grupta G25-G26-G27-G28 kodlu numuneler yer almaktadır. TVL kalınlık değeri en yüksek barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit ve limonit (B, S, K, M, H ve L) tipi agrega ile üretilen G28 numunesinde 4,30 cm, en düşük barit, selestit ve kolemanit (B, S ve K) tipi agrega ile üretilen G25 numunesinde 3,05 cm olarak elde edilmiştir. Numune üretiminde kullanılan barit oranının azalmasıyla beraber 2TVL kalınlık değerinin de arttığı sonucuna ulaşılmıştır.

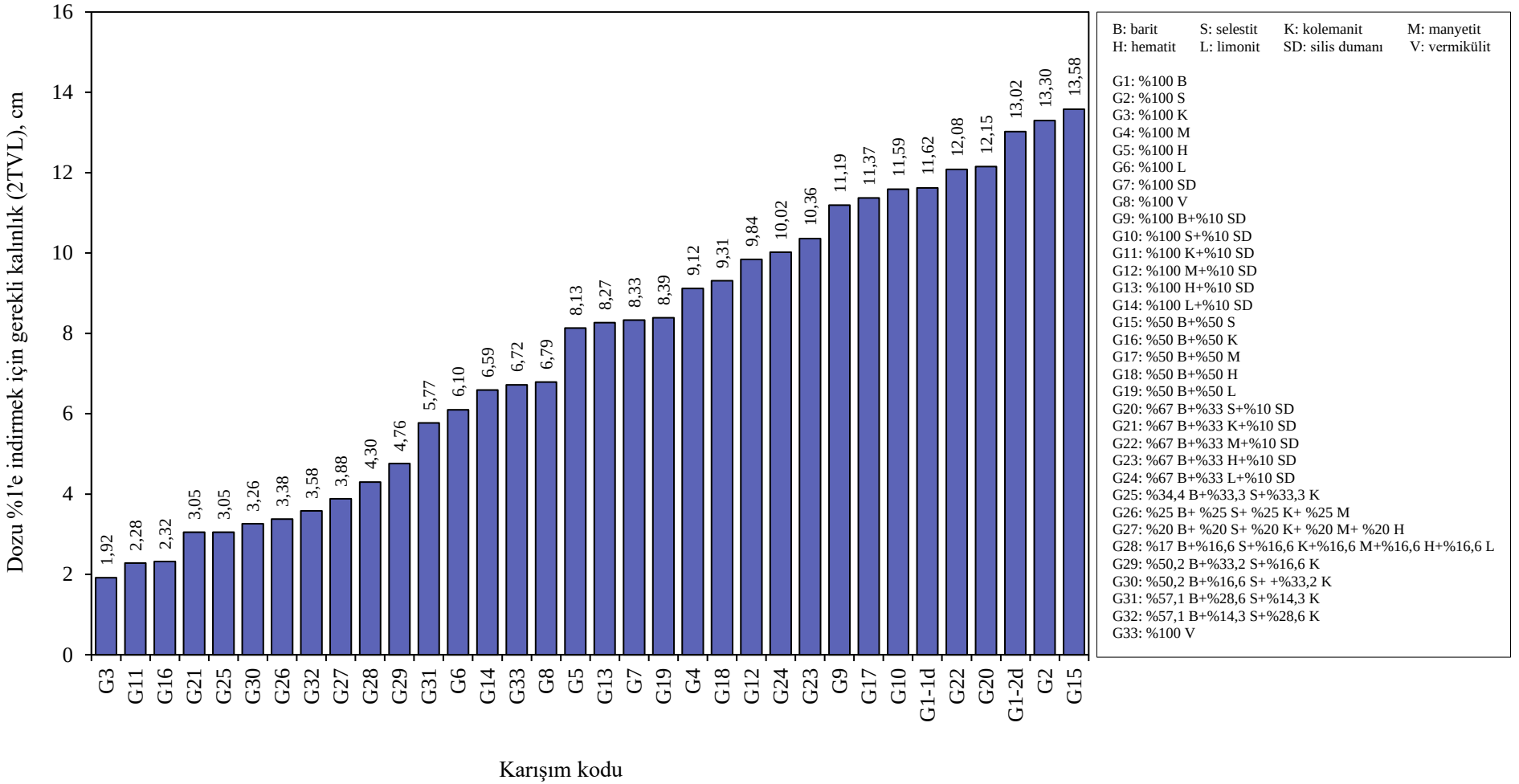
6.grupta G29-G30-G31-G32 kodlu numuneler yer almaktadır. Farklı oranlarda barit, selestit ve kolemanit agrega tipi ile üretilen numunelerde TVL kalınlık değeri en yüksek 5,77 cm (G31 kodlu) olarak elde edilmiştir. Buna karşılık en düşük katsayı ise 3,26 cm (G30 kodlu) olarak bulunmuştur.

Yalnız vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilmiş olan kompozit numunelerin (7.grup G33 kodlu) TVL kalınlık değeri 6,72 cm olarak elde edilmiştir. Buna karşılık aynı karışıma sahip sıkıştırılarak üretilen numunenin (1.grup G8 kodlu) yarı kalınlık değeri ise 6,79 cm belirlenmiştir.

Üretilen kompozit kaplama numunelerine ait 2TVL kalınlık sıralı değerleri Şekil 4.64'te verilmiştir. 2TVL değeri en düşük 100 bar basınç altında kolemanit agregası ile üretilen (G3 kodlu) numunelerde 1,92 cm olarak tespit edilmiştir. Radyasyon demeti şiddetini yüzde bir değerine düşüren zırhlama malzemesine özgü kalınlıkların (2TVL) 1,92-13,58 cm arasında değerler aldığı görülmektedir.



Şekil 4.63. Numunelerin termal nötron dozu %1'e indirmek için gerekli kalınlık değeri (2TVL)



Şekil 4.64. Numunelerin termal nötron dozu %1'e indirmek için gerekli kalınlık (2TVL) sıralı değeri

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu doktora çalışmasında 8 farklı agrega tipi (barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit, limonit, silis dumanı, vermikülit) ile üretilen çimento esaslı kompozitlerin kurşun madenine alternatif kaplama malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Burada amaç, 1 mm kurşuna eş değer olan en ince malzeme ile en iyi soğurma etkisini elde ederek radyasyona dayanıklı daha hafif bir kaplama malzemesi geliştirmektir. Literatürde genel olarak barit, selestit, kolemanit, manyetit, hematit ve limonit gibi malzemeler kullanılmış olsa da, bu çalışmada kullanılan malzemelerin tane boyutları küçük olması (0-1 mm) ve numunelerin ateş tuğla fabrikasında sıkıştırma yapılarak üretilmesi bu tür çalışmalar öncelik yapacak nitelikte olduğu söylenebilir. Farklı agrega tiplerinin numune üretiminde kullanılması ve çoklu agregalar ile karışımların oluşturulması, maksimum sıkıştırma ile maksimum birim hacim ağırlığın hedeflenmesi bu doktora tezinin özgünlüğünü oluşturmaktadır.

Bu çalışmada üretilen kaplama malzemesinin birim hacim ağırlığı yüksek, maliyeti daha düşük ve radyasyon tutuculuk performansları yüksek elde edildiğinde; ülke ekonomisine ciddi katkı sağlamasının yanında radyasyonun yaydığı çevresel ve biyolojik zararlı etkileri minimum seviyeye indirecektir. En uygun karışımın belirlenerek 1 mm kurşuna eş değer kaplama malzemesinin tespiti ile hastanelerin radyoloji ve onkoloji servisi odalarında, nükleer santrallerde ve saldırı anında oluşabilecek olası radyasyon sızıntısından korunmak amacıyla ticari bir ürün elde etme potansiyeli olan bir araştırmadır. Bu çalışma radyasyon geçirimliliğini azaltacak kaplama malzemelerinin üretilmesi açısından yeni malzemelerin araştırılması konusunda literatüre yön verecektir.

Ayrıca Ülkemizde son dönemlerde gündeme gelen Nükleer Enerji Santrallerinin kurulumu ile enerjide dışa bağımlılığı azaltmak ve daha ucuz enerji kullanımı hedeflenmektedir. Bu bağlamda Projenin hem gelecekçi hem de yenilikçi olması ile yeni araştırma konularının gündeme gelmesine ışık tutacak bir lisansüstü çalışması olarak değerlendirilebilir.

Çalışmadan elde edilen, fiziksel, mekanik özellikler ve X-, γ -ışını ve nötron radyasyon tutuculuk özellikleri kapsamında elde edilen sonuçlar ve sunulan öneriler aşağıda farklı başlıklar altında özet olarak verilmiştir.

5.1. Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

- Vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilen G33 kodlu numunenin porozite ve su emme oranı en yüksektir. Vermikülit doğal malzemeden üretilen polimer esaslı yapay hafif ve boşluklu agregalardır. Numunelerin içindeki mikro ve makro boşluklardan dolayı porozite ve su emme oranı yüksektir.
- Manyetit agregası ve %10 silis dumanı ile üretilen G12 kodlu numunenin porozite oranı en düşüktür. Silis dumanının çok ince taneli malzeme olmasından dolayı bolukları doldurarak porozite oranını düşürmüştür.
- Su emme oranı en düşük %50 barit ve %50 selestit agregası ile üretilen G15 kodlu numunede elde edilmiştir.
- Kuru birim hacim ağırlığı en yüksek %50 barit ve %50 selestit agregası ile üretilen G15 kodlu numunede 3,23 gr/cm^3 iken, en düşük kolemanit agregası ve %10 silis dumanı ile üretilen G11 kodlu numunede 0,88 gr/cm^3 olarak tespit edilmiştir.
- Isıl iletkenlik katsayısı en düşük vermikülit agregası ile elle sıkıştırılarak üretilen G33 kodlu numunede 0,294 W/Mk iken, en yüksek hematit agregası ve %10 silis dumanı ile üretilen G13 kodlu numunede 1,366 W/Mk bulunmuştur. Vermikülit oranı yüksek, birim hacim ağırlığı düşük olan silis dumanı, kolemanit gibi malzemeler ile üretilen numunelerin ısıl iletkenlik katsayıları daha düşük değerler aldığı için ısı yalıtımında kullanılabilir.
- Isıl iletkenlik katsayı en iyi değerler, yoğunluğu en düşük olan numunelerde (G8 ve G33 kodlu) görülmüştür.
- Eğilme dayanımı değeri en yüksek manyetit agregası ve %10 silis dumanı ile üretilen G12 kodlu numunede elde edilmiştir.
- 28 günlük eğilme dayanımı vermikülit ve kolemanit ile üretilen numunelerde azalma göstermiştir.
- 28 günlük basınç dayanımı değeri en yüksek hematit agregası ve %10 silis dumanı ile üretilen G13 kodlu numunede 79,8 MPa olarak elde edilmiştir. Silis dumanı harç içerisindeki kalsiyum hidrat (CH) ile reaksiyona girerek kalsiyum-silikat-hidrate (C-S-H) bağlayıcı jellerini oluşturur ve aynı zamanda harç içerisindeki boşlukları doldurarak basınç dayanımını arttırır.

- Basınç dayanımları %10 silis dumanı kullanılan numunelerde daha yüksek değerler elde edilmiştir.
- Yüksek basınçta sıkıştırılan ve birim hacim ağırlığı yüksek olan numunelerde basınç dayanımı değerleri daha yüksek elde edilmiştir.
- Hafif agrega ile düşük basınçlarda üretilen numunelerde basınç dayanımı değerleri daha düşük elde edilmiştir.

5.2. 150 Kev X-Işını Tutuculuk

- NISXCOM programından elde edilen teorik lineer ve kütle zayıflatma katsayısı en yüksek %100 barit agregası ile üretilen G1 kodlu numunelerde bulunmuştur.
- Deneysel kütle zayıflatma katsayısı en yüksek %50 barit ve %50 kolemanit agregası ile üretilen G16 kodlu numunede 0,5036 cm^2/g, en düşük %100 silis dumanı ile üretilen G7 kodlu numunede ise 0,1235 cm^2/g olduğu görülmektedir.
- Deneysel ve teorik olarak elde edilen kütle zayıflatma katsayı değerlerinde yakın sonuçlar elde edilmiştir. Literatürde yapılan benzer çalışmalarda olduğu gibi kütle zayıflatma katsayısı arasındaki bağıl farkın deney düzeneği, ölçüm hataları gibi değişkenlere bağlı olarak farklılık gösterebilmektedir.
- Deneysel lineer zayıflatma katsayısı en yüksek %100 barit agregası ve %10 silis dumanı ile üretilen G9 kodlu numunelerde 1,5473 cm^{-1}'dir. Barit oranı yüksek olan numunelerde lineer zayıflatma katsayısı değerleri yüksek elde edilmiştir. Bunun nedeni zayıflatma katsayısının enerjinin dalga boyu ve atom numarası ile (barit, Z=82) artmasıdır.
- Teorik ve deneysel Lineer zayıflatma katsayı değeri en düşük vermikülit ve kolemanit tipi agrega ile üretilen numunelerde elde edilmiştir. Lineer zayıflatma katsayısı ile üretilen kaplama numuneleri yoğunluğu arasında doğru orantı olduğu belirlenmiştir.
- HVL ve 2TVL değeri en düşük barit agregası ile üretilen numunelerde, en yüksek ise vermikülit agregası ile üretilen numunelerde tespit edilmiştir.
- Barit oranı arttıkça HVL ve 2TVL değerinin ters orantılı olarak azaldığı görülmektedir.
- Barit agregalı kaplama numunelerinin daha soğurgan oldukları tespit edilmiştir.
- Kolemanit oranının artmasıyla HVL ve 2TVL değeri de artmaktadır.

- 1 mm kurşun eş değeri dozu (I) %11,4'e düşüren en düşük kalınlık %100 selestit agregası ve %10 silis dumanı ile üretilen numunede (G10 kodlu)14,68 mmPb olarak bulunmuştur.
- 1 mm kurşun eş değeri dozu (I) %11,4'e düşüren en yakın değerler barit ve selestit ile üretilen numunelerde olduğu görülmektedir.
- 1 mm kurşun eş değeri dozu (I) %11,4'e düşüren kalınlık değeri en yüksek vermikülit ve kolemanit agregası ile üretilen numunelerde bulunmuştur.
- Numunelerin yoğunluğu ve atom numarası (Barit Z=56, Selestit Z=38) arttıkça kurşun eş değer kalınlıkları azalmaktadır.
- Porozite oranı yüksek olan numunelerin 1 mm kurşun eş değer kalınlıkları daha büyük elde edilmiştir.

5.3. 662 Kev γ-Işını Tutuculuk

- NISXCOM programından elde edilen teorik kütle zayıflatma katsayısı en yüksek barit, selestit ve kolemanit agregası ile üretilen numunelerde 0,7762 cm^2/g (G30 kodlu) ve lineer zayıflatma katsayısı en yüksek barit ve hematit agregası ile üretilen numunelerde 2,3389 cm^{-1}(G18 kodlu) olarak bulunmuştur.
- Deneysel kütle zayıflatma katsayısı en yüksek %100 kolemanit agregası ve %10 silis dumanı ile üretilen G11 kodlu numunede 0,1500 cm^2/g, en düşük %100 barit ile üretilen G1-2d kodlu numunede ise 0,0664 cm^2/g olduğu görülmektedir.
- Deneysel ve teorik olarak elde edilen kütle zayıflatma katsayı değerleri birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir.
- Deneysel lineer zayıflatma katsayısı en yüksek %100 barit agregası ve %10 silis dumanı ile üretilen G9 kodlu numunelerde 0,2347 cm^{-1}'dir. Barit ve selestit oranı yüksek olan numunelerde lineer zayıflatma katsayısı da yüksek elde edilmiştir. Bunun nedeni zayıflatma katsayısının enerjinin dalga boyu ve atom numarası ile (barit, Z=82) artmasıdır.
- Teorik ve deneysel lineer zayıflatma katsayı değeri en düşük vermikülit ve kolemanit tipi agrega ile üretilen numunelerde olduğu görülmektedir.
- HVL ve 2TVL değeri en düşük barit agregası ile üretilen numunelerde, en yüksek ise vermikülit agregası ile üretilen numunelerde bulunmuştur.

- Barit oranı arttıkça HVL ve 2TVL değerinin ters orantılı olarak azaldığı görülmektedir.
- Barit ve selestit agregalı kaplama numunelerinin daha soğurgan oldukları görülmektedir.
- Kolemanit ve silis dumanı oranının artmasıyla HVL ve 2TVL değeri de artmaktadır.
- 1 mm kurşun eş değeri dozu (I) %88,9'a düşüren en düşük kalınlık %100 selestit agregası ve %10 silis dumanı ile üretilen numunede (G9 kodlu) 5,00 mmPb olarak bulunmuştur.
- 1 mm kurşun eş değeri dozu (I) %88,9'a düşüren en yakın değerler barit ve selestit ile üretilen numunelerde olduğu görülmektedir.
- 1 mm kurşun eş değeri dozu (I) %88,9'a düşüren kalınlık değeri en yüksek vermikülit ve kolemanit agregası ile üretilen numunelerde bulunmuştur.
- Numunelerin yoğunluğu ve atom numarası (Barit Z=56, Selestit Z=38) arttıkça 1 mm kurşun eş değer kalınlıkları azalmaktadır.
- Porozite oranı yüksek olan numunelerin 1 mm kurşun eş değer kalınlıkları daha büyük değerler almıştır.

5.4. Termal Nötron Tutuculuk

- Kütle zayıflatma katsayısı en yüksek %100 kolemanit agregası ve %10 silis dumanı ile üretilen G11 kodlu numunede 2,2960 cm^2/g, en düşük %50 barit ve %50 selestit agregası ile üretilen G15 kodlu numunede ise 0,1055 cm^2/g olduğu görülmektedir.
- Lineer zayıflatma katsayısı en yüksek %100 kolemanit agregası ile üretilen G3 kodlu numunelerde 2,4003 cm^{-1} olarak bulunmuştur.
- Kolemanit oranının artması ile nötron soğurganlık özelliğinin de arttığı tespit edilmiştir. Bu nedenle kolemanit agregalı kaplama numunelerinin nötron soğurması için iyi bir zırh olabileceği ifade edilmiştir.
- HVL, TVL ve 2TVL değeri en düşük kolemanit agregası ile üretilen numunelerde (G3 kodlu), en yüksek ise barit ve selestit agregası ile üretilen numunelerde (G15 kodlu) elde edilmiştir.

- Kolemanit oranının azalması ile HVL, TVL ve 2TVLdeğerlerinde artış görülmektedir.

Sonuç olarak, radyasyon tutucu bir malzeme olarak günümüzde en yaygın olarak kullanılan kurşun yerine kurşun ile eşdeğer bir koruma sağlayan çimento esaslı kaplama malzemeleri üretilerek yapı malzemesi sektörüne katkı sağlanması hedefi gerçekleştirilmiştir. Bu tür malzemelerin geliştirilmesi Ülkemize Ar-Ge ve ekonomik anlamda büyük katkılar sağlamaktadır. Bu araştırma kapsamında yapılan çalışmaların sonraki çalışmalara katkı sağlayacağı ve çimento veya polimer bağlayıcı esaslı yeni malzemelerin üretimine önemli fikirler sunacağı beklenmektedir. Bu araştırma sonucunda elde edilen deneysel verilerin iyi bir şekilde irdelenmesi daha yüksek radyasyon tutuculuk özelliğe sahip farklı malzemelerin üretilmesine imkan sağlayacaktır. Radyasyon tutuculuğu sahip kurşun alternatifi malzemelerin elde edilmesi ile ilgili çalışmalar bugün olduğu gibi uzun yıllar güncelliğini koruyacaktır.

KAYNAKLAR

A.Mozumder. (1999). Fundamentals of Radiation Chemistry. California: Academic Press.

Abdo, E.-S. (2002). Calculation of the cross-sections for fast neutrons and gamma-rays in concrete shields. Annals of Nuclear Energy, 29(16), 1977-1988.

Abdo, A. E., Kansouh, W. A. and Megahid, R. M., 2002. Investigation of radiation attenuation properties for baryte concrete, Jpn. J. Appl. Phys., 41, 7512–7517.

Akıllı, V. (2019). Bizmut Oksit- Kurşun Klorür-Tellür Oksit Sisteminin Isıl, Optik ve Yapısal Açıdan İncelenerek Camlaşma Davranışlarının Belirlenmesi ve Camların Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Akkaş, A. (2015). Alüminyum-Bor-Karbür Kompozit Malzemelerin Radyasyon Karşiısındaki Davranışının Belirlenmesi, XCOM Bilgisayar Programı ile İncelenmesi ve Yeni Bir Hibrit Kompozit Radyasyon Zırh Malzemesi Önerisi. İstanbul Teknik Üniversitesi , Enerji Bilim ve Teknoloji Ana Bilim Dalı. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü.

Akkurt, I., Kilincarslan, S., Basyigit, C., 2004. The Photon Attenuation Coefficients of Barite, Marble and Limra. Annals of Nuclear Energy, 31: 577-582.

Akkurt, I., Akyildirim, H., Ozdemir, A.F., Aldemir, D.A., 2010a. Neutron irradiation effects on I – V characteristics of Au/n-GaAs Schottky diodes. Radiation Measurements, 45(10), 1381-1383.

Akkurt, I., Akyildirim, H., Mavi, B., Kilinçarslan, S., Basyigit, C., 2010b. Gammaray shielding properties of concrete ıncluding barite at different energies. Progress in Nuclear Energy, 52, 620–623.

Akkurt, I., Akyildirim, H., Mavi, B., Kilinçarslan, S., Basyigit, C., 2010c. Photon attenuation coefficients of concrete ıncludes barite in different rate. Annals of Nuclear Energy, 37, 910-914.

Akkurt, I., Basyigit, C., Kilincarslan, S. and Mavi, B., (2005). The shielding of γ-rays by concretes produced with barite, Prog. in Nucl. En., 46(l), 1-11.

Akkurt, İ., Başyiğit, C., Kilinçarslan, S., & B. Mavi, A. A. (2006). Radiation shielding of concretes containing different aggregates. Cement & Concrete Composites, 28(2), 153-157.

Akman, S., 1987. Yapı malzemeleri, İ.T.Ü. İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

Akyıldırım, H. (2011). Ağır Betonların Nükleer Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fizik Ana Bilim Dalı. Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Akyüz, E., 2013. Kür Sıkıştırma, Sıcaklık ve Yağış Koşullarının Beton Basınç Dayanımına Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane: Fen Bilimleri Enstitüsü.

Artığ, B. (2016). Pandermit, Kolemanit Konsantratör Atığı, Hematit, Manyetit ve Limonit İçeren Beton Numunelerinin Nötron Parçacıkları, X ve gama Işınları İçin Radyasyon Soğurganlıklarının Belirlenmesi. Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Kimya Ana Bilim Dalı. Van: Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Artığ, B. (2016). Pandermit, Kolemanit Konsantratör Atığı, Hematit, Manyetit ve Limonit İçeren Beton Numunelerinin Nötron Parçacıkları, X ve γ-Işınları İçin Radyasyon Soğurganlıklarının Belirlenmesi. Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Kimya Ana Bilim Dalı. Van: Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

ASTM C-125, 1994. Standard terminology relating to conc-rete and concrete aggregates, Annual book of ASTM standards.

ASTM C-618, 1994. Standard specifications for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in Portland cement concrete, Annual book of ASTM standards.

Atakan, Y. (2014). Radyasyon ve Sağlığımız. Ankara: Nobel Yayınları.

Awadallah, M. I. and Imran, M. M. A., 2007. Experimental investigation of γ - ray attenuation in Jordanian building materials using HPGe - spectrometer, J. of Enviro. Rad., 94, 129-136.

Bakırhan, E. (2017). Kurşun Maden Atığı Katkılı Ağır Betonların Radyasyon Soğurma Katsayılarının 662-1460 keV Enerji Aralığında İncelenmesi. Gümüşhane Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı. Gümüşhane: Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Bakos, G. C., 1999. Direct energy generation from - radiation, Ann. of Nucl. En., 26, 69-73.

Baradan, B. 1996. Yapı malzemesi II, D. E. Ü. , Müh. Fak. Yay., No: 207.

Bashter, I. I., Makarious, A. S. and Abdo, A. E., 1996a. Investigation of hematite-serpentine and ilmenite - limonite concretes for reactor radiation shielding, Ann. of Nucl. En., 23(1), 65-71.

Bashter, I. I., Abdo, A. E. and Makarious, A. S., 1996b. A comparative study of the attenuation of reactor thermal neutrons in different types of concrete, Ann. of Nucl. En., 23(14), 1189-1195.

Bashter, I. (1997). Calculation of Radiaton Attenuation Coefficients for Shielding Concretes. Annals of Nuclear Energy, 24(17), 1389-1401.

Bashter, I. I., Abdo, A. E., Abdel-Azim, M. S., 1997. Magnetite ores with steel or basalt for concrete radiation shielding, Jpn. J. of Appl. Phys. Part1, 36(6A), 3692-3696.

Baştürk M, Arztmann J, Jerlich W, Kardjilov N, Lehmann E, Zawisky M (2005) Analysis of neutron attenuation in boron-alloyed stainless steel with neutron radiography and JEN-3 gauge. J Nucl Mater 341:189-200

Bayvas, F. (1989). Radyoaktivite Radyasyon ve Nükleer Enerji. Ankara.

Biber Temircik, Ş. (2015). Yapı malzemelerin radyasyon geçirgenliği ve mühendislik özelliklerinin araştırılması. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fizik Ana Bilim Dalı.

Binici, H., Sevinç, A. H., & Geçkil, H. (2015). Atık Demir Tozu Katkılı Harç ve Betonların Durabilite ÖzellikleriÇukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(1), 1-16.

Borst, L. B., 1955. Concrete radiation shielding means, United States Patent Office, Patented Dec., 6, 2726339.

Coşkun, A. (2010). Ağır Betonlarda Barit Agregasının Kullanımı ve Beton Özelliklerinin Araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi , Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalı. Afyon: Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Çevikbaş, G. (2014). Aluminyum Titanat/Spinel'in Radyasyon Karşısındaki Davranışının İncelenmesi ve Değerlendirilmesi. İstanbul Teknik Üniversitesi , Nükleer Araştırmalar Ana Bilim Dalı. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü.

Çubukçu, M. (2018). Kocaeli İli Karadeniz Sahilleri Toprak Numunelerinden Radyasyon Seviyelerinin Ölçülmesi. Kocaeli Üniversitesi , Fizik Ana Bilim Dalı. Kocaeli: Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

De Buda, F. (1987). Method for recovery and conversion of strontium sulfate to strontium carbonate from low and medium grade celestite ores. US Patent No. 4,666,688. Excel-Mineral Company.

Demir, F., 2008. Radyasyon Güvenliği için Ağır Betonlar, Ulusal Nükleer veya Radyolojik Kaza veTehlike Durumu Yönetimi Sempozyumu, 68, GATA, Ankara.

Demir, F. (2009). Bor ve Barit Agregalı Ağır Betonların Nötron Parçacıkları, X- ve γ-Işınları İçin Radyasyon Soğurganlıklarının Belirlenmesi. Atatürk Üniversitesi , Fizik Bilim Ana Bilim Dalı. Erzurum: Atatürk Üniversitesi Fen Blimleri Enstitüsü.

Demir, F., Budak, G., Şahin, R., Karabulut, A., Oltulu, M., Un, A., Determination of radiation attenuation coefficients of heavyweight and normal-weight concretescontaining colemanite and barite for 0.663 MeV γ- rays, Annals of Nuclear Energy, 38(6):1274–1278, 2011.

Demiryuğuran, A. T. (2018). Kastamonu İli Doğanyurt-Cide İlçeleri Toprak ve Sahil Kumu Numunelerindeki Doğal Radyasyon Seviyesinin Belirlenmesi. Kastamonu Üniversitesi , Fizik Ana Bilim Dalı. Kastamonu: Kastamonu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Doğan, H., Koral, M., Kocakusak, S., (2004). Acid leaching of Turkish celestite concentrate, Hydrometallurgy, 71, 379–383

EFNARC, (2002). Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems, Norfolk, UK.

Elden, S. (2011). Çok Hafif Yalıtım Betonlarının Mekanik ve Isıl İletkenlik Özellikleri, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 61 s.

El-Sayed Abdo, A., (2002). "Calculation of the cross-sections for fast neutrons and gamma-rays in concrete shields", Ann. Nucl. Energy, 29(16):1977–1988.

Erdoğan, T. Y., 2003. Beton, Metu Press, Ankara.

Erdoğan, T. Y. (2013). Beton. ODTÜ Geliştirme Vakfı Yayıncılık ve İletişim A.Ş. Yayını, Ankara, 757 s.

Filiz, M., Gençel, O., Özel, C., & Sancak, E. (2008). Hematit Agregalı Betonun Radyasyon Önlemede Kullanımının Araştırılması. Uluslararası Hazır Beton Kongresi Bildirileri Kitabı, (s. 635-644). İstanbul.

Frigerio, N. A. (1971). Vücudumuz ve Radyasyon. (N. Eray, Çev.) Ankara: Atom Enerjisi Komisyonu Yayınları.

Gençel, O., (2009). Hamile Ratlarda Oksidatif Strese Neden Olan Radyasyona Karşı Kolemanitli Betonun Koruyucu Etkisinin Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Müh. Ana Bilim Dalı, Isparta.

Gordus A.A.(1967). Quantitative Non-destructive Neutron Activation Analysis of Silver in Coins. Archaeometry, 10(1), pp78-86.

Gökçe, H. S. (2018). Yüksek Kıvama Sahip Barit Agregalı Ağır Betonların Segregasyon Özellikleri ve Gama Işını Soğurma Katsayılarının Belirlenmesi. Ege Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı. İzmir: Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Gülbiçim, H. (2015). Saf ve Bor Katkılı Vermikülitin Gama Radyasyon Geçirgenliğinin

Belirlenmesi. On Dokuz Mayıs Üniversitesi, Fizik Ana Bilim Dalı. Samsun: On Dokuz Mayıs Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Gündüz, G., 1980. Kolemanit, barit ve polimer kullanarak nükleer ışınlara karşı yeni zırhlama malzemelerinin yapımı, O.D.T.Ü. Müh. Fak., Doçentlik Tezi, Ankara.

Gündüz, G. and Usanmaz A., 1986. Development of new nuclear shielding materials containing vitrified colemanite and impregnated polymer, J. of Nucl. Mat., 140, 44-45.

Güyagüler. T. (2001). Türkiye Bor Potansiyeli, 4 Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu, s. 18-27, 18-İ910 2001, İzmir.

Hausner, H. H. (1968). Iron Powder Metallurgy. Springer-Science+Business Media.

Helvacı, M. (2011). Edirne'de İyonlaştırıcı Radyasyon Kaynakları İle Çalışan Sağlık Personelinin Radyasyon Güvenliği Konusunda Bilgi Düzeyleri ve Tutumları. Trakya Üniversitesi , Halk Sağlığı Ana Bilim Dalı. Edirne: Trakya Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü.

İnternet: Fabre Minerals The Best of Minerals for tha Quality Collector. http://www.fabreminerals.com/LargePhoto.php?FILE=specimens/s_imagesG3/MT98G3f.jpg&CODE=MT98G3&NAME=Barite&LANG=EN, Son Erişim Tarihi: 01.05.2021.

İnternet: Lime House. Mineraller, Limonit. https://tr.limehousetownhall.org.uk/581-limonite.html, Son Erişim Tarihi: 26.05.2021.

Işıkgül, O. 2012. Tufalin Demir Cevheri Konsantresi ile Karıştırılarak Pelet Üretiminde Kullanılabilirliğinin ve İndirgenebilirliğinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul: İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.

Kaçar, A. (2006). Yapılarda Radyasyon Kalkanı Olarak Kullanılan Barit Agregalı Ağır Beton Elemanların Zırh Kalınlık Hesaplarının Belirlenmesi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Yapıeğitimi Ana Bilim Dalı. Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü.

Kalyon, M. (2019). Radyasyon İçeren Birimlerin Zırhlanmasında Kullanılan Farklı Tipteki Betonların Radyasyon Güvenliği ile İş Sağlığı ve Güvenliği Açısından İncelenmesi. Üsküdar Üniversitesi, İş Sağlığı ve Güvenliği Ana Bilim Dalı. İstanbul: Üsküdar Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü.

Karakuza, A. (2007). Kimyasal Etkilerin Betonların Radyasyon Zırhlama Özellikleri Üzerine Etkisinin Araştırılması. Süleyman Demirel Üniversitesi , Fizik Ana Bilim Dalı. Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Keçeci, A. (2018). Kendiliğinden Yerleşen Betonlarda Silis Dumanı Kullanımının Beton Basınç Dayanımına ve Aderansa Etkileri. Konya Teknik Üniversitesi, İnşaat

Mühendisliği Ana Bilim Dalı. Konya: Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Bilimleri Enstitüsü.

Kılınçarslan, Ş., 2004. Barit agregalı ağır betonların radyasyon zırhlanmasındaki özellikeri ve optimal karışımlarının araştırılması, Doktora Tezi, S.D.Ü., Fen Bil. Ens., Isparta.

Kılınçarslan, S., Akkurt, I. and Basyigit, C., 2006. The effect of barite rate on some physical and mechanical properties of concrete, Mat. Sci. and En. A., 424, 83– 86.

Korkut, T., Ün, A., Demir, F., Karabulut, A., Budak, G., Şahin, R., & Oltulu, M. (2010). Neutron dose transmission measurements for several new concrete samples including colemanite. Annals of Nuclear Energy, 37(7), 996-998.

Kuş, A. (2017). Sakarya İli Toprak Örneklerinde Doğal Radyasyon Düzeyinin Belirlenmesi ve Radon Yayılım Hızlarının Ölçülmesi. Sakarya Üniversitesi, Fizik Ana Bilim Dalı. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Larousse, M. (1969). Bor (Cilt 5). İstanbul: Meydan Yayınevi.

Larousse, M. (1969). Hematit (Cilt 5). İstanbul: Meydan Yayınevi.

Larousse, M. (1969). Vermikülit (Cilt 5). İstanbul: Meydan Yayınevi.

Lokan, K.H., Sherman,N.K., Gellie, R.W., Henry, W.H., Levesque, R., Nowak, A., Teather, G.G., 1971. Bremsstrahlung Attenuation Measurements in Ilmenite Loaded Cocretes, Natioanal Research Council of Canada. 12201, Ottawa. MTA. (2019, 09 17). Barit. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Resmi Web Sitesi: http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/barit adresinden alınmıştır

Makarious A. S., Bashter I. L, El-Sayed Abdo, A., Samir Abdel Azim, M., and Kansouh W. A., 1996. On the utilization of heavy concrete for radiation shielding, Ann. of Nucl. En., 23, 195-206.

Meyer, B., 1989. Heavyweight Concrete. A Structural Engineering Contrubition Towards Radiation Protection Almost Playful Dealings with Concrete Technology, Cement-Bulletin, 57, 23, 1-12

MTA. (2019, 09 17). Hematit. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü Resmi Web Sitesi: http://www.mta.gov.tr/v3.0/bilgi-merkezi/barit adresinden alınmıştır

Mutlu, A., 2020. Agrega Tipinin Çimento Esaslı Kompozitlerin Radyasyon Tutuculuk Özelliğine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Bozok Yozgat Ü., Fen Bil. Ens., Yozgat.

Nazlı, T. (2018). Genleştirilmiş Vermikülit Tozu İle Modifiye Edilmiş Çimento Esaslı Harçların Yüksek Sıcaklık Dirençleri. Bozok Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı. Yozgat: Yozgat Bozok Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Nuclear -Chicago Corp., (1960). Analytical Chemistry, 32 (10),pp107A.Ober, J. A. (2002). Strontium. U.S. Geological Survey Minerals Yearbook, 74, 1-7.5.

Onur, S., 2002. Gama radyasyonu zırhlaması amacıyla farklı betonların değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul.

Oto, B. (2012). Barit, Manyetit, Bazı Mor Mineralleri ve Atıklarını İçeren Beton Numunelerin Gama Radyasyon Soğurganlıkları ve Nötron Tutma Kapasitelerinin Araştırılması. Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Kimya Ana Bilim Dalı. Van: Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Önen, S. (1993). Radyasyon Biyofiziği. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Cerrahpaşa Tıp Fakültesi.

Özavcı, S. (2017). Farklı Katkılanmış Betonların Radyasyon Zırhlama Üzerine Etkileri. Amasya Üniversitesi, Fizik Ana Bilim Dalı. Amasya: Amasya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Özcan, F. (2005). Silis Dumanı İçeren Harç ve Betonların Özellikleri ve Hızlandırılmış Kür ile Dayanım Tahmini. Çukurova Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Özkan, Ş. G., Çebî, H., Delice, S., & Doğan, M. (1997). Bor Minerallerinin Özellikleri ve Madenciliği. 2 Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu (s. 224-228). İzmir: Etibank Bor Araştırma Merkezi.

Öztoprak, A. (2007). Toz Metalurjisi ve Sıcak Presleme. Erciyes Üniversitesi, Makine Mühendisliği. Kayseri: Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi.

Sevinç, A. H. (2011). Barit, Bazaltik pomza, Kolemanit ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Harçların ve Betonların Mühendislik Özellikleri. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı. Kahramanmaraş: Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Sezer, R., Hızlı, İ. G., Bilen, A., Ertürk, S., Arslan, C. (2017). Effect of Mechanical Activation on Roastingof Celestite Ore. Yer Altı Kaynakları Dergisi (Journal of Underground Resources). 6 (11), 53–59.

Shams, T., Eftekhar, M., & Shirani, A. (2018). Investigation of gamma radiation attenuation in heavy concrete shields containing hematite and barite aggregates in multi-layered and mixed forms. Construction and Building Materials, 182, 35-42.

Sharifi, S., Bagheri, R., & Shirmardi, S. P. (2013). Comparison of shielding properties for ordinary, barite, serpentine and steel-magnetite concretes using MCNP-4C code and available experimental results. Annals of Nuclear Energy(53), 529-534.

Singh, C., Singh, T., Kumar A., Mudahar GS., 2004a. Energy and chemical composition dependence of mass attenuation coefiicients of building materials Materials, Ann.

of Nucl. En. 31, 1199-1205.

Singh, N., Singh, K. J., Singh, K. and Singh, H., 2004b, Comparative study of lead borate and bismuth lead borate glass systems as gamma-radiation shielding materials, Nucl. Inst. and Meth. in Phys. Res. B., 225, 305-309.

Simnad, M. T.,2001. Nuclear Reactors: Shielding Materials, Encyclopedia of Materials: Sci. and Tech., 6376-6384.

Sofyalı, Ö. Ö. (2015). Silis Dumanı Katkılı Geri Kazanılmış Agregalı Betonların Özelliklerinin İncelenmesi. Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaa Mühendisliği Ana Bilim Dalı. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Şeker, S., & Çerezci, O. (2000). Radyasyon Kuşatması. İstanbul: Boğaziçi Üniversitesi Yayınevi.

TAEK. (2009). Radyasyon, İnsan ve Çevre. Ankara: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu.

Tafraoui, A., Escadeillas, G., Lebaili, S. ve Vidal, T. (2009). "Metakaolin in the formulation of UHPC", Constr. Build. Mater., 23(2):669–674.

Taşkın, H. (2018). İzmir İli Fon Radyasyon Düzeylerinin Belirlenmesi, İnsan Sağlığı Üzerine Etkilerinin Değerlendirilmesi ve Coğrafi Bilgi Sistemleri Aracılığı ile Dağılımın Gösterilmesi . İstanbul Üniversitesi , Halk Sağlığı Ana Bilim Dalı. İstanbul: İstanbul Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü.

Togay, Y. E. (2002). Radyasyon ve Biz. Ankara: Türkiye Atom Enerjisi Kurumu Radyasyon Sağlığı ve Güvenliği Dairesi.

Tokay, H. (2019). Vermikülit ve Uçucu Kül Katkılı Geopolimer Harç Üretilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bartın, 51 s.

Toksoy, F. (1997). Vermikülit: Mineraloji, Jeolojik Oluşum, Endüstriyel Kullanım ve Türkiye'dekiDurumu, 2. Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu,16-17 Ekim, İzmir, Türkiye.

Topçu, İ. B. (2006). Beton. Eskişehir: İnşaat Mühendisleri Odası Eskişehir Odası Yayınları.

Topçu, İ. B. ve Karakurt, C., 2002. Ağır betonlar, T.M.O. Eskişehir Şubesi Bülteni, 6 (14),15-19.

TS ISO 8302, Isı Yalıtımı -Kararlı Halde Isıl Direncin ve İlgili Özelliklerin Tayini - Mahfazalı Sıcak Plaka Cihazı,Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2002.

TS EN 196-1, Çimento Deney Metotları - Bölüm 1: "Dayanım Tayini", Türk Standartları Enstitüsü, 16-18, (2009).

TS EN 197-1, “Çimento - Bölüm 1: Genel Çimentola- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri”, Türk Standartları Enstitüsü, 2-15, (2002).

TS EN 61331-1, (2015). Tıpta teşhis amaçlı kullanılan x-Işınına karşı koruyucu cihazlar - Bölüm 1: Malzemelerin zayıflatma özelliklerinin belirlenmesi, TSE, Ankara.

Tschirf, E., 1976. Concrete as a shielding material against x-rays, gamma and Neutron, Zement-und-Beton, 21 (5) 240-244.

Turner, J. E. (2007). Atoms, Radiation, and Radiation Protection. Weinheim: WILEY-VCH Verlag Gmbh & Co.

Tüfekçi, M. M. (2017). Ultra Yüksek Performanslı Çimento Esaslı Ağır Kompozit Malzemelerin Radyasyon Zırhlama Özelliklerinin Araştırılması. Yıldız Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

UNEP. (2016). United Nation Environment Programme Radiation Effects and Sources. UNEP.

Vanvor, D., 2003. Antiradiation concrete and antiradiation shell, United States Patent Office, Patented Date Oct. 7, US 6630683 B2.

Yarar, Y., 1994. Kolemanitli Betonların Nötron Zırhlanma Etkinliğinin ve aktivitesinin incelemesi, Doktora Tezi, İ.T.Ü., Nükleer Enerji Enstitüsü, İstanbul.

Yaren, H., & Karayılanoğlu, T. (2005). Radyasyon ve İnsan Sağlığı Üzerine Etkileri. TSK Koruyucu Hekimlik Bülteni, 4(4), 199-208.

Yavaşi, H. (2018). Öğütülmüş Pirit, Krom ve Magnetit İlaveli Harçların Mekanik ve Radyasyon Soğurma Özelliklerinin Tayini. Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı. Rize: Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yeğinobalı, A. (2009). Silis Dumanı ve Çimento ile Betonda Kullanımı (6. b.). Ankara: Türkiye Çimento Mühtahsilleri Birliği.

Yiğit Z., (1996). Endüstriyel Atık Malzemesi Olan Kâğıt ile Bor Elementi Kullanılarak Nötron Zırhlamasında Etkili bir Zırh Geliştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi, İTÜ.

Yılmazer, B. (2009). Muş Yöresinden Temin Edilen Barit’ in Kullanımı İle Elde Edilen Ağır Betonun Fiziksel Ve Mekaniksel Özelliklerinin Araştırılması. Fırat Üniversitesi, Yapı Eğitimi Ana Bilim Dalı. Elazığ: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Zorağa, M. (2009). SrSO4'(Selestit)'in Karbonatlı Çözeltide Çözündürülmesi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 66 s.

EKLER

EK-1. Üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numuneleri



Şekil Ek 1.1. 1. grup (G1-G2-G3-G4-G5-G6-G7-G8) numuneleri

EK-1. (devam) Üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numuneleri



Şekil Ek 1.2. 2. grup (G9-G10-G11-G12-G13-G14) numuneleri

EK-1. (devam) Üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numuneleri



Şekil Ek 1.3. 3. grup (G15-G16-G17-G18-G19) numuneleri

EK-1. (devam) Üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numuneleri



Şekil Ek 1.4. 4. grup (G20-G21-G22-G23-G24) numuneleri



Şekil Ek 1.5. 5. grup (G25-G26-G27-G28) numuneleri

EK-1. (devam) Üretilen çimento esaslı kompozit kaplama numuneleri



Şekil Ek 1.6. 6. grup (G29-G30-G31-G32) numuneleri

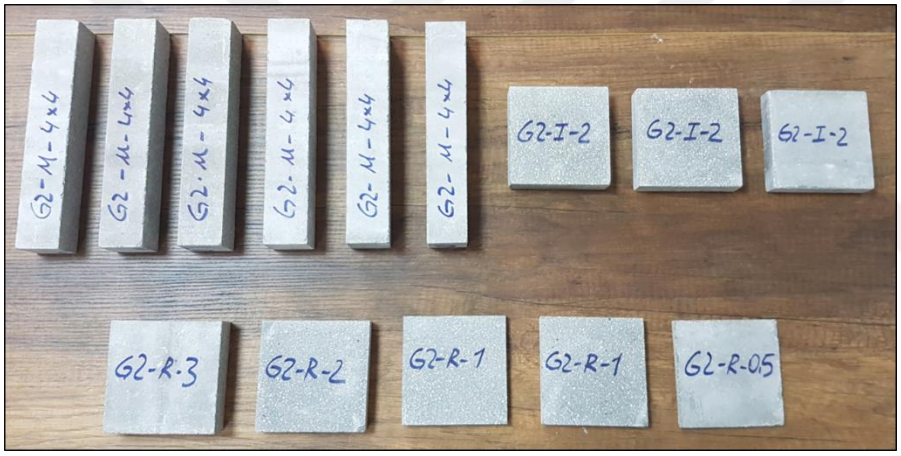


Şekil Ek 1.7. 7. Grup (G33) numuneleri

EK-2. Kesim işlemi yapılan çimento esaslı kompozit kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.1. G1 kodlu kaplama numuneleri

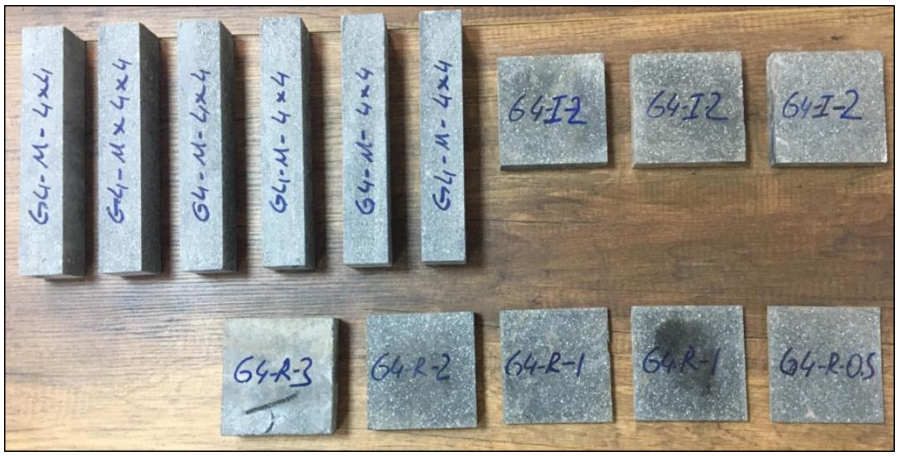


Şekil Ek 2.2. G2 kodlu kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.3. G3 kodlu kaplama numuneleri

EK-2. (devam) Kesim işlemi yapılan çimento esaslı kompozit kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.4. G4 kodlu kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.5. G5 kodlu kaplama numuneleri

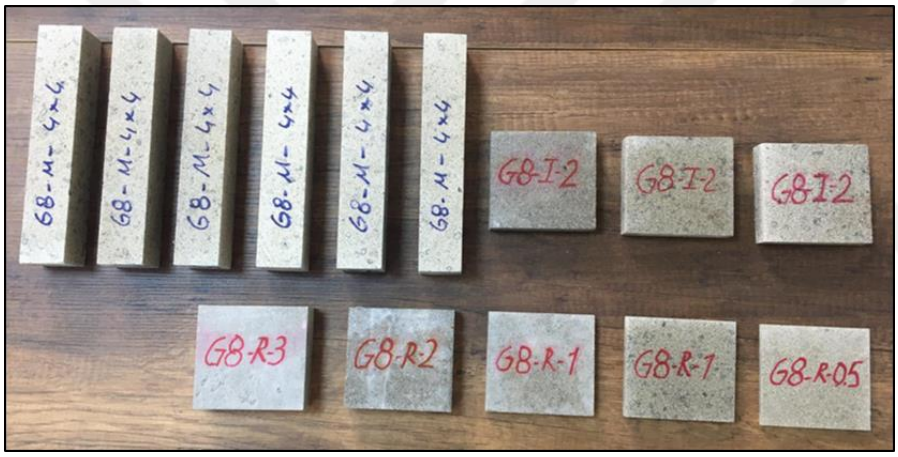


Şekil Ek 2.6. G6 kodlu kaplama numuneleri

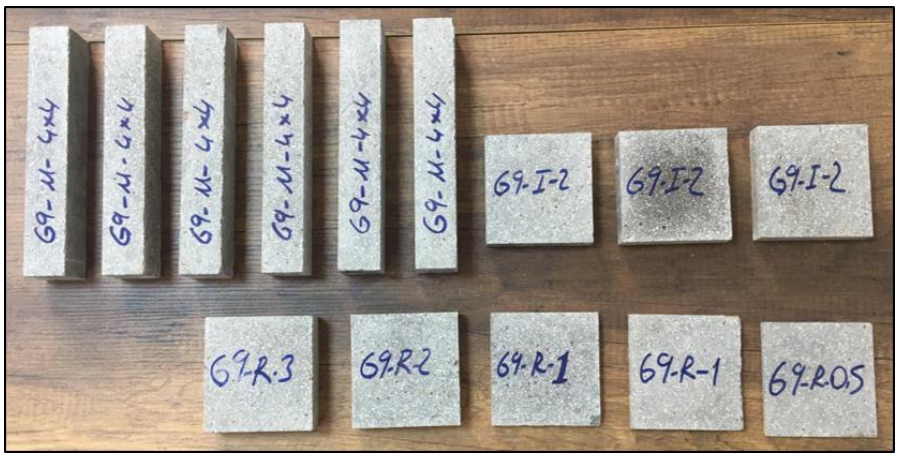
EK-2. (devam) Kesim işlemi yapılan çimento esaslı kompozit kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.7. G7 kodlu kaplama numuneleri

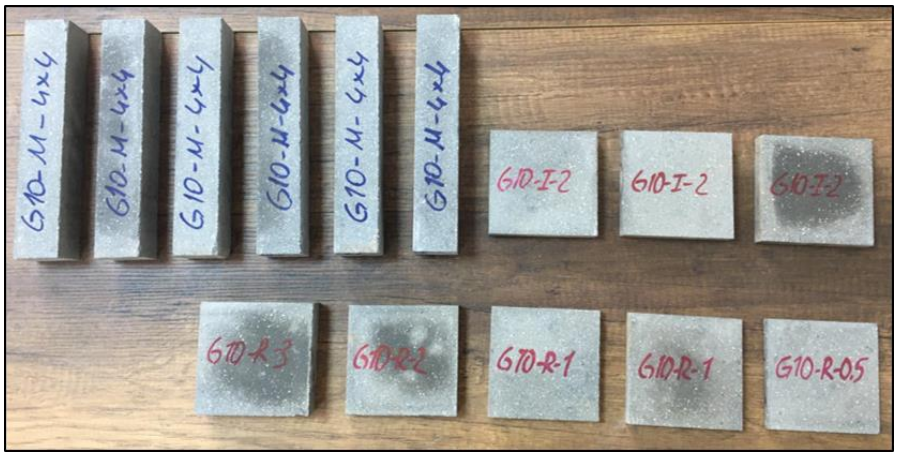


Şekil Ek 2.8. G8 kodlu kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.9. G9 kodlu kaplama numuneleri

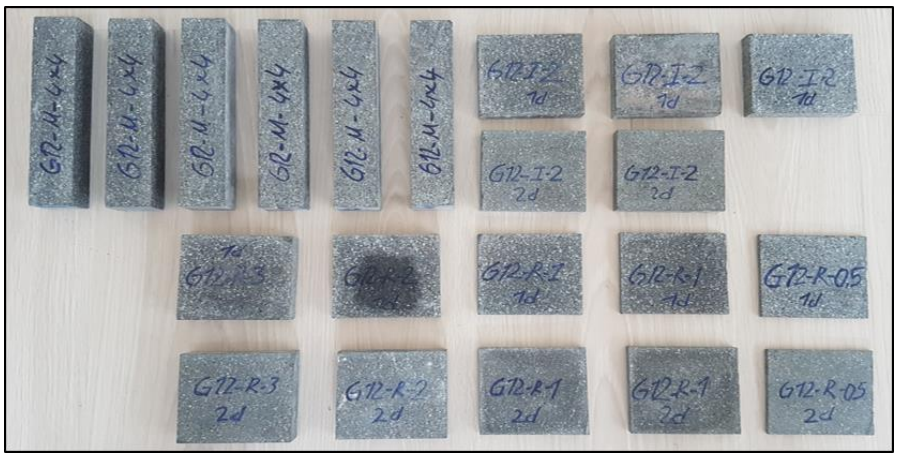
EK-2. (devam) Kesim işlemi yapılan çimento esaslı kompozit kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.10. G10 kodlu kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.11. G11 kodlu kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.12. G12 kodlu kaplama numuneleri

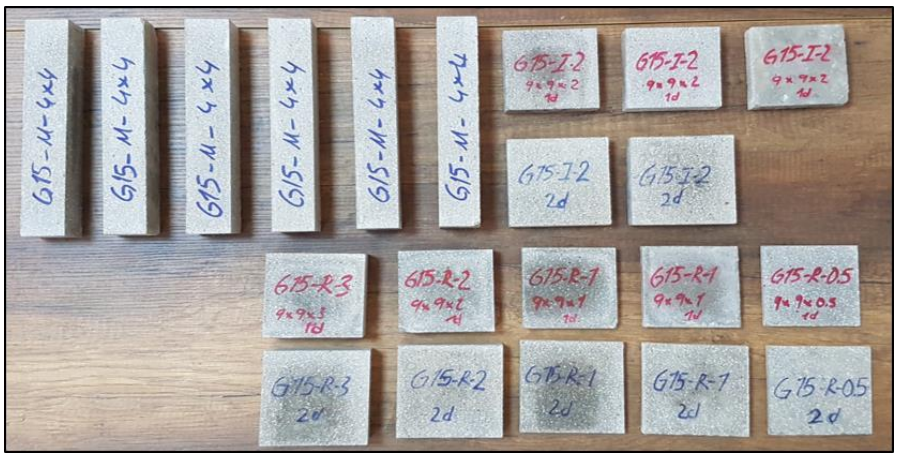
EK-2. (devam) Kesim işlemi yapılan çimento esaslı kompozit kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.13. G13 kodlu kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.14. G14 kodlu kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.15. G15 kodlu kaplama numuneleri

EK-2. (devam) Kesim işlemi yapılan çimento esaslı kompozit kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.16. G16 kodlu kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.17. G17 kodlu kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.18. G18 kodlu kaplama numuneleri

EK-2. (devam) Kesim işlemi yapılan çimento esaslı kompozit kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.19. G19 kodlu kaplama numuneleri

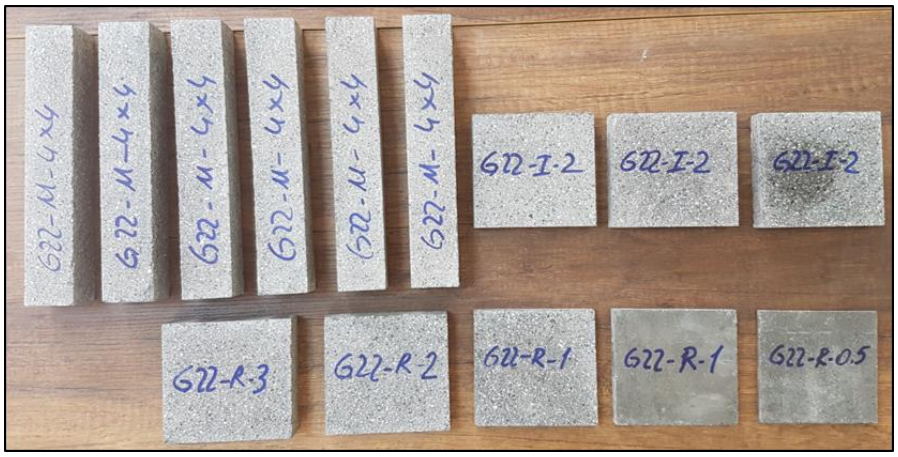


Şekil Ek 2.20. G20 kodlu kaplama numuneleri

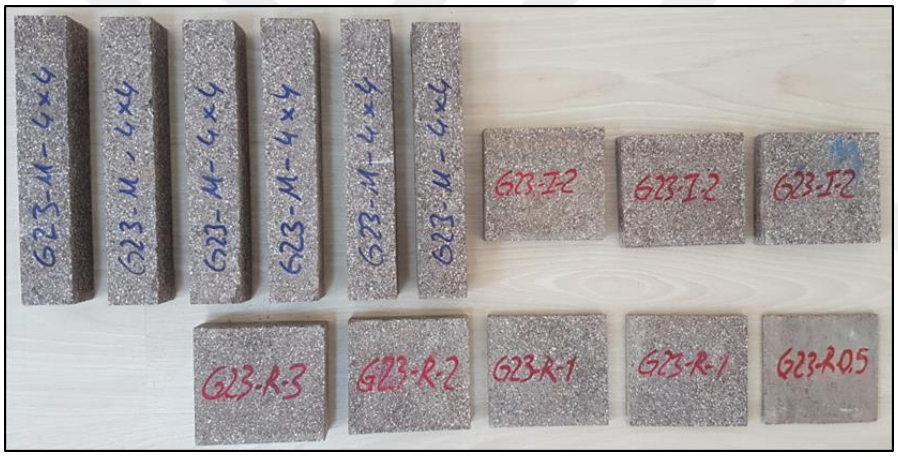


Şekil Ek 2.21. G21 kodlu kaplama numuneleri

EK-2. (devam) Kesim işlemi yapılan çimento esaslı kompozit kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.22. G22 kodlu kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.23. G23 kodlu kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.24. G24 kodlu kaplama numuneleri

EK-2. (devam) Kesim işlemi yapılan çimento esaslı kompozit kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.25. G25 kodlu kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.26. G26 kodlu kaplama numuneleri

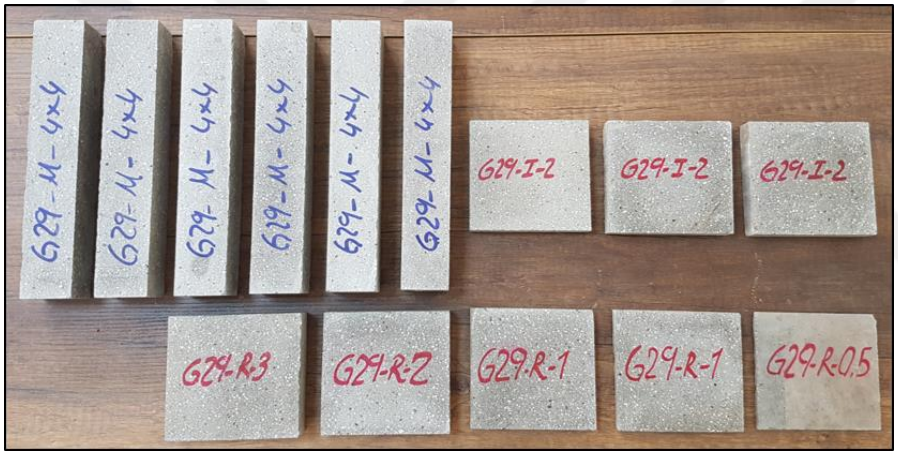


Şekil Ek 2.27. G27 kodlu kaplama numuneleri

EK-2. (devam) Kesim işlemi yapılan çimento esaslı kompozit kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.28. G28 kodlu kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.29. G29 kodlu kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.30. G30 kodlu kaplama numuneleri

EK-2. (devam) Kesim işlemi yapılan çimento esaslı kompozit kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.31. G31 kodlu kaplama numuneleri

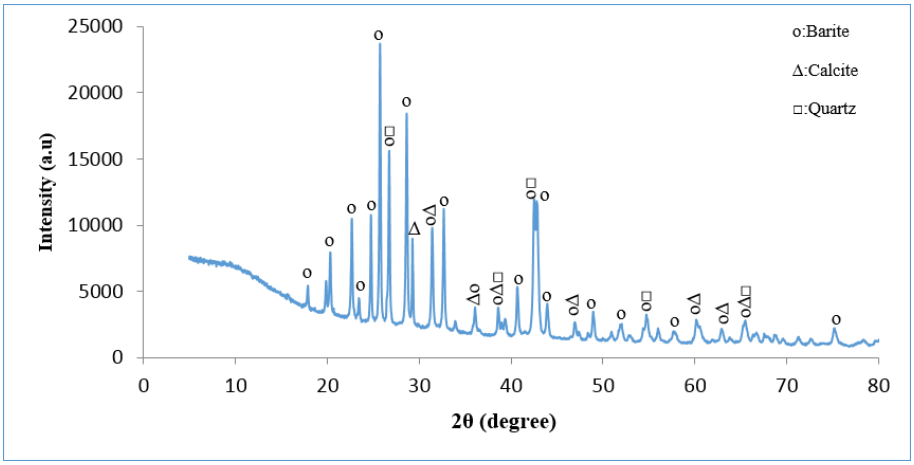


Şekil Ek 2.32. G32 kodlu kaplama numuneleri



Şekil Ek 2.33. G33 kodlu kaplama numuneleri

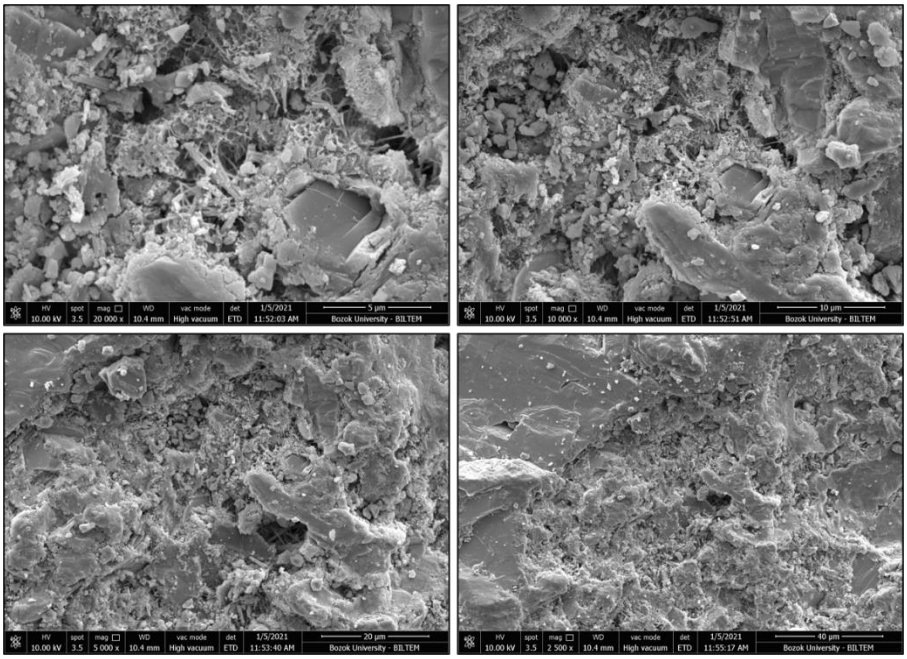
EK-3. Üretilen kompozit kaplama numunelerine ait analiz sonuçları



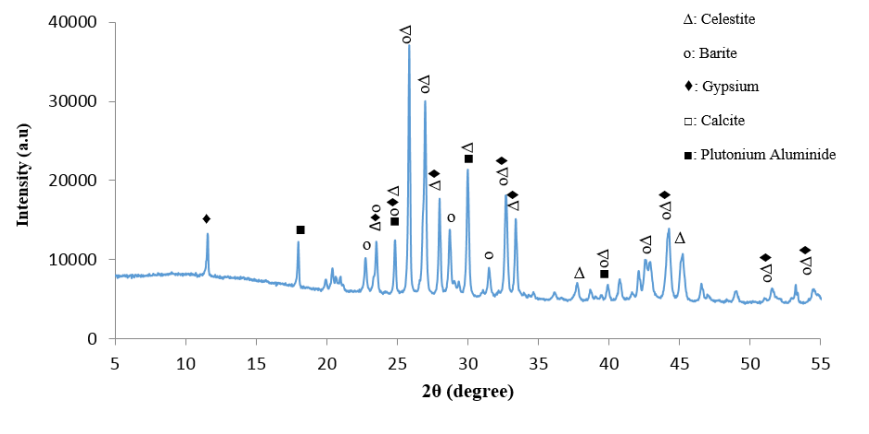
Şekil Ek 3.1. G1 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

BaO	CaO	SO_3	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	SrO	MgO	Na_2O	K_2O
44,8200	16,4300	15,4100	7,9100	1,9200	1,7800	1,2500	0,9210	0,5500	0,3470
MnO	I	Cs_2O	PuO_2	TiO_2	ZnO	Pr_6O_{11}	TeO2	Ag_2O	Nd_2O_3
0,2190	0,1000	0,0890	0,0740	0,0474	0,0256	0,0182	0,0155	0,0130	0,0111
Cr_2O_3	MoO_3	WO_3	CuO	HfO_2	OsO_4	Ga_2O_3	NiO	LOI	
0,0099	0,0096	0,0078	0,0074	0,0073	0,0069	0,0027	0,0025	8,0000	

Şekil Ek 3.2. G1 kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



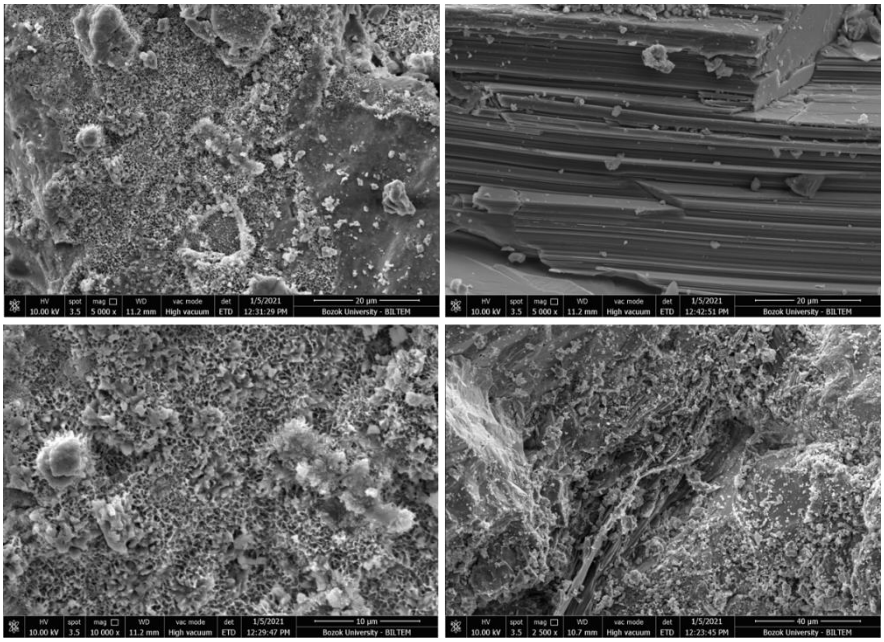
Şekil Ek 3.3. G1 kodlu numunenin SEM görüntüsü



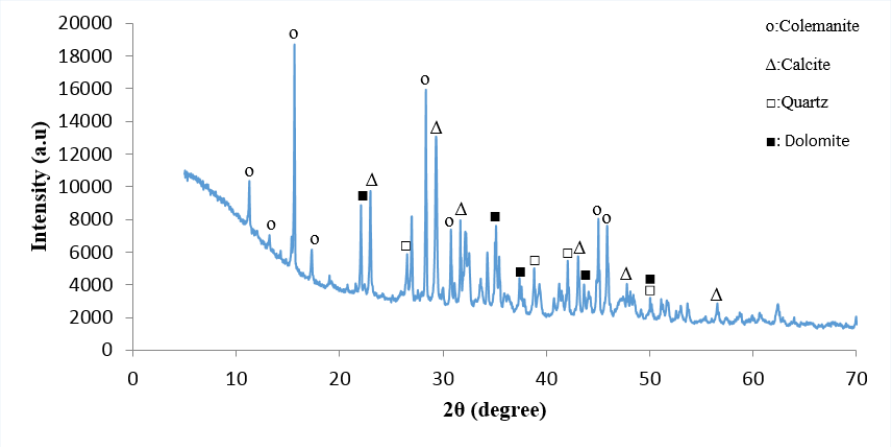
Şekil Ek 3.4. G2 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

SrO	SO_3	BaO	CaO	SiO_2	PuO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3
32,47000	23,77000	16,41000	13,43000	3,85000	1,91000	0,82200	0,64600
MgO	ThO_2	K_2O	Na_2O	MnO	Pr_6O_{11}	TiO_2	Am_2O3
0,53500	0,28000	0,25700	0,25000	0,06650	0,04790	0,03260	0,02190
ZnO	Ag_2O	HfO_2	IrO_2	CuO	Ga_2O_3	Cr_2O_3	LOI
0,02030	0,01140	0,01080	0,00960	0,00880	0,00430	0,00400	5,1400

Şekil Ek 3.5. G2 kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



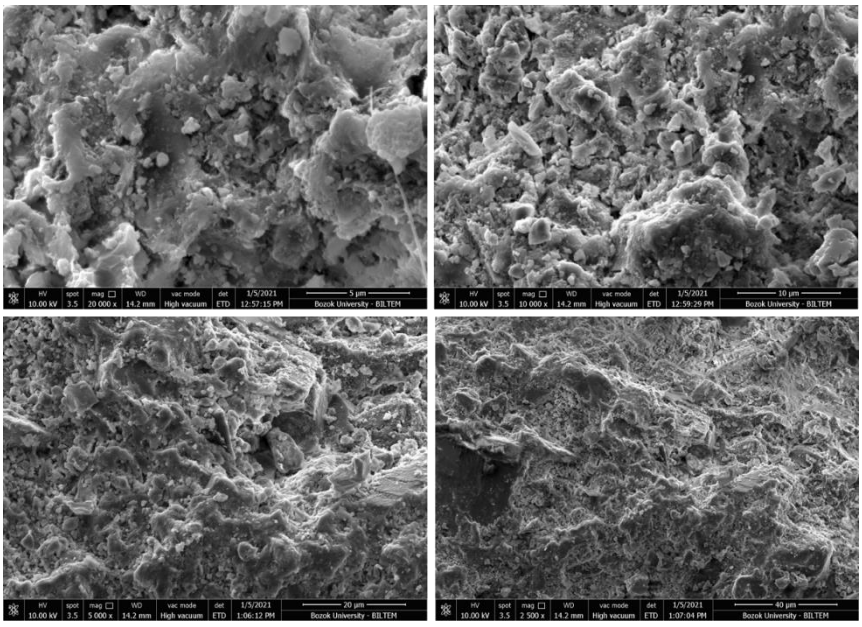
Şekil Ek 3.6. G2 kodlu numunenin SEM görüntüsü



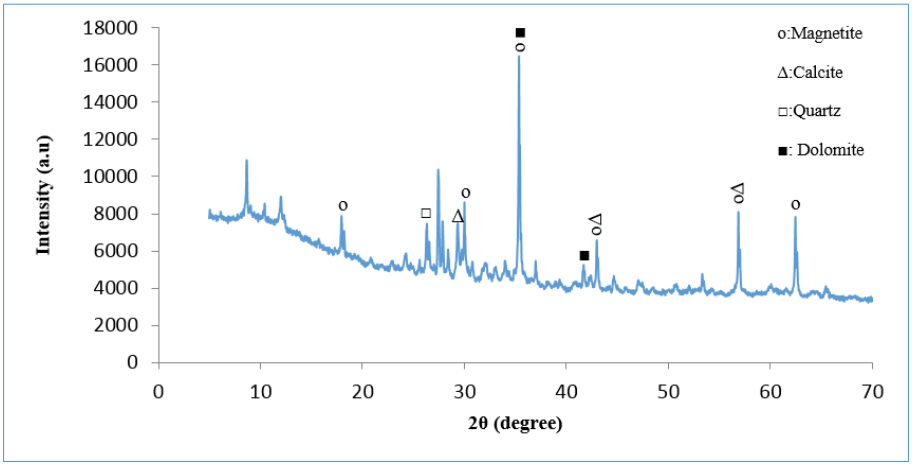
Şekil Ek 3.7. G3 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

CaO	SiO_2	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	SO_3	SrO	K_2O	Na_2O
53,4000	10,7600	3,9700	3,7500	1,4200	1,2700	1,2200	0,3290	0,3080
MnO	TiO_2	BaO	PuO_2	ZnO	Cr_2O_3	CuO	V_2O_5	NiO
0,1560	0,1350	0,0900	0,0717	0,0588	0,0164	0,0154	0,0102	0,0083
PbO	Cl	MoO_3	Co_3O_4	Nd_2O_3	Sc_2O_3	LOI		
0,0068	0,0058	0,0051	0,0044	0,0038	0,0024	22,9800		

Şekil Ek 3.8. G3 kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



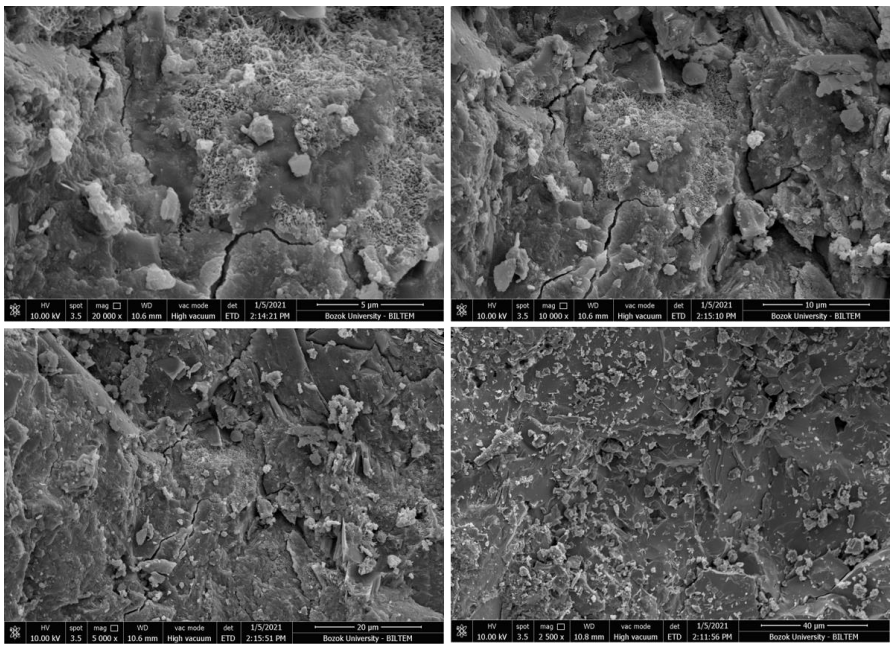
Şekil Ek 3.9. G3 kodlu numunenin SEM görüntüsü



Şekil Ek 3.10. G4 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

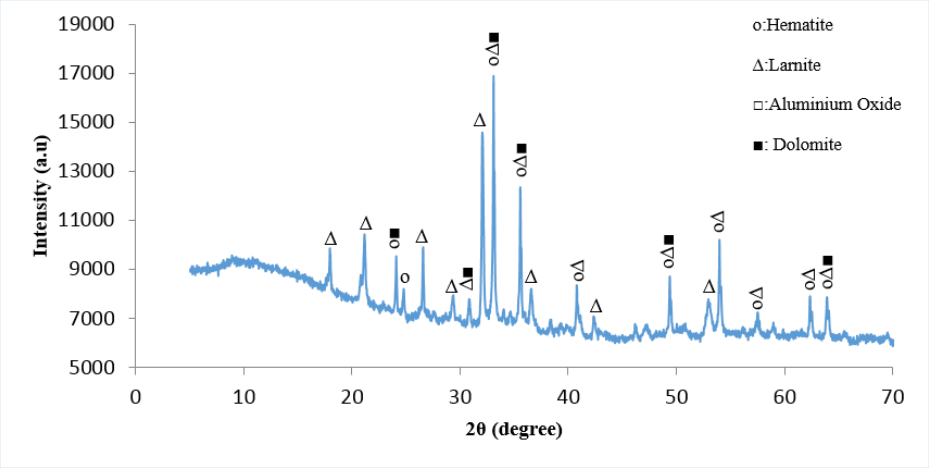
Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O	S	Na_2O	TiO_2	MnO
31,3900	25,3800	16,4300	11,8900	5,5800	1,1100	0,7870	0,5250	0,2450	0,1710
NiO	Cl	BaO	Cr_2O_3	Co_3O_4	ZnO	CuO	SrO	V_2O_5	Gd_2O_3
0,1000	0,0867	0,0580	0,0559	0,0453	0,0346	0,0314	0,0241	0,0150	0,0106
ZrO_2	Pr_6O_{11}	Rb_2O	MoO_3	PbO	PuO_2	Y_2O_3	LOI		
0,0084	0,0076	0,0071	0,0043	0,0023	0,0020	0,0014	1,0014		

Şekil Ek 3.11. kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



Şekil Ek 3.12. G4 kodlu numunenin SEM görüntüsü

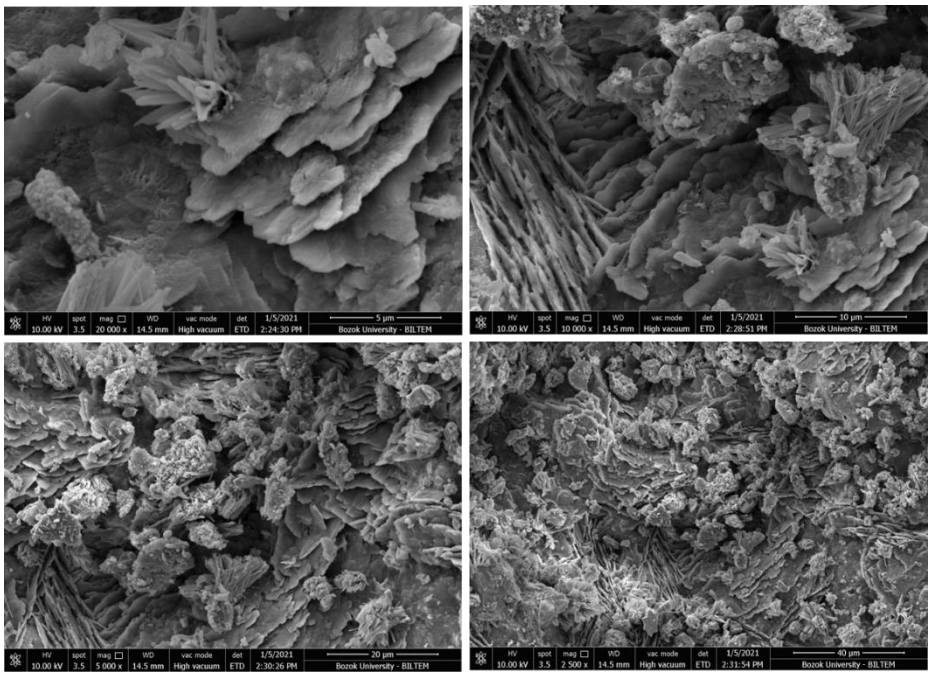
EK-3. (devam) Üretilen kompozit kaplama numunelerine ait analiz sonuçları



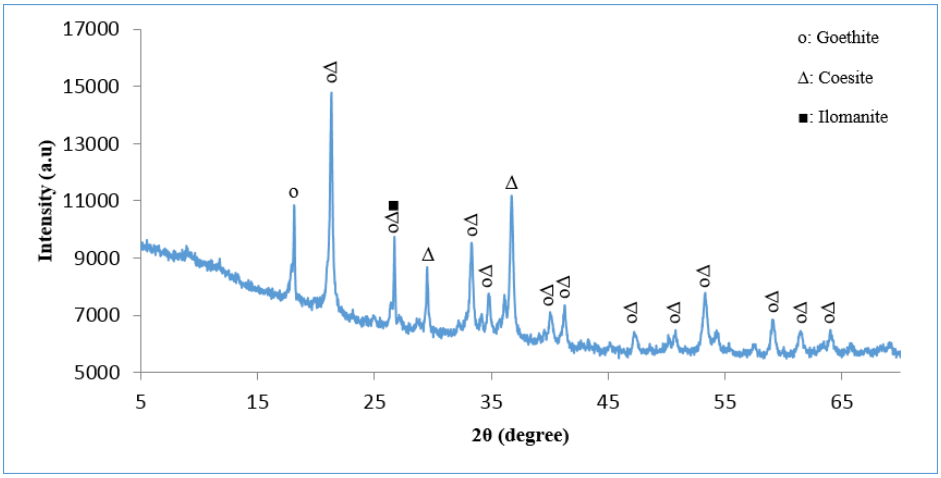
Şekil Ek 3.13. G5 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

Fe_2O_3	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	MnO	S	K_2O
54,2300	12,5200	11,6800	3,4100	3,0800	0,7440	0,5740	0,4860
TiO_2	BaO	Co_3O_4	NiO	CuO	ZnO	SrO	As_2O_3
0,1090	0,0969	0,0661	0,0532	0,0421	0,0290	0,0257	0,0148
Cl	Cr_2O_3	V_2O_5	MoO_3	Gd_2O_3	ZrO_2	Rb_2O	LIO
0,0132	0,0124	0,0120	0,0095	0,0087	0,0019	0,0016	12,7700

Şekil Ek 3.14. G5 kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



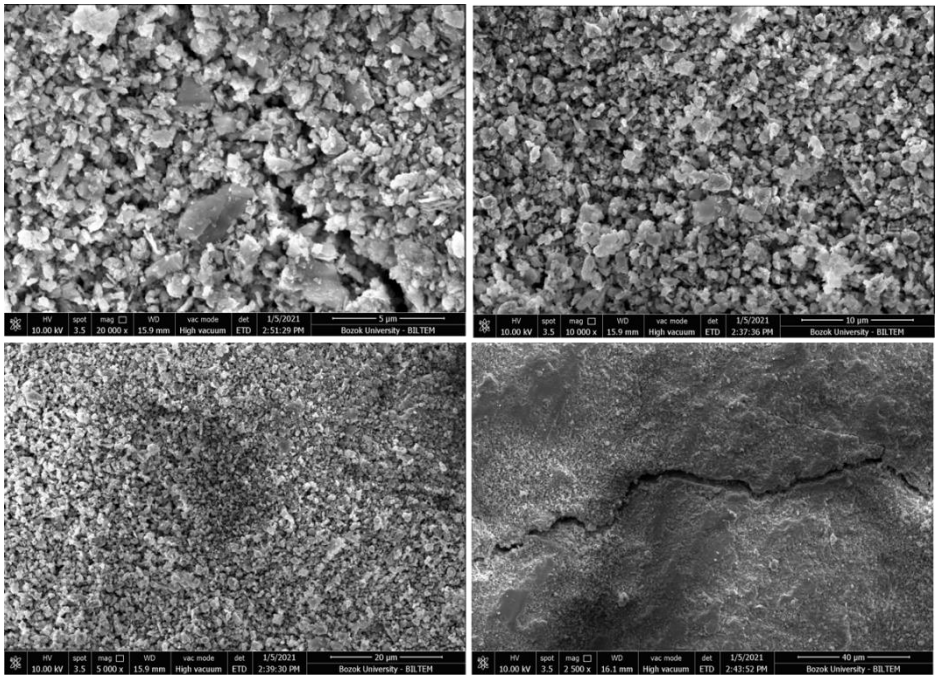
Şekil Ek 3.15. G5 kodlu numunenin SEM görüntüsü



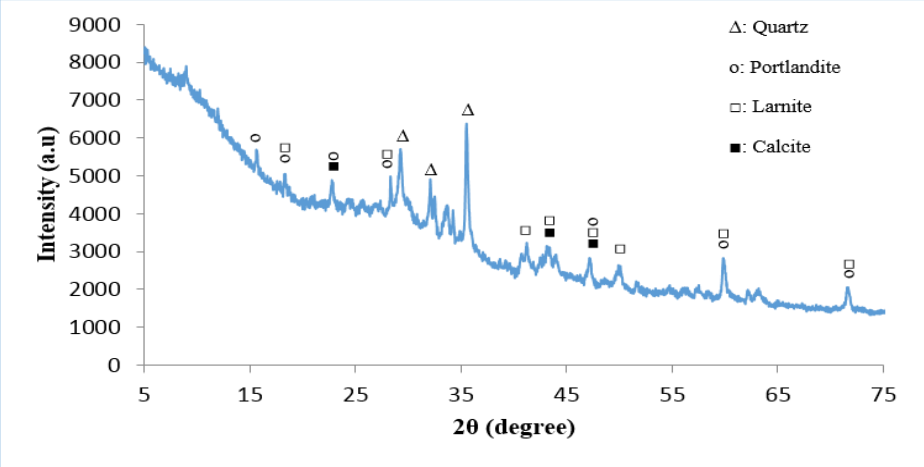
Şekil Ek 3.16. G6 G5 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

Fe_2O_3	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MnO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O
46,94000	13,93000	12,03000	3,79000	3,31000	1,61000	0,64900	0,59800	0,19000
TiO_2	BaO	ZnO	Co_3O_4	SrO	Cr_2O_3	Gd_{2O3}	CuO	Eu_2O_3
0,10100	0,08400	0,06040	0,04940	0,04080	0,03450	0,02760	0,01490	0,01470
NiO	OsO_4	V_2O_5	MoO_3	Cl	Rb_2O	PuO_2	LOI	
0,01030	0,00720	0,00580	0,00450	0,00360	0,00350	0,00270	16.4900	

Şekil Ek 3.17. G6 kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



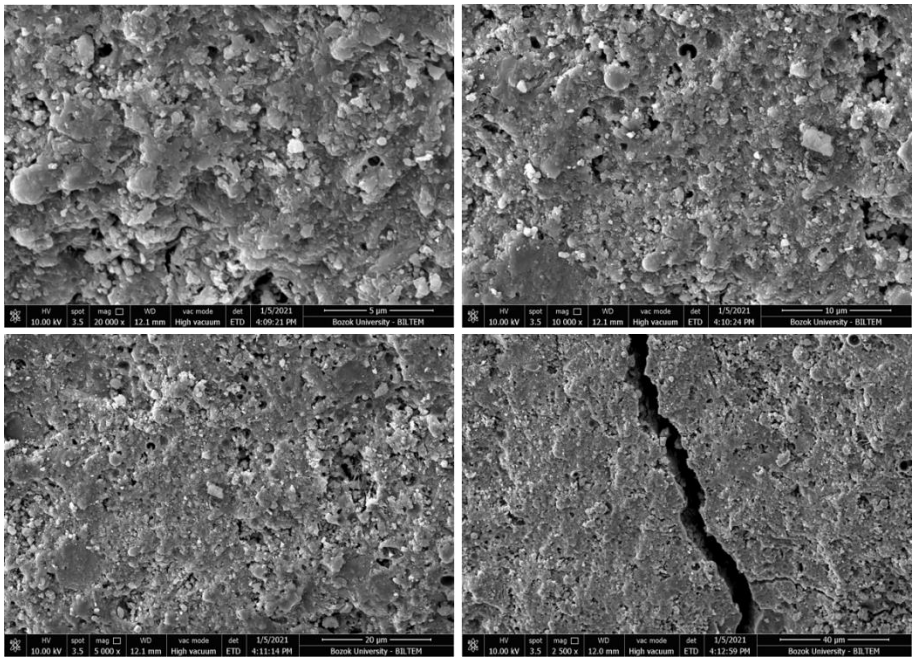
Şekil Ek 3.18. G6 kodlu numunenin SEM görüntüsü



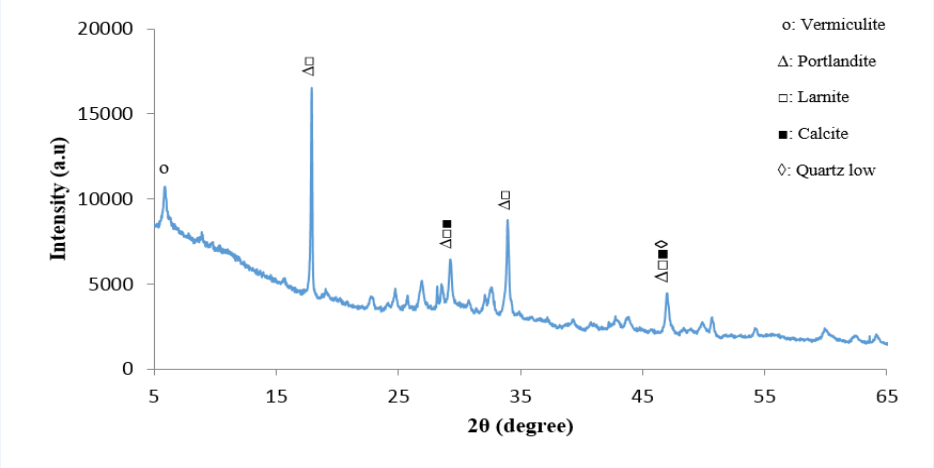
Şekil Ek 3.19. G7 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Cr_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	Na_2O	ZrO_2	K_2O
49,2900	16,8100	7,3800	4,4700	3,0800	2,2000	1,2400	1,2300	0,0032	0,9400
BaO	ZnO	MnO	TiO_2	SrO	Cl	Cs_2O	MoO_3	CuO	Ga_2O_3
0,1660	0,1660	0,1640	0,1040	0,0703	0,0252	0,0155	0,0025	0,0119	0,0112
NiO	PbO	I	V_2O5	PuO_2	Rb_2O	Co_3O_4	ZrO_2	MoO_3	LOI
0,0112	0,0111	0,0096	0,0075	0,0044	0,0037	0,0036	0,0032	0,0025	12,5700

Şekil Ek 3.20. G7 kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



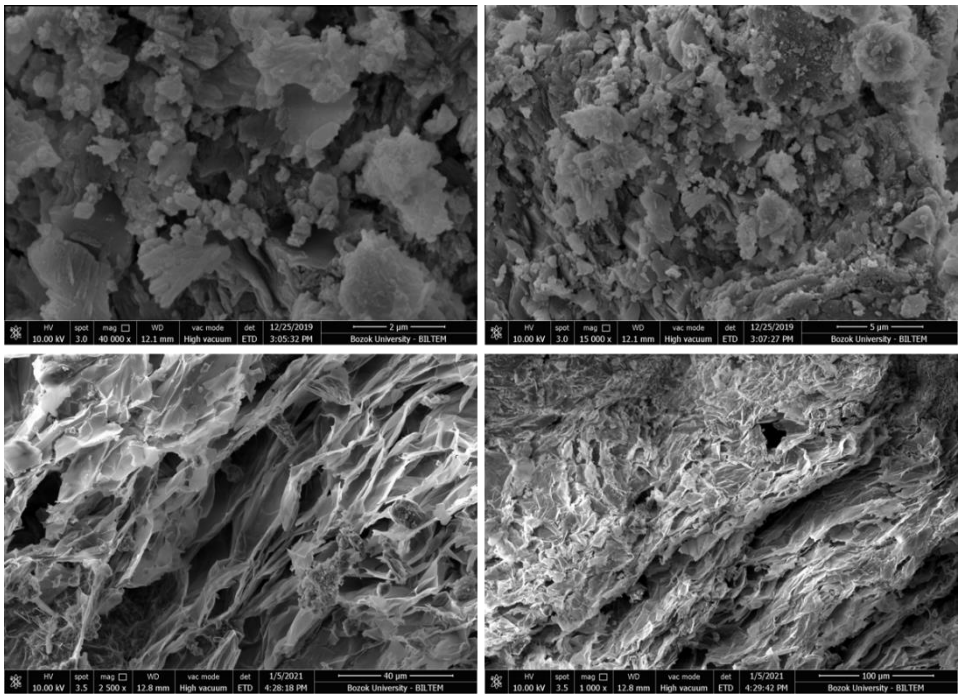
Şekil Ek 3.21. G7 kodlu numunenin SEM görüntüsü



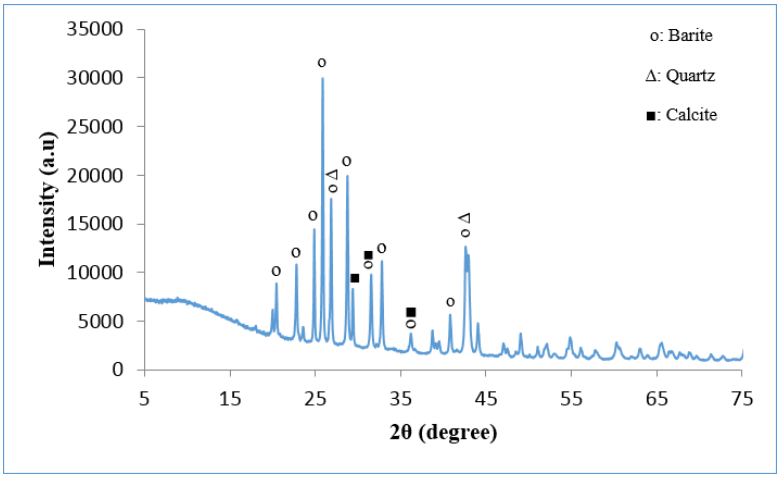
Şekil Ek 3.22. G8 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	BaO	K_2O	SrO	TiO_2
32,6100	20,0100	9,4800	5,5900	3,6800	1,7800	0,9740	0,5420	0,2900	0,2490
Na_2O	MnO	ZnO	Cs_2O	Cr_2O_3	PuO_2	CuO	I	Cl	V_2O_5
0,2010	0,1870	0,0738	0,0260	0,0200	0,0177	0,0175	0,0151	0,0133	0,0104
PbO	Co_3O_4	NiO	Nb_2O_5	WO_3	Rb_2O	Y_2O_3	LOI		
0,0073	0,0049	0,0044	0,0028	0,0022	0,0021	0,0014	24,1900		

Şekil Ek 3.23. G8 kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



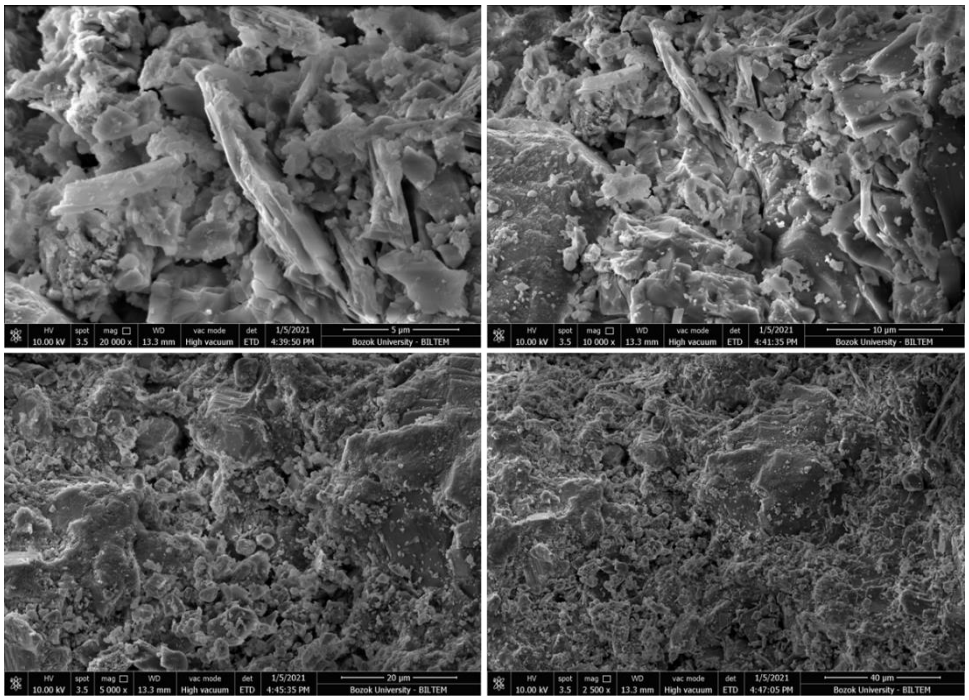
Şekil Ek 3.24. G8 kodlu numunenin SEM görüntüsü



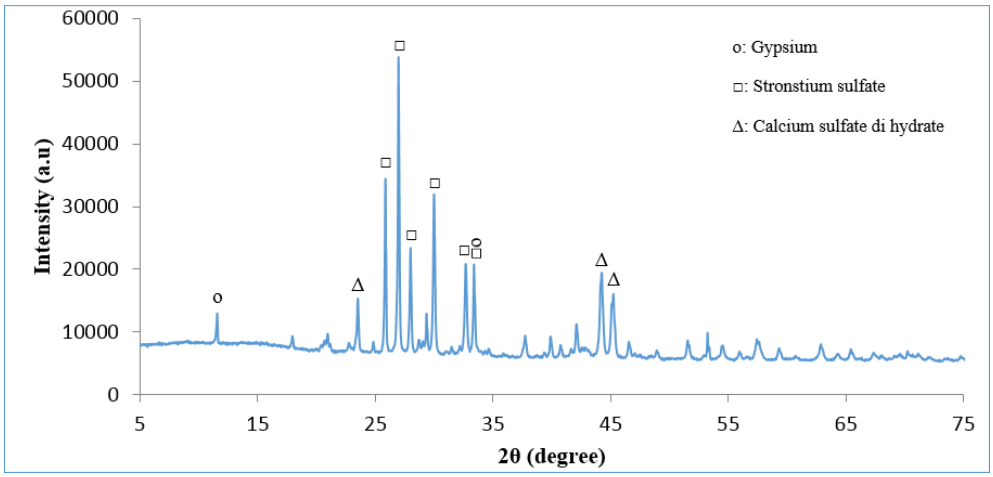
Şekil Ek 3.25. kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

BaO	SO_3	CaO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	SrO	MgO	K_2O	Na_2O
45,9600	15,6800	15,2100	8,8800	1,7300	1,7300	1,2200	0,8910	0,4180	0,2530
MnO	Cr_2O_3	Cs_2O	I	PuO_2	TiO_2	Pr_6O_{11}	ZnO	SnO_2	TeO_2
0,2280	0,1220	0,1090	0,1080	0,0728	0,0447	0,0332	0,0265	0,0166	0,0165
Ag_2O	Nd_2O_3	HfO_2	IrO_2	CuO	Ga_2O_3	NiO	LOI		
0,0130	0,0126	0,0089	0,0066	0,0065	0,0036	0,0022	7,2000		

Şekil Ek 3.26. G9 X-ışını floresans spektrometresi, XRF analizi



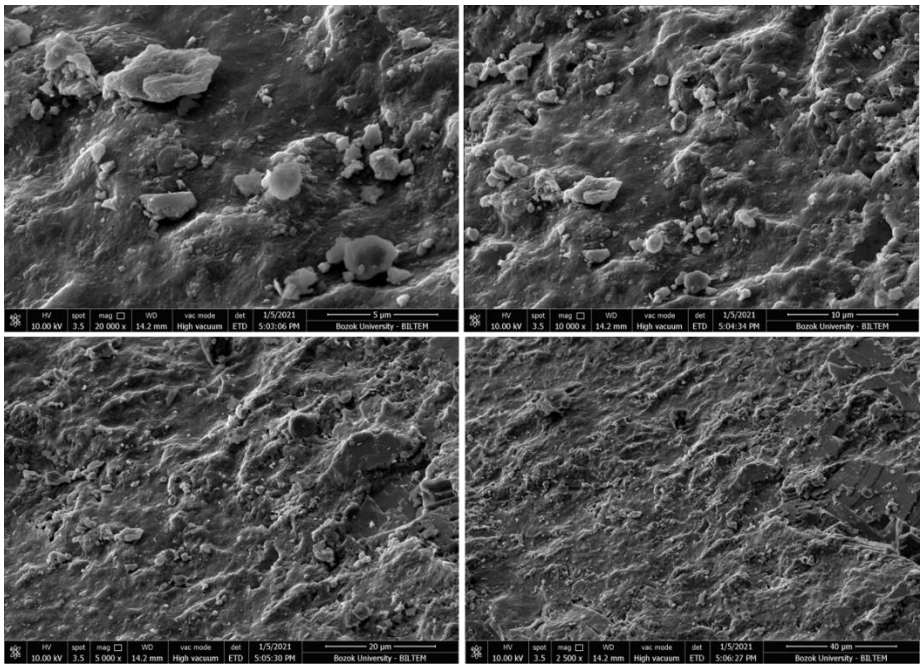
Şekil Ek 3.27. G9 Taramalı elektron mikroskobu, SEM EDS analizi



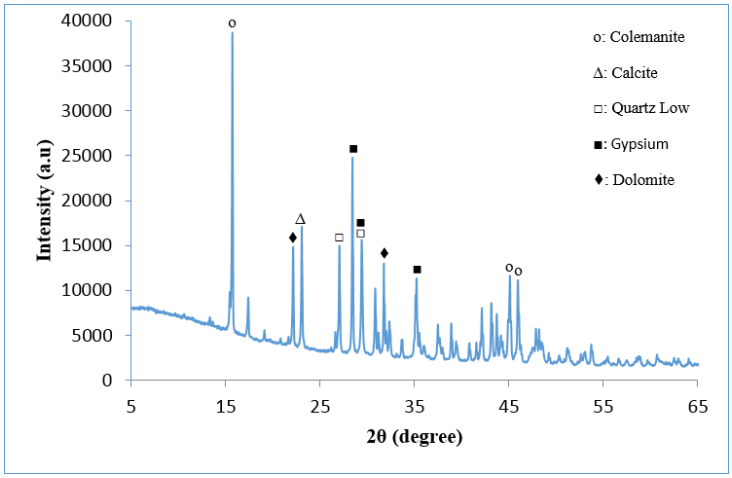
Şekil Ek 3.28. G10 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

SrO	SO_3	CaO	SiO_2	BaO	PuO_2	Fe_2O_3	MgO
39,33000	21,39000	17,18000	5,27000	4,14000	2,25000	0,89600	0,79400
Al_2O_3	ThO_2	K_2O	Na_2O	Cr_2O_3	MnO	Pr_6O_{11}	TiO_2
0,75800	0,47000	0,31700	0,19600	0,11700	0,06430	0,05840	0,04740
ZnO	MoO_3	Ag_2O	CdO	CuO	LOI		
0,03200	0,02160	0,01560	0,01280	0,01030	6,63000		

Şekil Ek 3.29. G10 kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



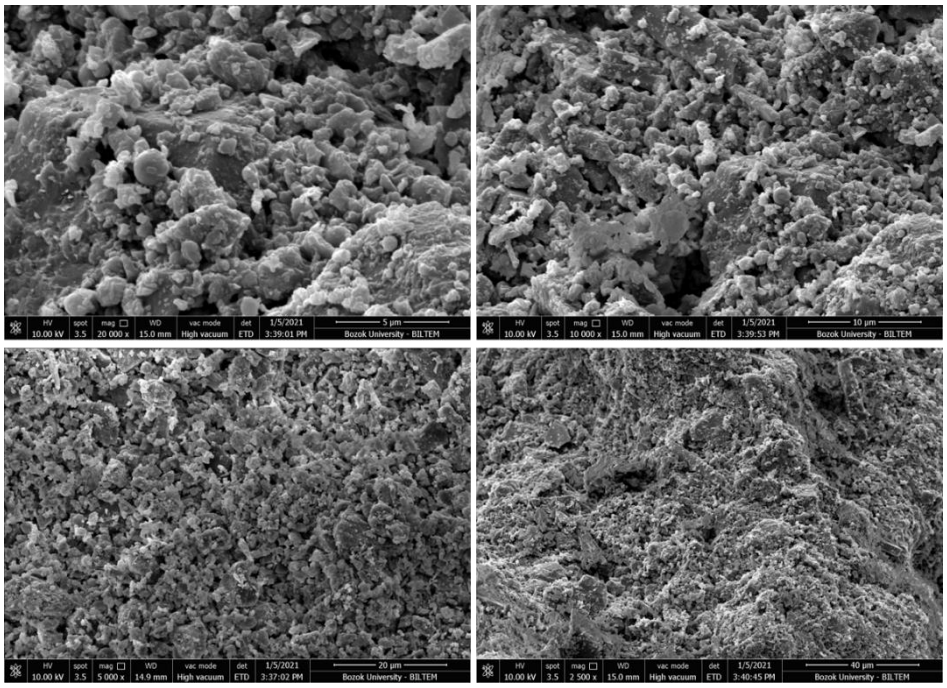
Şekil Ek 3.30. G10 kodlu numunenin SEM görüntüsü



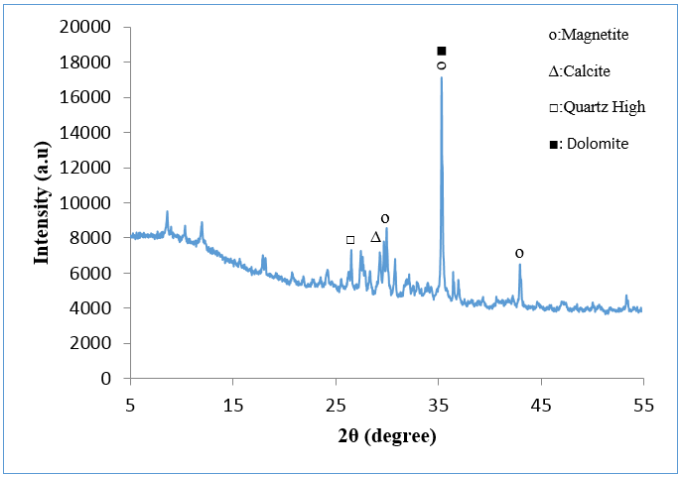
Şekil Ek 3.31. G11 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

CaO	SiO_2	MgO	SrO	Fe_2O_3	Al_2O_3	Na_2O	Cr_2O_3
51,3200	13,6900	5,8200	1,8500	1,0200	0,6880	0,5540	0,5120
SO3	K_2O	PuO_2	BaO	MnO	ZnO	TiO_2	Nd_2O_3
0,3730	0,1170	0,1090	0,0870	0,0398	0,0243	0,0207	0,0050
MoO_3	NiO	Ga_2O_3	$V2O_5$	CuO	CuO	LOI	
0,0041	0,0037	0,0021	0,0020	0,0018	1,0018	23,7600	

Şekil Ek 3.32. G11 kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



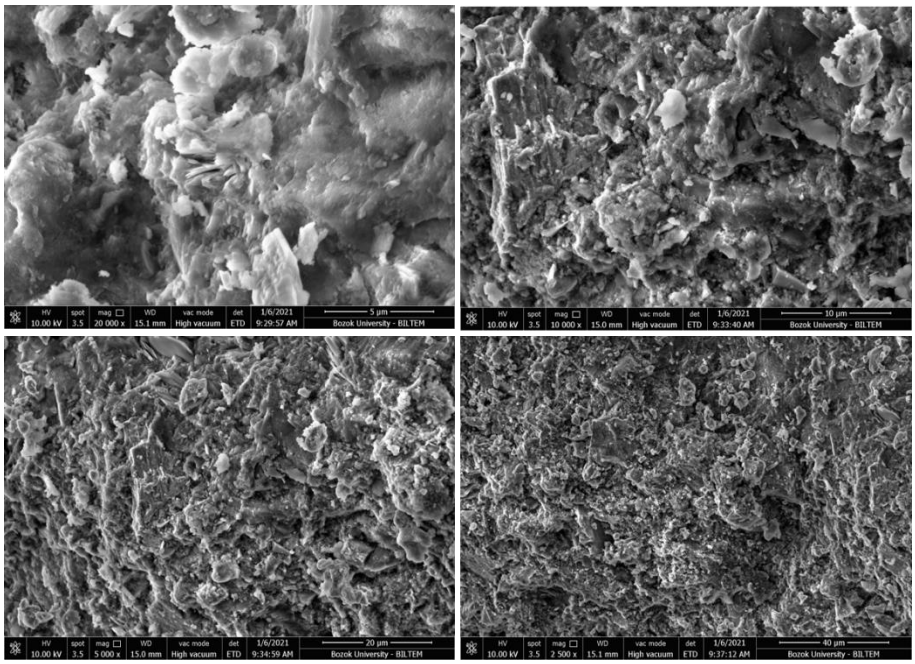
Şekil Ek 3.33. G11 kodlu numunenin SEM görüntüsü



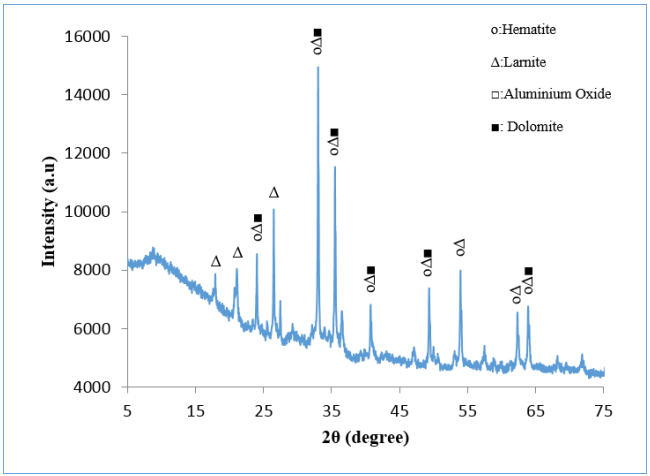
Şekil Ek 3.34. G12 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

Fe_{2O3}	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	K_2O	Na_2O	S	TiO_2
28,4300	27,8200	16,4300	10,9300	6,7400	1,1500	0,8430	0,7310	0,2960
MnO	NiO	BaO	Cl	Cr_2O_3	Co_3O_4	ZnO	SrO	CuO
0,1680	0,0948	0,0916	0,0897	0,0485	0,0392	0,0335	0,0329	0,0232
V_2O_5	Gd_{2O3}	ZrO_2	Rb_2O	PbO	Y_2O_3	LOI		
0,0168	0,0114	0,0093	0,0065	0,0028	0,0017	5,9500		

Şekil Ek 3.35. G12 kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



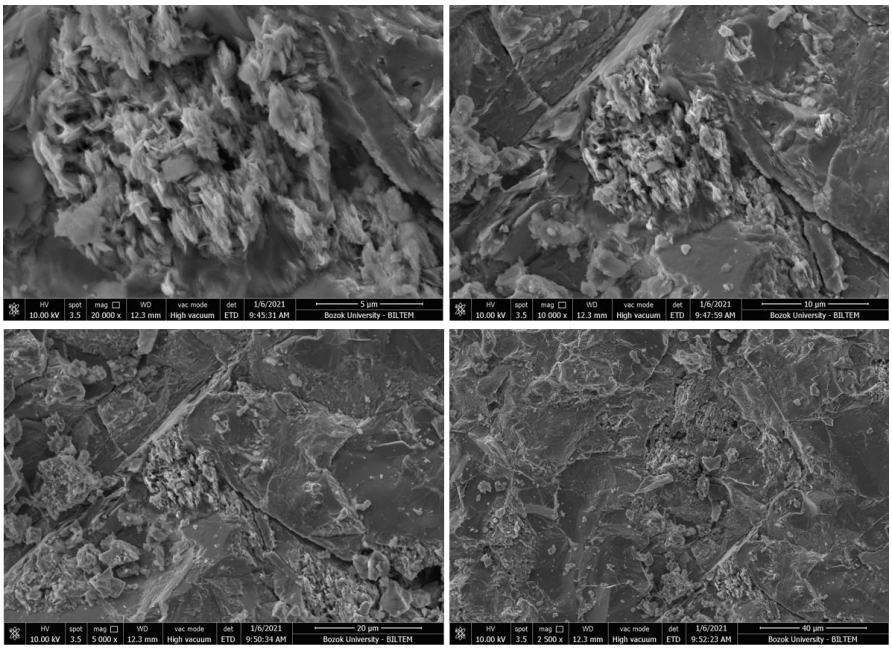
Şekil Ek 3.36. G12 kodlu numunenin SEM görüntüsü



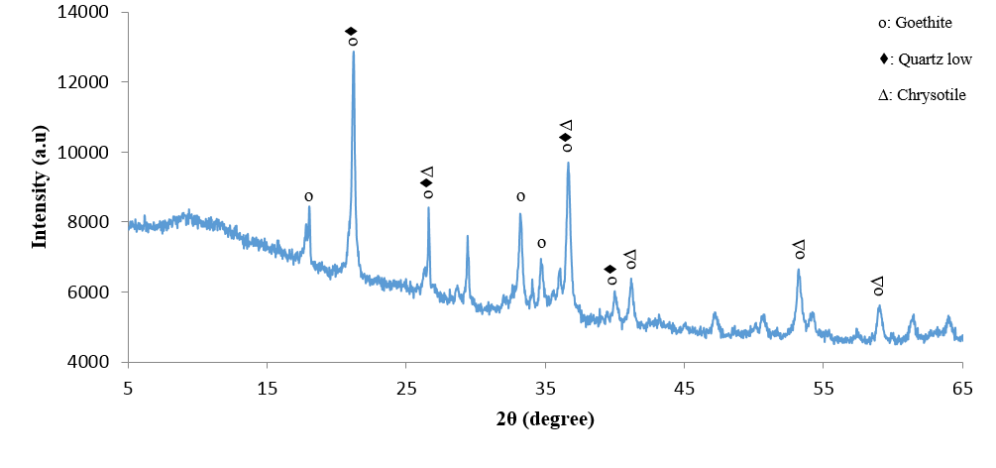
Şekil Ek 3.37. G13 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

Fe_2O_3	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	K_2O	SO_3	MnO	BaO	Na_2O
48,7900	19,9300	12,4700	5,2600	1,8300	1,0400	0,9950	0,3270	0,2340	0,2280
TiO_2	NiO	Cr_{2O3}	Co_3O_4	ZnO	SrO	V_2O_5	As_2O_3	CuO	Gd_2O_3
0,1650	0,1340	0,1130	0,0691	0,0440	0,0341	0,0309	0,0275	0,0233	0,0184
Ho_2O_3	Yb_2O_3	MoO_3	Cl	Rb_2O	PbO	Ga_2O_3	ZrO_2	LOI	
0,0103	0,0060	0,0053	0,0050	0,0030	0,0029	0,0018	0,0017	8,2000	

Şekil Ek 3.38. G13 kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



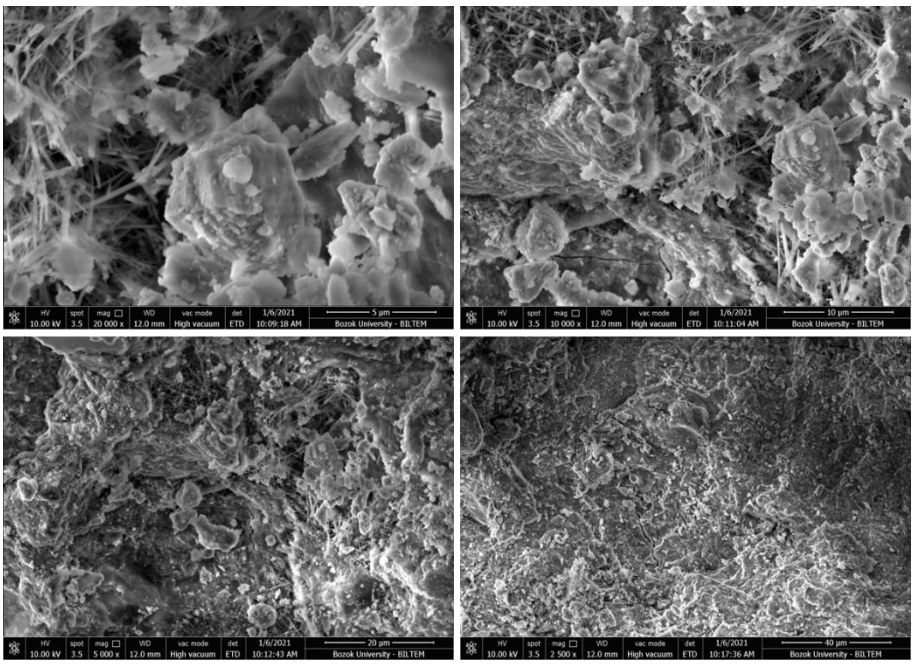
Şekil Ek 3.39. G13 kodlu numunenin SEM görüntüsü



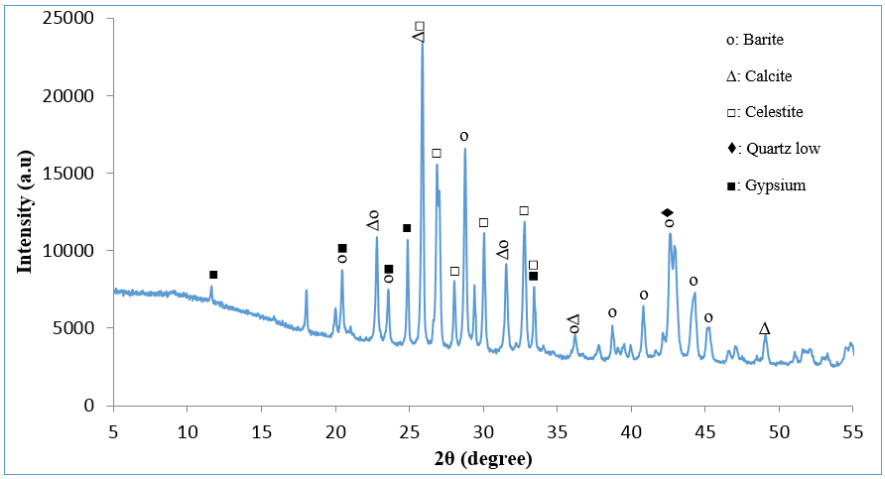
Şekil Ek 3.40. G14 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

Fe_2O_3	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MnO	MgO	SO_3	K_2O	Na_2O	BaO
46,4000	14,1200	12,8900	3,5400	3,4900	1,8000	0,7710	0,5700	0,2330	0,1630
Cr_2O_3	TiO_2	ZnO	SrO	Co_3O_4	Gd_2O_3	Eu_2O_3	CuO	NiO	V_2O_5
0,1090	0,0933	0,0673	0,0620	0,0452	0,0220	0,0146	0,0144	0,0108	0,0051
MoO_3	Ag_2O	PuO_2	Au	PbO	Rb_2O	Y_2O_3	LOI		
0,0051	0,0042	0,0030	0,0028	0,0025	0,0024	0,0012	15,5600		

Şekil Ek 3.41. G14 kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



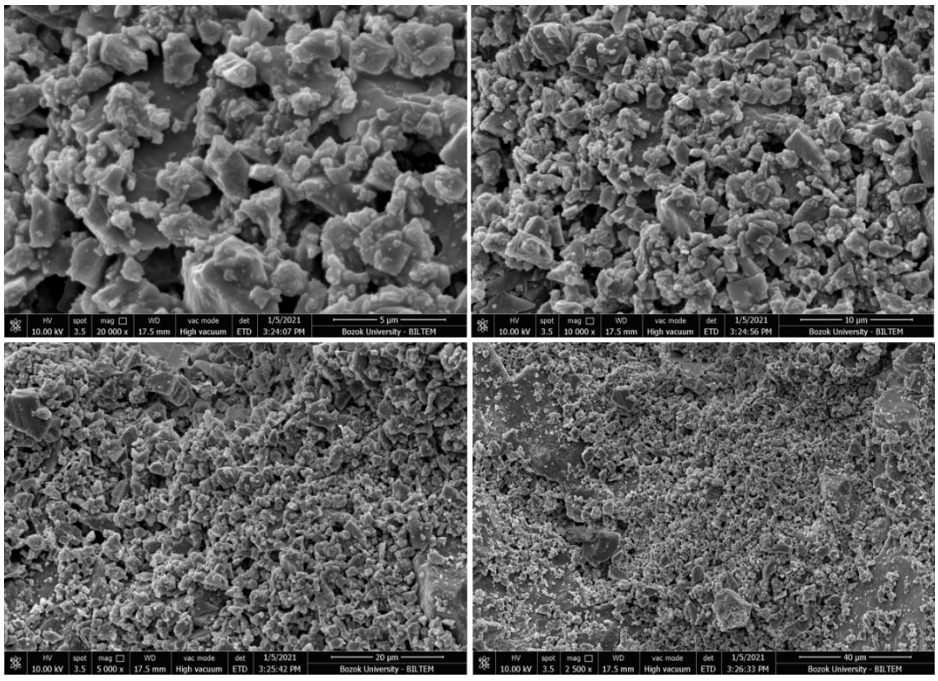
Şekil Ek 3.42. G14 kodlu numunenin SEM görüntüsü



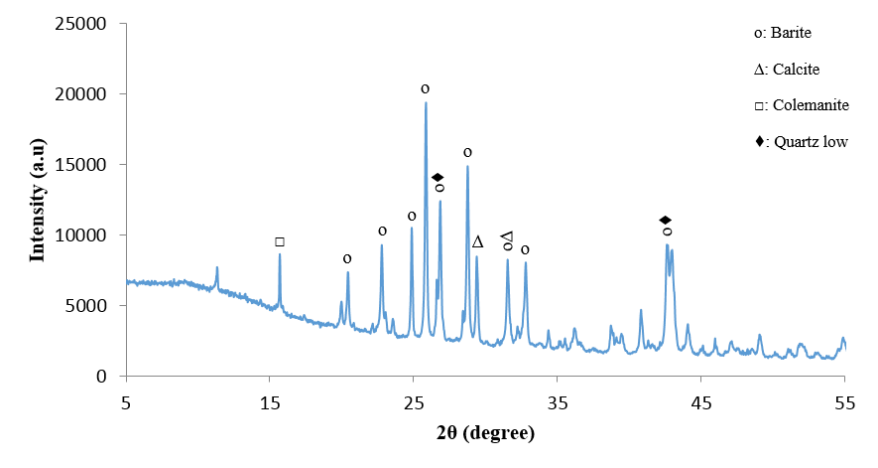
Şekil Ek 3.43. G15 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

BaO	SO_3	SrO	CaO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	PuO_2	MgO
30,7800	19,6800	17,2700	15,4300	5,3100	1,1900	1,0800	1,0400	0,6520
Na_2O	K_2O	MnO	I	TiO_2	Pr_6O_{11}	Cs_2O	ZnO	MoO_3
0,3860	0,3200	0,1370	0,0524	0,0425	0,0370	0,0340	0,0251	0,0162
Ag_2O	CuO	Am_2O_3	Nd_2O_3	Re_2O_7	Cr_2O_3	LOI		
0,0131	0,0098	0,0089	0,0074	0,0073	0,0072	6,5000		

Şekil Ek 3.44. G15 X kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



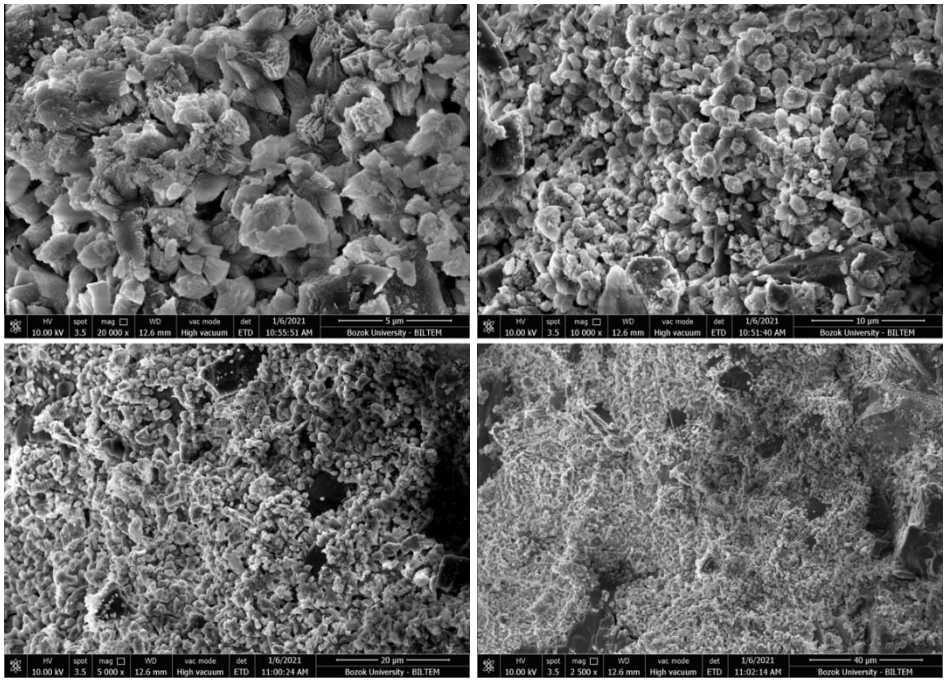
Şekil Ek 3.45. G15 kodlu numunenin SEM görüntüsü



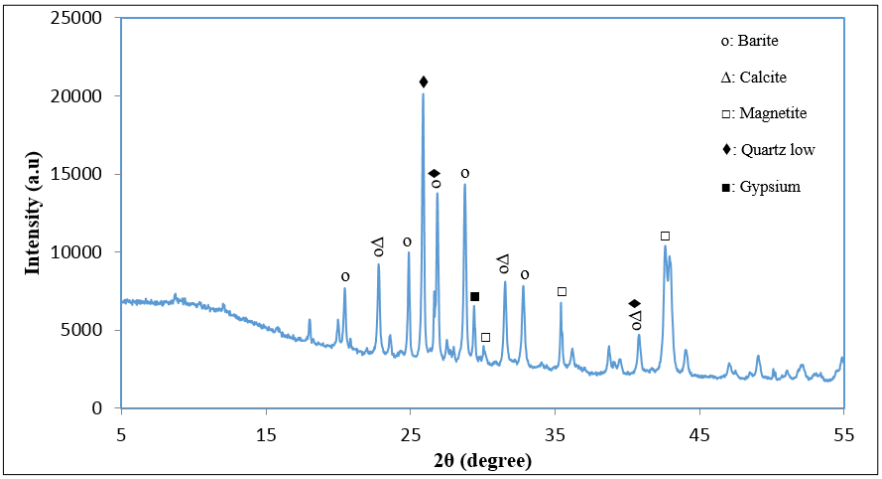
Şekil Ek 3.46. G16 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

BaO	CaO	SiO_2	SO_3	Fe_2O_3	MgO	Al_2O_3	SrO
31,7200	28,3500	9,9800	8,8700	2,3900	2,3300	1,6400	0,8720
Na_2O	MnO	K_2O	I	Cs_2O	TiO_2	PuO_2	ZnO
0,4280	0,4140	0,2720	0,1200	0,1150	0,0560	0,0497	0,0327
TeO_2	Ag_2O	Cr_2O_3	CuO	NiO	LOI		
0,0132	0,0093	0,0081	0,0078	0,0039	12,3200		

Şekil Ek 3.47. G16 kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



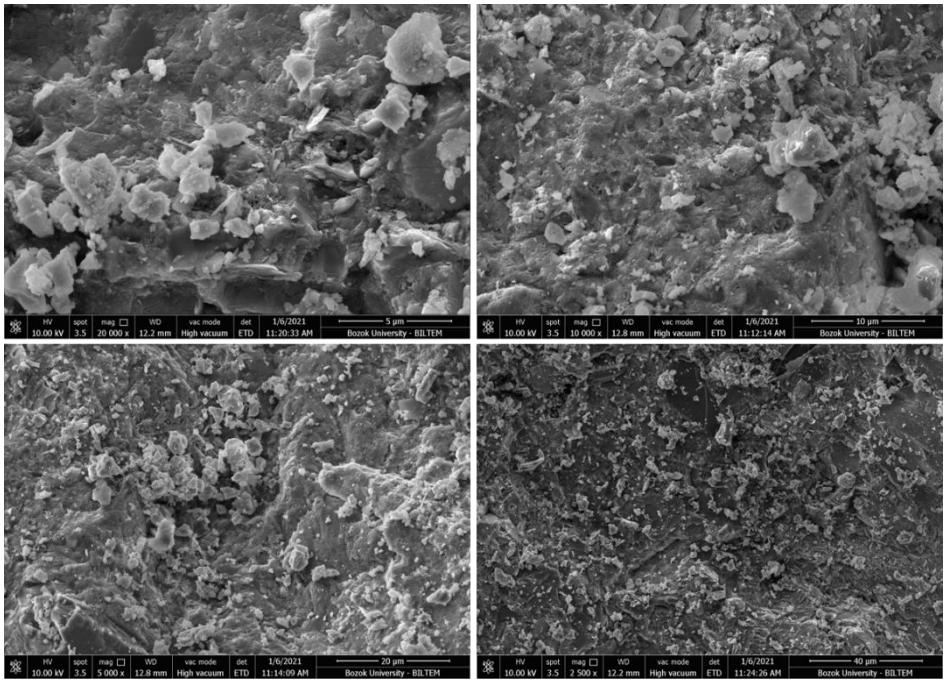
Şekil Ek 3.48. G16 kodlu numunenin SEM görüntüsü



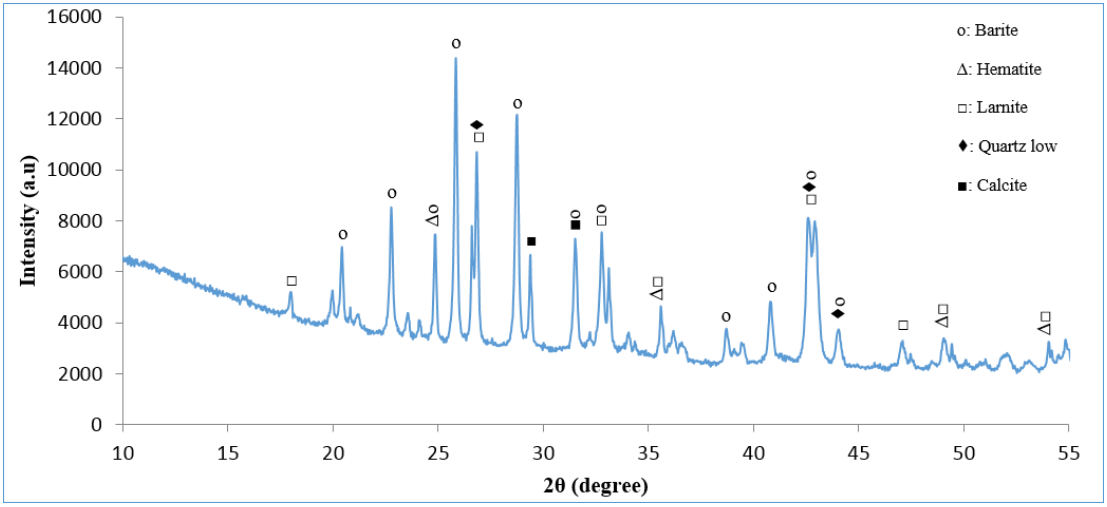
Şekil Ek 3.49. G17 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

BaO	SiO_2	Fe_2O_3	CaO	SO_3	MgO	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	SrO	MnO
22,2800	18,6200	16,0900	14,1100	9,1900	5,8800	4,3600	0,7740	0,6740	0,4660	0,3830
TiO_2	I	Cs_2O	NiO	Pr_6O_{11}	Cr_2O_3	Cl	Co_3O_4	ZnO	PuO_2	CeO_2
0,1660	0,0867	0,0840	0,0439	0,0347	0,0303	0,0283	0,0254	0,0253	0,0239	0,0177
CuO	Nd_2O_3	Gd_2O_3	V_2O_5	Ho_2O_3	Ag_2O	PbO	Re_2O_7	Rb_2O	LOI	
0,0161	0,0155	0,0144	0,0117	0,0073	0,0069	0,0063	0,0053	0,0033	6,5200	

Şekil Ek 3.50. G17 kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



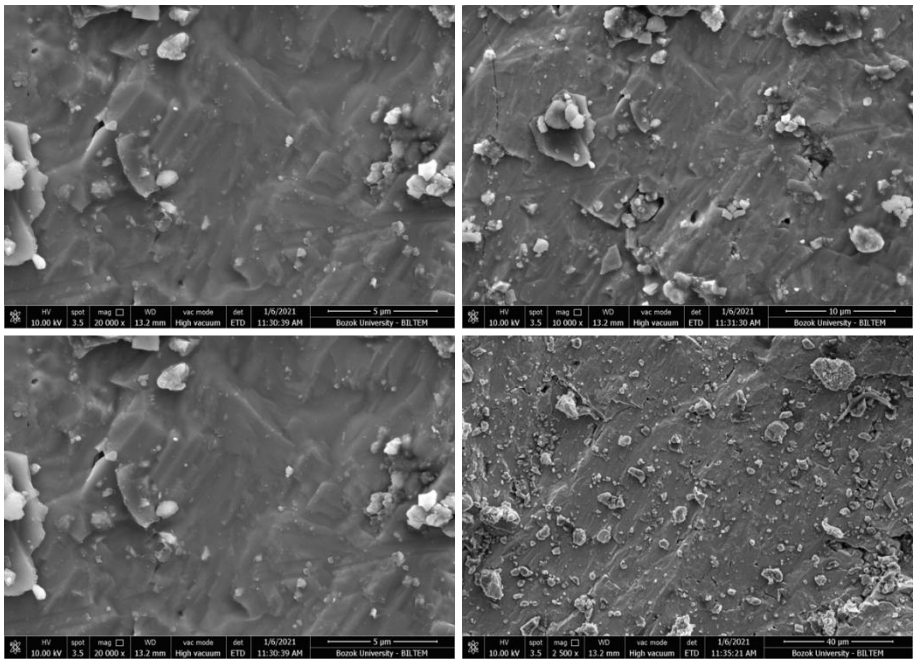
Şekil Ek 3.51. G17 kodlu numunenin SEM görüntüsü



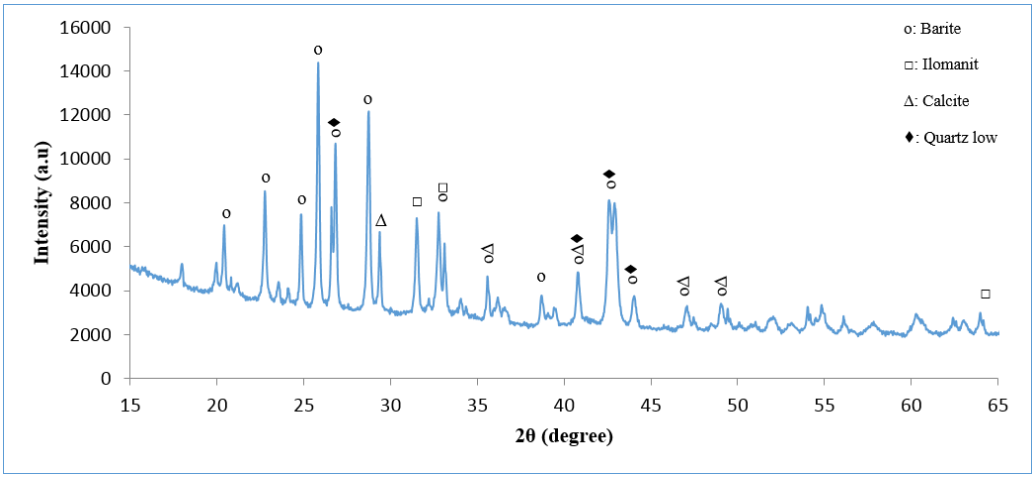
Şekil Ek 3.52. G18 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

Fe_2O_3	CaO	BaO	SiO_2	SO_3	Al_2O_3	MgO	K_2O	MnO	SrO	Na_2O
25,6300	18,7900	18,6000	12,9300	7,8600	3,2600	1,2300	0,5930	0,5020	0,3740	0,3450
TiO2	TiO_2	Cs_2O	I	NiO	ZnO	Co_3O_4	PuO_2	CuO	V_2O_5	Gd_2O_3
0,1280	0,0650	0,0623	0,0586	0,0464	0,0388	0,0222	0,0217	0,0184	0,0164	0,0150
As_2O_3	Cr_2O_3	Ag_2O	Nd_2O_3	MoO_3	Ga_2O_3	Rb_2O	Y_2O_3	LOI		
0,0107	0,0092	0,0086	0,0076	0,0070	0,0020	0,0019	0,0018	9,3400		

Şekil Ek 3.53. G18 kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



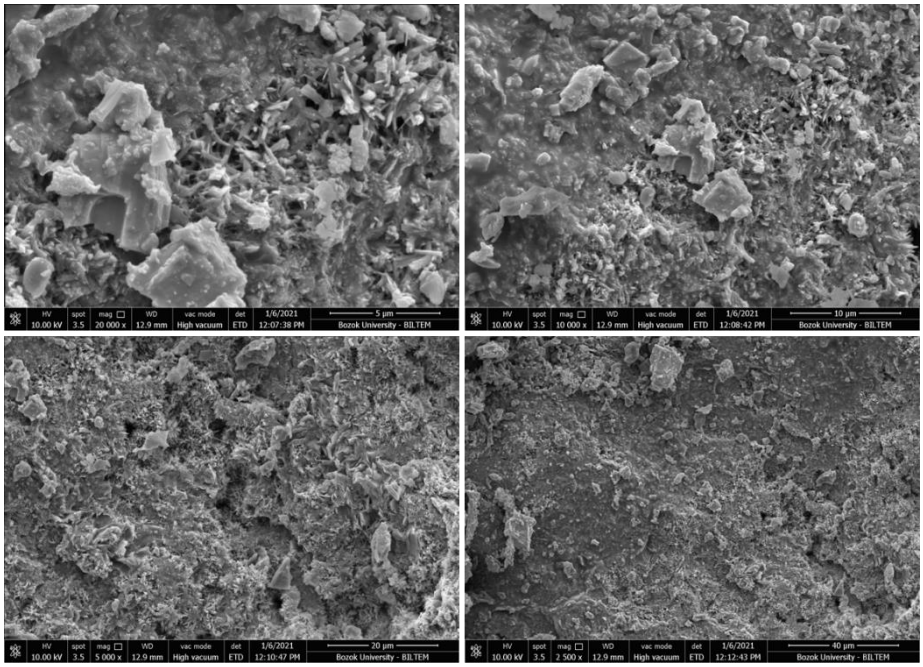
Şekil Ek 3.54. G18 kodlu numunenin SEM görüntüsü



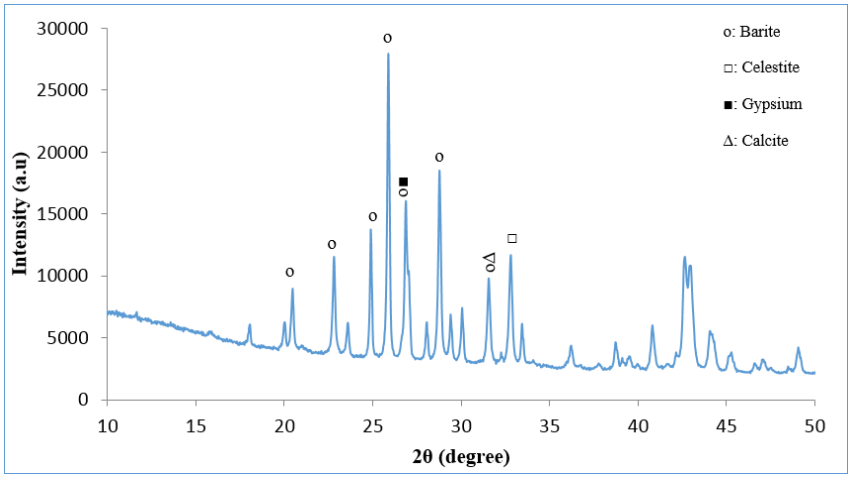
Şekil Ek 3.55. G19 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

Fe2O3	BaO	CaO	SO_3	SiO_2	MnO	Al_2O_3	MgO	SrO
26,0400	24,1600	14,3100	8,4800	7,9700	2,1000	1,7300	0,9650	0,5340
Na_2O	K_2O	Cs_2O	I	TiO_2	ZnO	PuO_2	Pr_6O_{11}	Co_3O_4
0,3580	0,2530	0,0740	0,0727	0,0542	0,0464	0,0308	0,0300	0,0288
Gd_2O_3	CuO	TeO_2	Cr_2O_3	Ag_2O	SnO_2	Nd_2O_3	Gd_2O_3	LOI
0,0193	0,0133	0,0115	0,0113	0,0093	0,0089	0,0082	0,0045	12,6700

Şekil Ek 3.56. G19 kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



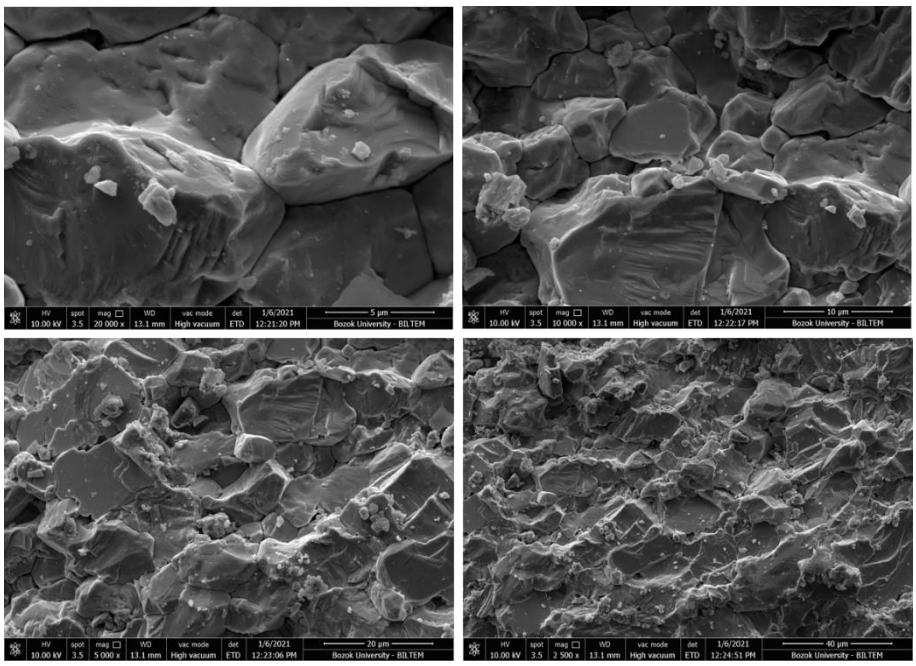
Şekil Ek 3.57. G19 kodlu numunenin SEM görüntüsü



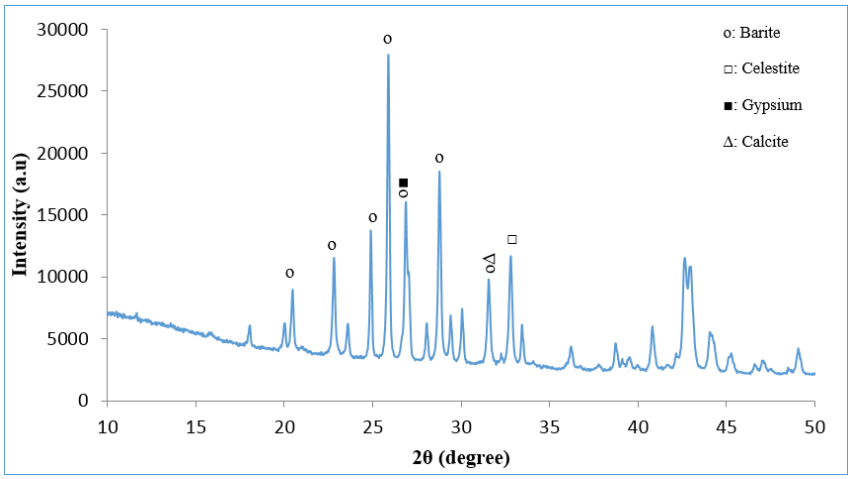
Şekil Ek 3.58. G20 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

BaO	SO_3	CaO	SrO	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	PuO_2	Na_2O
36,3600	17,1900	15,4100	10,5100	7,8100	1,4300	1,4100	0,9600	0,6300	0,4250
K_2O	MnO	Cr_2O_3	I	Cs_2O	TiO_2	Pr_6O_{11}	ZnO	SnO_2	Ag_2O
0,2400	0,1640	0,1220	0,0697	0,0640	0,0503	0,0452	0,0280	0,0156	0,0128
Nd_2O_3	HfO_2	IrO_2	CuO	MoO_3	Ga_2O_3	NiO	LOI		
0,0119	0,0099	0,0098	0,0091	0,0087	0,0041	0,0027	7,0000		

Şekil Ek 3.59. G20 kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



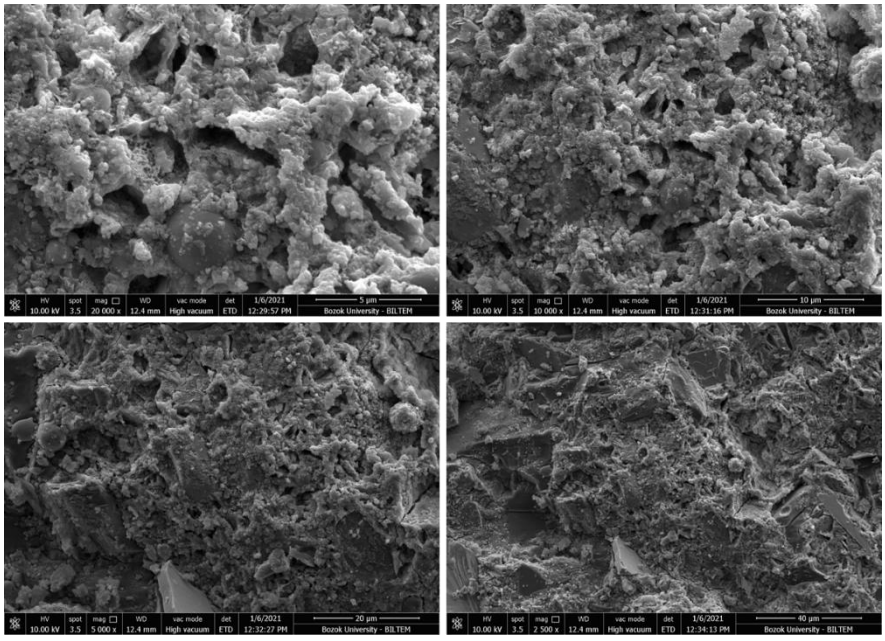
Şekil Ek 3.60. G20 kodlu numunenin SEM görüntüsü



Şekil Ek 3.61. G21 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

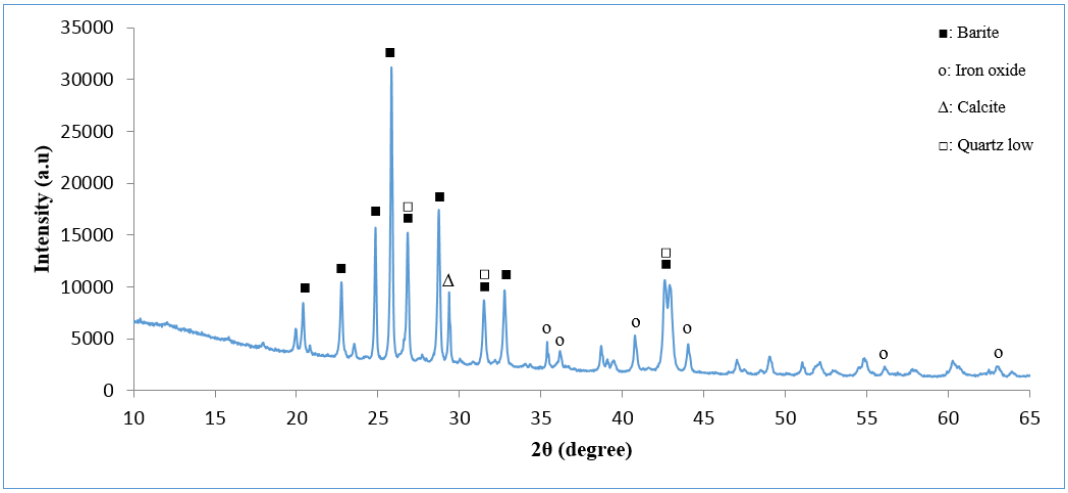
BaO	CaO	SiO_2	SO_3	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	SrO	MnO
33,2500	23,1800	13,15000	10,26000	2,52000	2,07000	2,0100	0,7760	0,4870
Na_2O	K_2O	Cr_2O_3	I	Cs_2O	TiO_2	PuO_2	ZnO	TeO_2
0,43500	0,29200	0,16700	0,11500	0,11000	0,06630	0,04180	0,0380	0,0141
Nd_2O_3	CuO	WO_3	NiO	Co_3O_4	Ga_2O_3	LOI		
0,01030	0,00810	0,00570	0,00450	0,00350	0,00220	10,9800		

Şekil Ek 3.62. G21 kodlu numunenin X-ışını floresans spektrometresi



Şekil Ek 3.63. G21 kodlu numunenin SEM görüntüsü

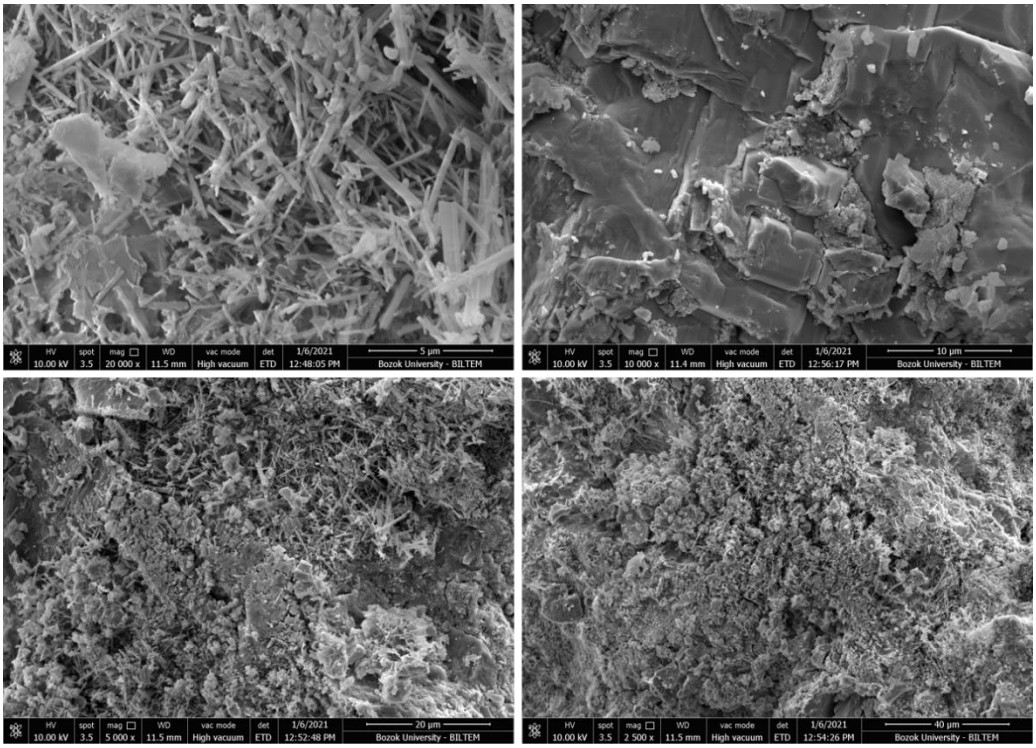
EK-3. (devam) Üretilen kompozit kaplama numunelerine ait analiz sonuçları



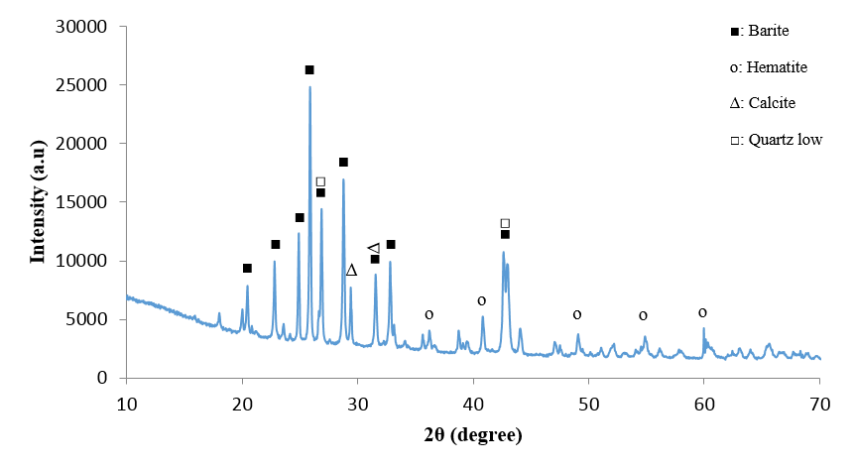
Şekil Ek 3.64. G22 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

BaO	SiO_2	CaO	SO_3	Fe_2O_3	MgO	Al_2O_3	Na2O	SrO	K_2O	MnO	Cr_2O_3
30,5600	15,4700	15,1700	11,5800	10,1500	3,8800	3,6400	0,7930	0,6640	0,5970	0,2250	0,1350
TiO_2	I	Cs_2O	PuO_2	ZnO	NiO	Co_3O_4	CuO	Nd_2O_3	Cl	Rb_2O	LOI
0,1300	0,1050	0,1000	0,0367	0,0303	0,0255	0,0150	0,0098	0,0078	0,0062	0,0027	6,6700

Şekil Ek 3.65. G22 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu



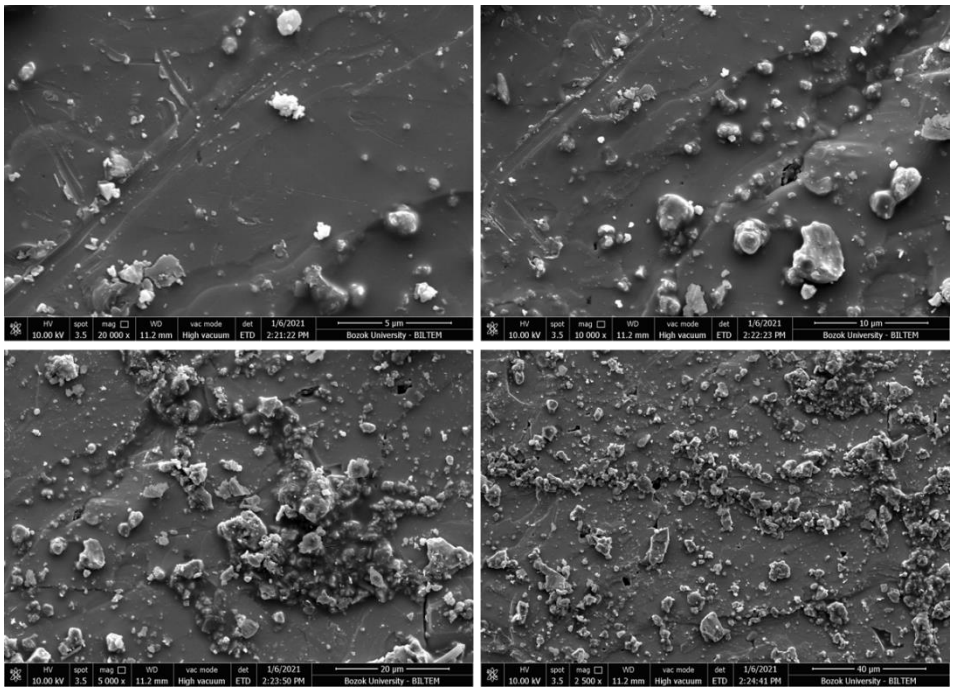
Şekil Ek 3.66. G22 kodlu numunenin SEM görüntüsü



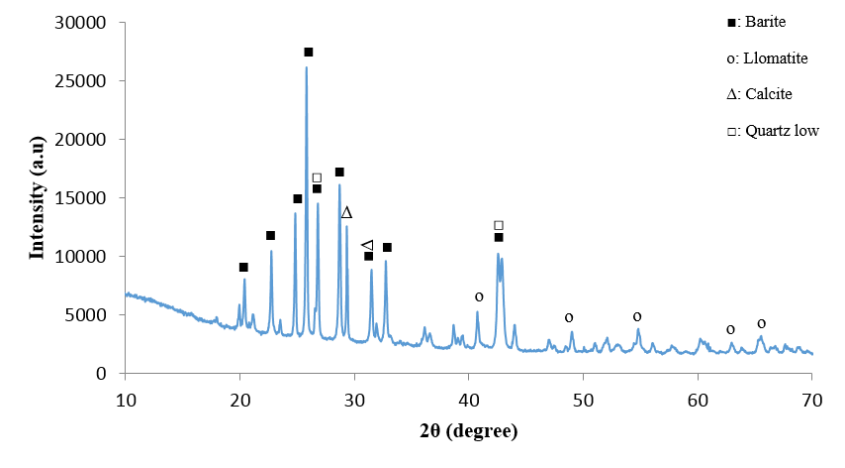
Şekil Ek 3.67. G23 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

BaO	Fe_2O_3	CaO	SiO_2	SO_3	Al_2O_3	MgO	SrO	K_2O	Na_2O
26,5700	18,9800	16,8700	12,3300	10,1400	2,8600	1,2900	0,6180	0,5080	0,4180
MnO	Cr_2O_3	TiO_2	I	Cs_2O	NiO	ZnO	PuO_2	Co_3O_4	Pr_6O_{11}
0,3890	0,1040	0,1020	0,0799	0,0770	0,0427	0,0404	0,0334	0,0305	0,0301
Nd_2O_3	CuO	V_2O_5	Gd_2O_3	CeO_2	Ag_2O	MoO_3	Ga_2O_3	Rb_2O	LOI
0,0147	0,0145	0,0133	0,0129	0,0122	0,0086	0,0069	0,0018	0,0015	8,4000

Şekil Ek 3.68. G23 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu



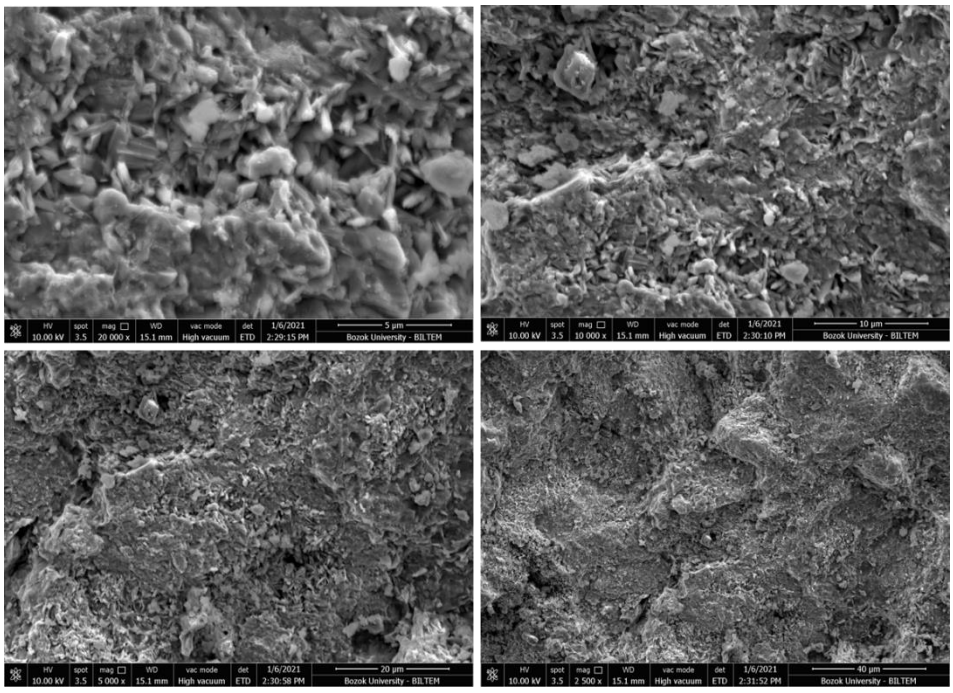
Şekil Ek 3.69. G23 kodlu numunenin SEM görüntüsü



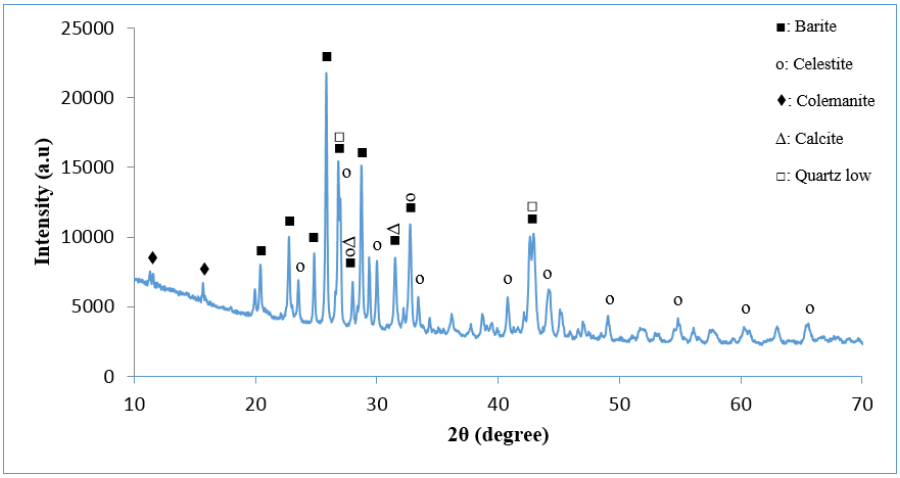
Şekil Ek 3.70. G24 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

BaO	Fe_2O_3	CaO	SO3	SiO_2	Al_2O_3	MnO	MgO	SrO	Na_2O
30,5900	19,3800	13,9700	10,4700	9,2200	1,7700	1,3600	1,1500	0,6100	0,4610
K_2O	Cr_2O3	Cs_2O	I	TiO_2	ZnO	PuO_2	Pr_6O_{11}	Co_3O_4	Nd_2O_3
0,3400	0,1140	0,0830	0,0785	0,0513	0,0429	0,0351	0,0348	0,0207	0,0128
CeO_2	Gd_2O_3	Rh_2O_3	Ag_2O	CuO	NiO	Au	LOI		
0,0122	0,0115	0,0110	0,0106	0,0093	0,0042	0,0025	10,1600		

Şekil Ek 3.71. G24 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu



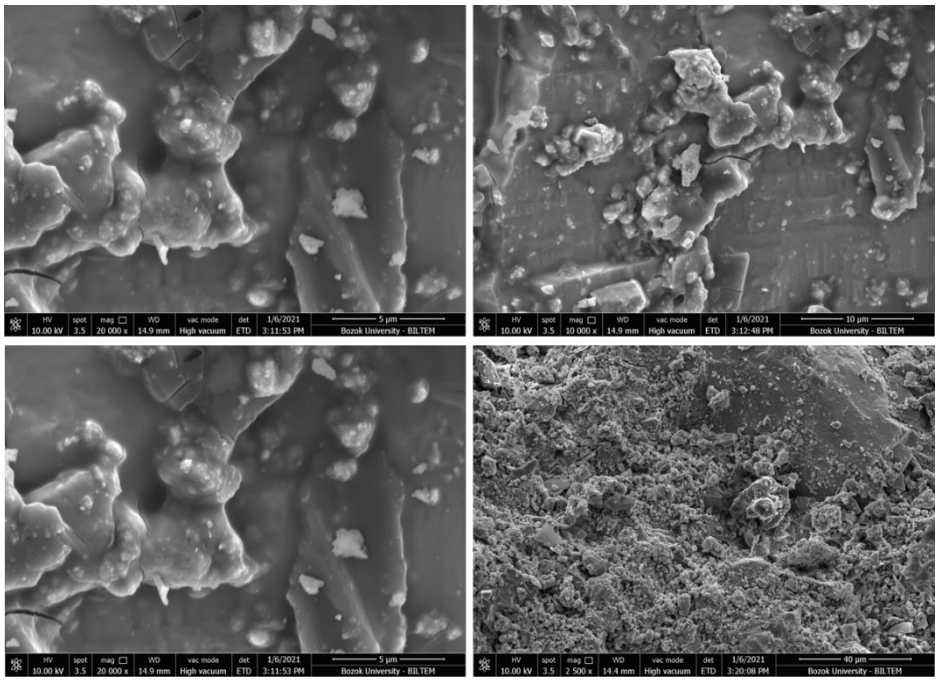
Şekil Ek 3.72. G24 kodlu numunenin SEM görüntüsü



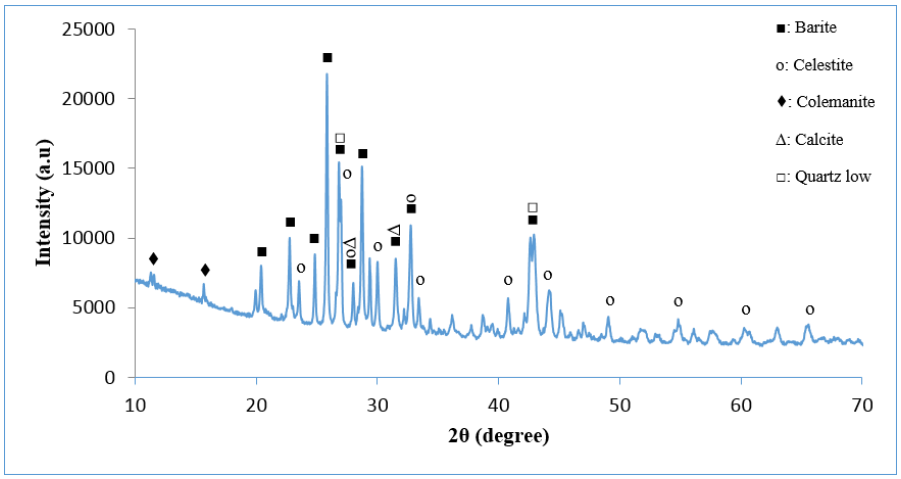
Şekil Ek 3.73. G25 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

BaO	CaO	SO_3	SrO	SiO_2	Fe_2O_3	MgO	Al_2O_3	BaO
26,1700	22,5100	14,8900	13,1200	7,2900	1,5700	1,4600	1,2800	26,1700
PuO_2	Na_2O	MnO	K_2O	I	TiO_2	Cs2O	Pr_6O_{11}	ZnO
0,7710	0,3440	0,2430	0,2110	0,0776	0,0545	0,0500	0,0339	0,0288
CuO	WO_3	Nd_2O_3	Cr_2O_3	Re_2O_7	Co_3O_4	LOI		
0,0096	0,0074	0,0073	0,0072	0,0063	0,0026	9,8500		

Şekil Ek 3.74. G25 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu



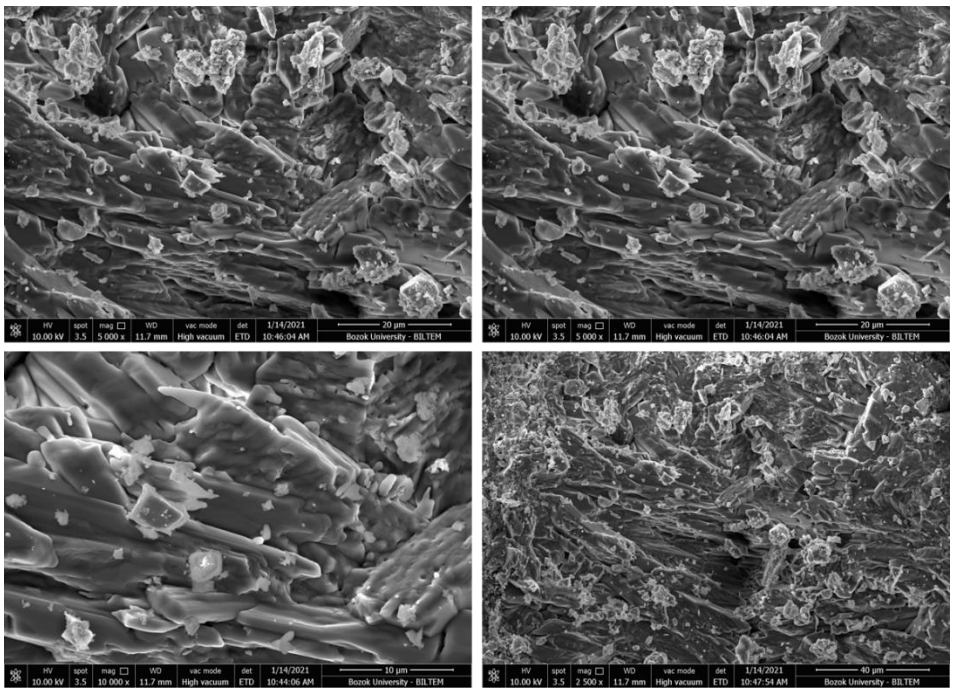
Şekil Ek 3.75. G25 kodlu numunenin SEM görüntüsü



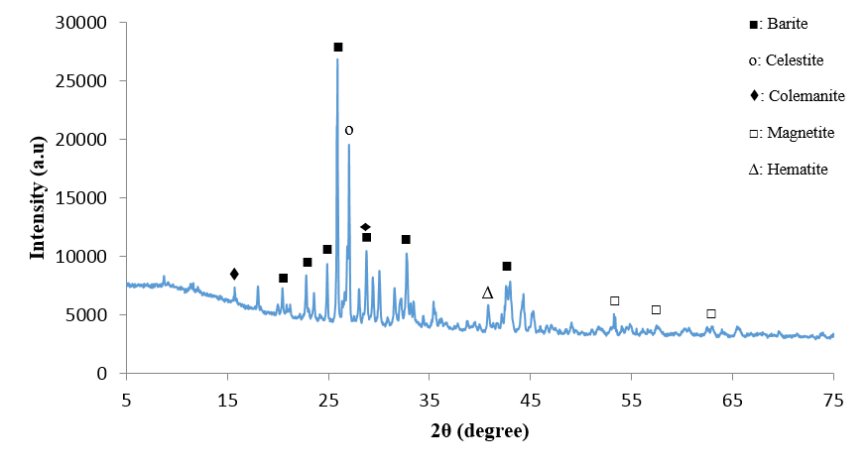
Şekil Ek 3.76. G26 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

CaO	Fe_2O_3	SiO_2	SrO	SO_3	MgO	Al_2O_3	K_2O	PuO_2	BaO
22,3100	20,4100	16,3100	11,8000	7,2400	7,0100	3,3000	0,7270	0,7190	0,4340
Na_2O	TiO_2	MnO	NiO	ThO_2	Cr_2O_3	ZnO	Co_3O_4	CuO	Cl
0,3310	0,1860	0,1300	0,0627	0,0430	0,0388	0,0348	0,0315	0,0274	0,0237
Pr_6O_{11}	V_2O_5	MoO_3	Gd_2O_3	WO_3	Rb_2O	Re_2O_7	LOI		
0,0128	0,0104	0,0073	0,0067	0,0055	0,0048	0,0044	8,7700		

Şekil Ek 3.77. G26 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu



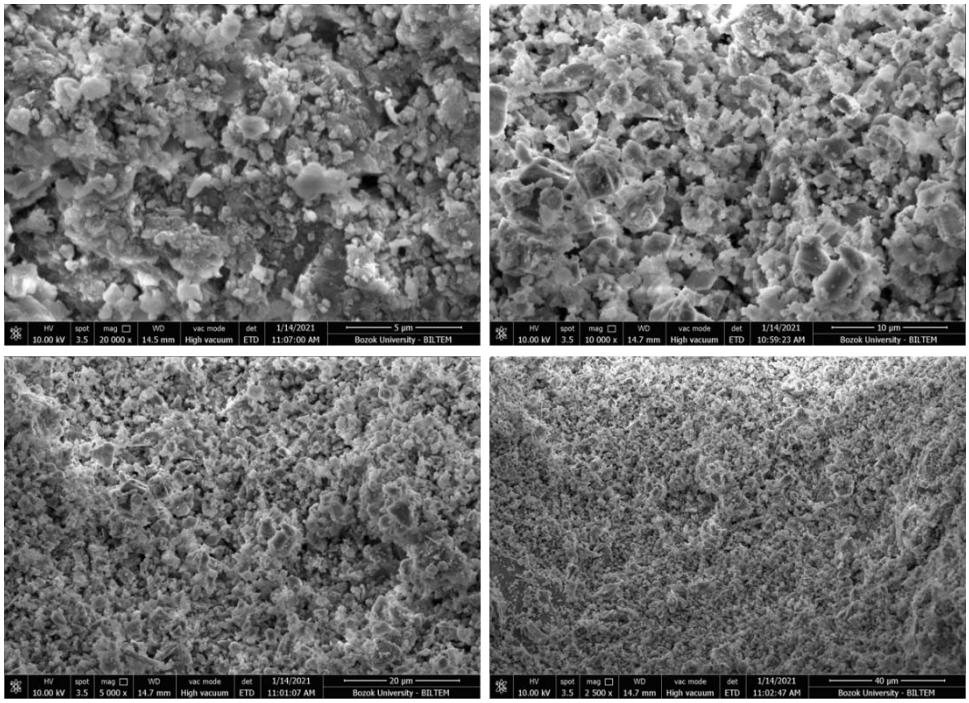
Şekil Ek 3.78. G26 kodlu numunenin SEM görüntüsü



Şekil Ek 3.79. G27 X-ışını difraksiyonu, XRD paterni

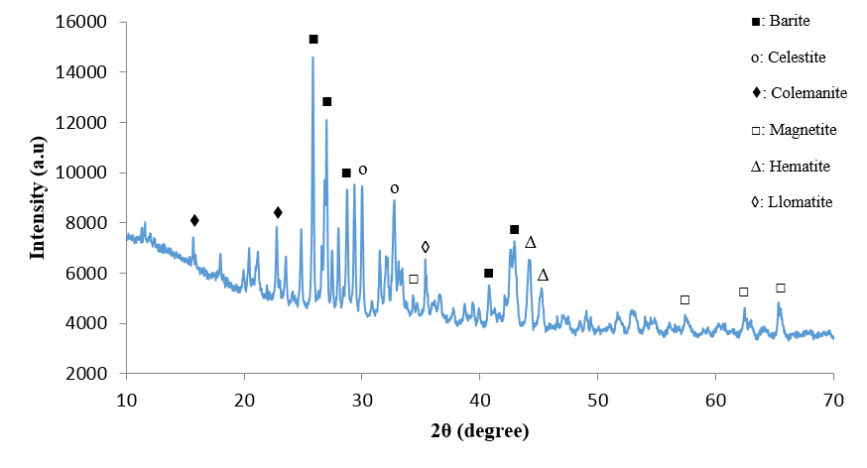
Fe_2O_3	CaO	SiO_2	BaO	SrO	SO_3	MgO	Al_2O_3
22,3100	20,5900	11,1600	10,9700	8,8600	8,4200	3,8300	2,2800
PuO_2	K_2O	MnO	Na_2O	TiO_2	I	ZnO	Co_3O_4
0,5320	0,4000	0,3560	0,3060	0,1070	0,0371	0,0316	0,0296
NiO	Cs_2O	CuO	Cr_2O_3	MoO_3	Ag_2O	Rb_2O	LOI
0,0275	0,0260	0,0219	0,0176	0,0081	0,0064	0,0023	9,67

Şekil Ek 3.80. G27 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu



Şekil Ek 3.81. G27 kodlu numunenin SEM görüntüsü

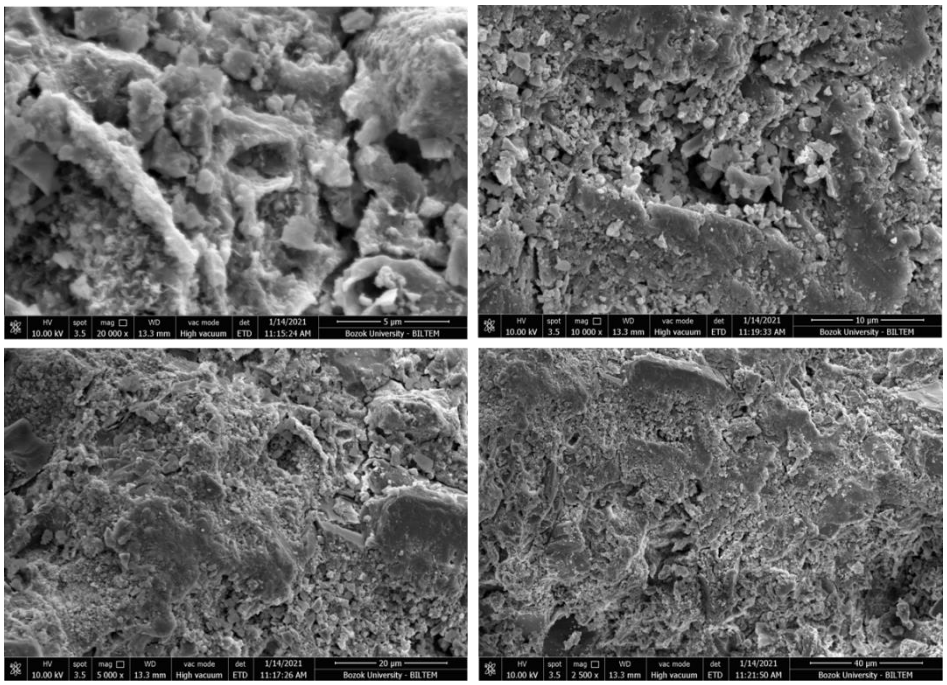
EK-3. (devam) Üretilen kompozit kaplama numunelerine ait analiz sonuçları



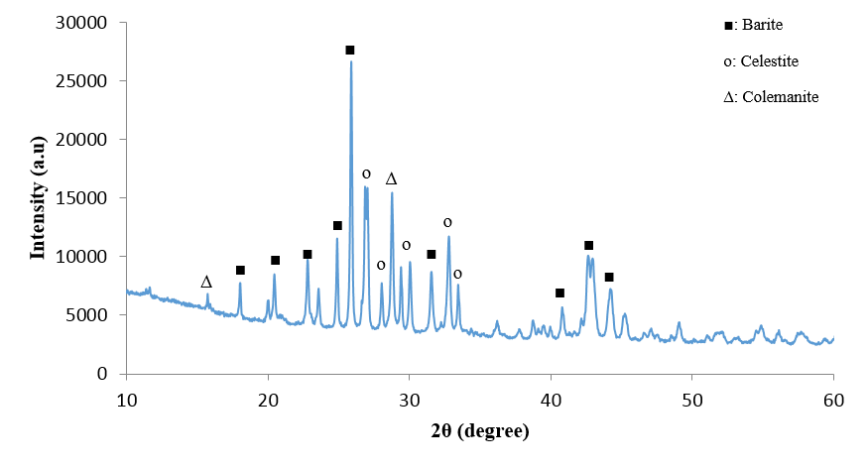
Şekil Ek 3.82. G28 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

Fe_2O_3	CaO	SiO_2	BaO	SrO	SO_3	MgO	Al_2O_3
25,9400	18,1200	10,5200	8,4400	7,4400	7,0400	3,3300	2,2000
MnO	PuO_2	K_2O	Na_2O	TiO_2	Co_3O_4	ZnO	I
0,9830	0,4550	0,3420	0,2590	0,0924	0,0361	0,0353	0,0288
Cs_2O	NiO	CuO	Cr_2O_3	MoO_3	Rh_2O_3	LOI	
0,0257	0,0253	0,0223	0,0126	0,0074	0,0062	14,6400	

Şekil Ek 3.83. G28 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu



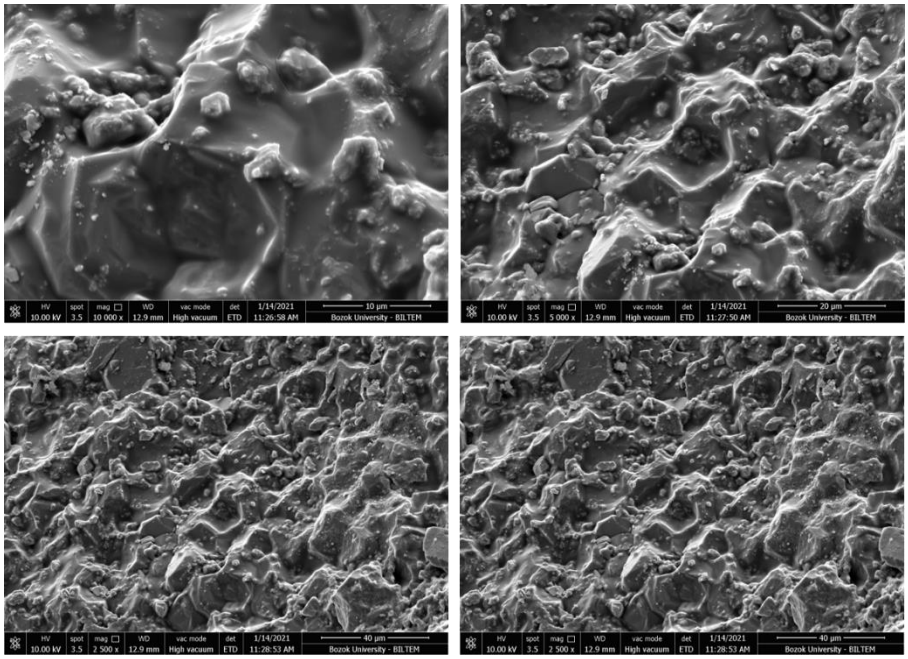
Şekil Ek 3.84. G28 kodlu numunenin SEM görüntüsü



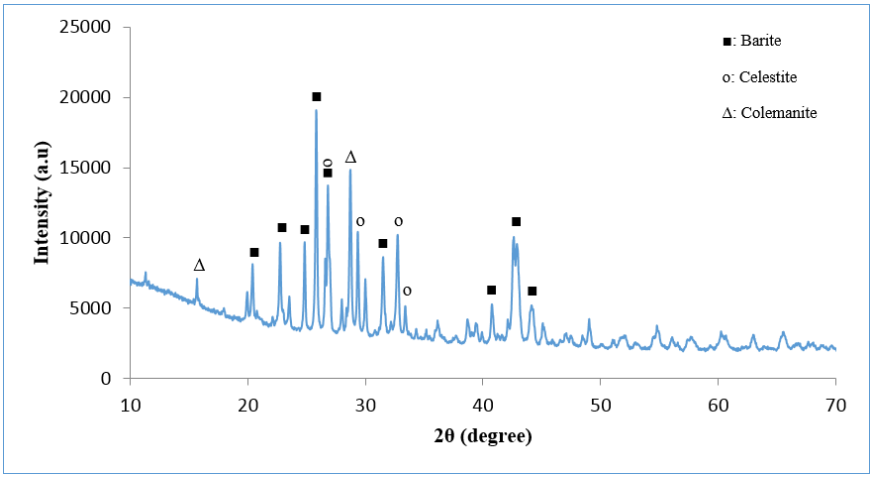
Şekil Ek 3.85. G29 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

BaO	CaO	SO_3	SrO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO
26,5500	20,7500	15,8100	15,2600	7,0500	1,4300	1,2900	1,1100
PuO_2	Na_2O	MnO	K_2O	I	TiO_2	Cs_2O	ZnO
0,9280	0,3120	0,1660	0,1640	0,0576	0,0551	0,0320	0,0281
Pr_6O_{11}	MoO_3	CuO	Am_2O_3	Cr_2O_3	LOI		
0,0224	0,0095	0,0094	0,0075	0,0072	8,9000		

Şekil Ek 3.86. G29 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu



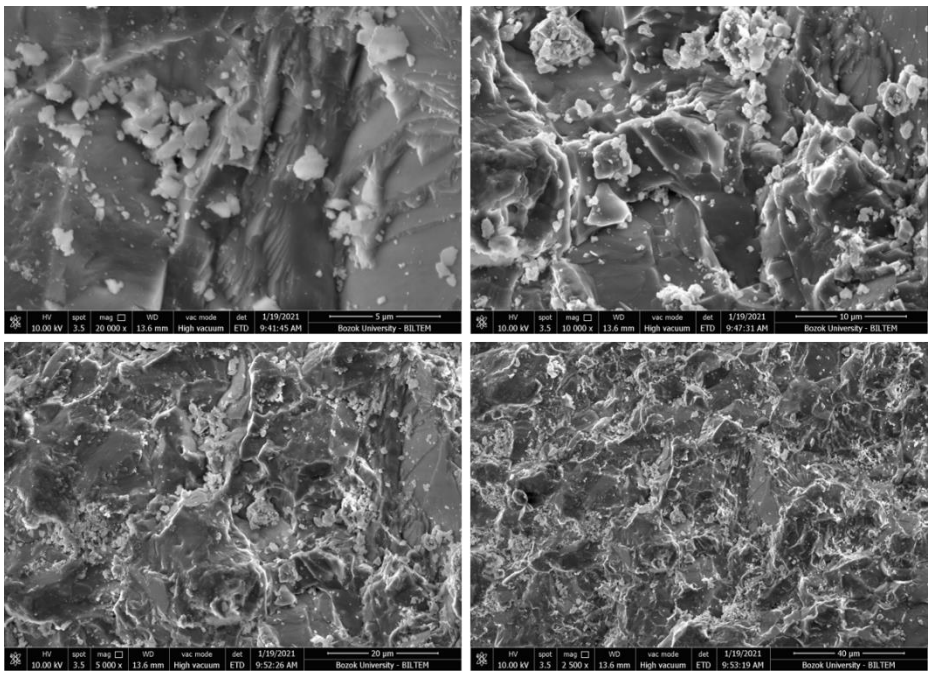
Şekil Ek 3.87. G29 kodlu numunenin SEM görüntüsü



Şekil Ek 3.88. G30 X kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

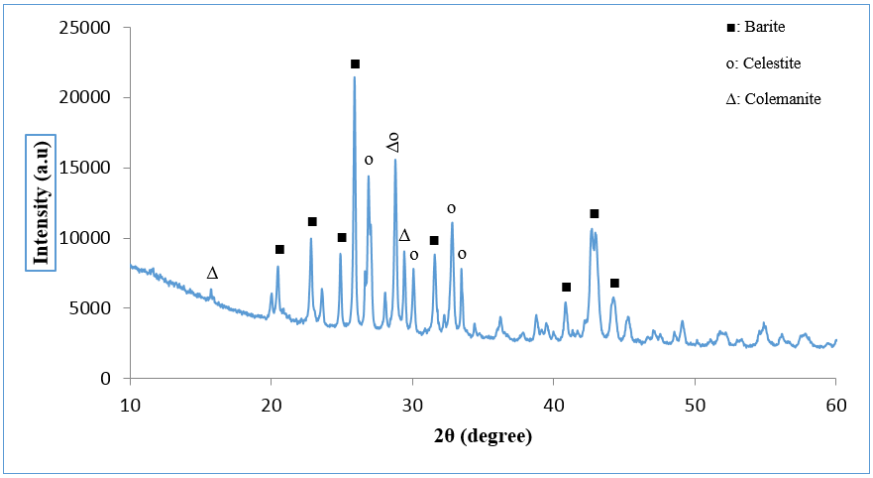
BaO	CaO	SO_3	SiO_2	SrO	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO
26,9900	24,3300	11,8500	9,7400	8,7300	2,2500	1,5000	1,4500
PuO_2	Na_2O	MnO	K_2O	I	Cs_2O	TiO_2	ZnO
0,5200	0,3210	0,3020	0,2270	0,0751	0,0620	0,0555	0,0262
Pr_6O_{11}	MoO_3	CuO	Ag_2O	Cr_2O_3	Am_2O_3	Co_3O_4	LOI
0,0202	0,0144	0,0105	0,0091	0,0077	0,0057	0,0028	11,5000

Şekil Ek 3.89. G30 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu



Şekil Ek 3.90. G30 kodlu numunenin SEM görüntüsü

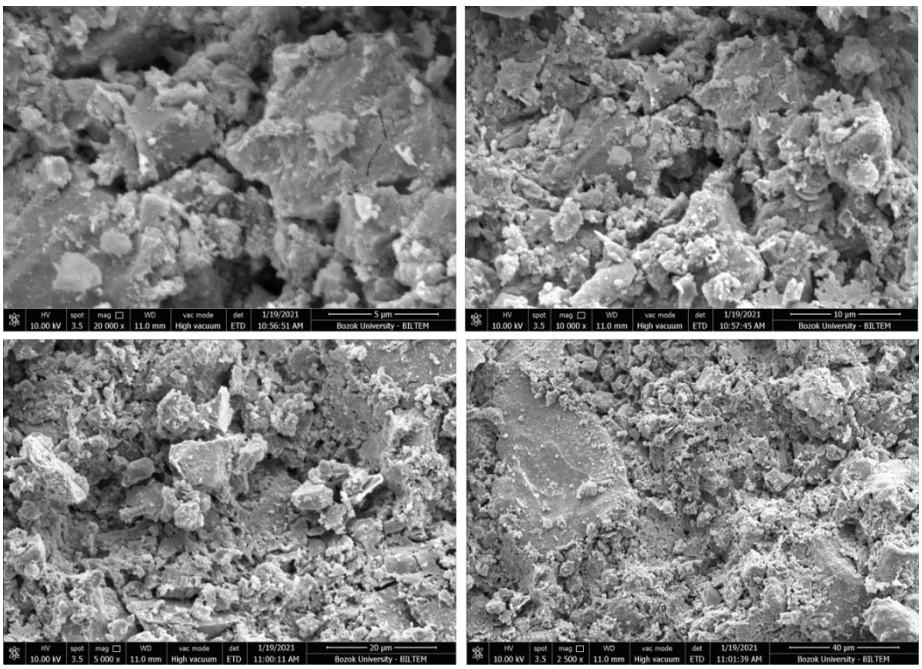
EK-3. (devam) Üretilen kompozit kaplama numunelerine ait analiz sonuçları



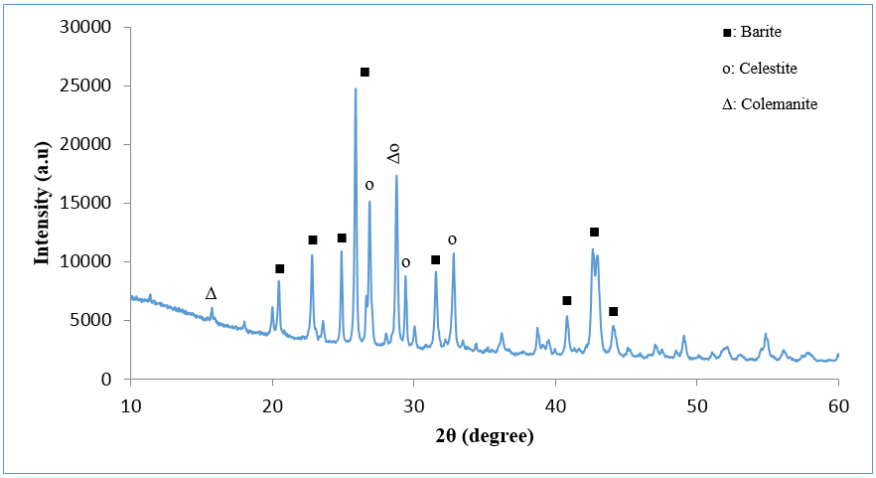
Şekil Ek 3.91. G31 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

BaO	CaO	SO_3	SrO	SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	PuO_2
29,5000	20,1300	15,3900	11,9200	8,7800	2,0200	1,4500	1,0200	0,7150
Na_2O	K_2O	MnO	I	TiO_2	Cs_2O	Pr_6O_{11}	ZnO	Ag_2O
0,3670	0,2600	0,2130	0,0673	0,0510	0,0470	0,0289	0,0243	0,0102
CuO	Cr_2O_3	MoO_3	Am_2O_3	WO_3	NiO	LOI		
0,0090	0,0089	0,0083	0,0071	0,0060	0,0021	7,9700		

Şekil Ek 3.92. G31 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu



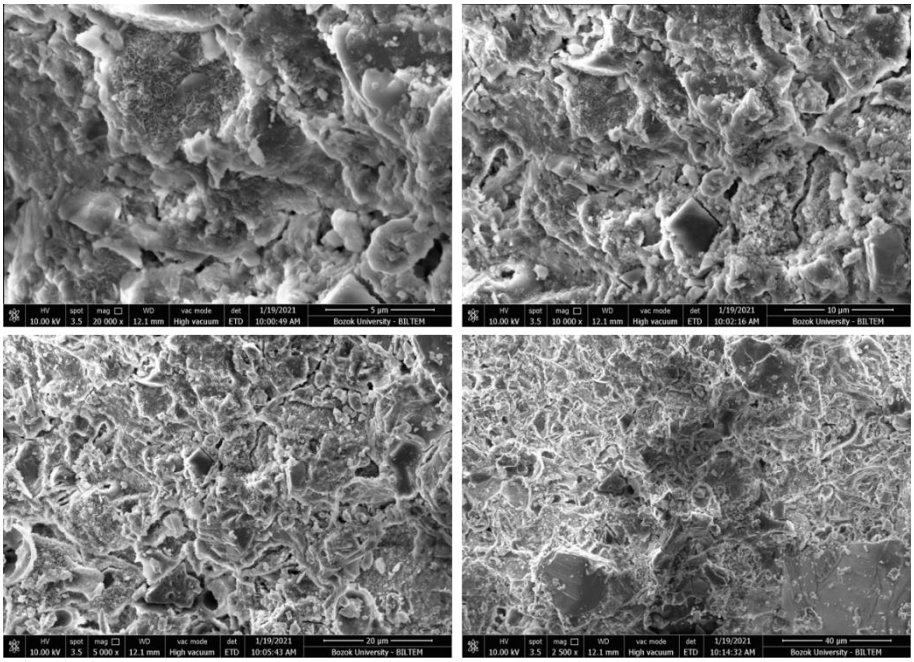
Şekil Ek 3.93. G31 kodlu numunenin SEM görüntüsü



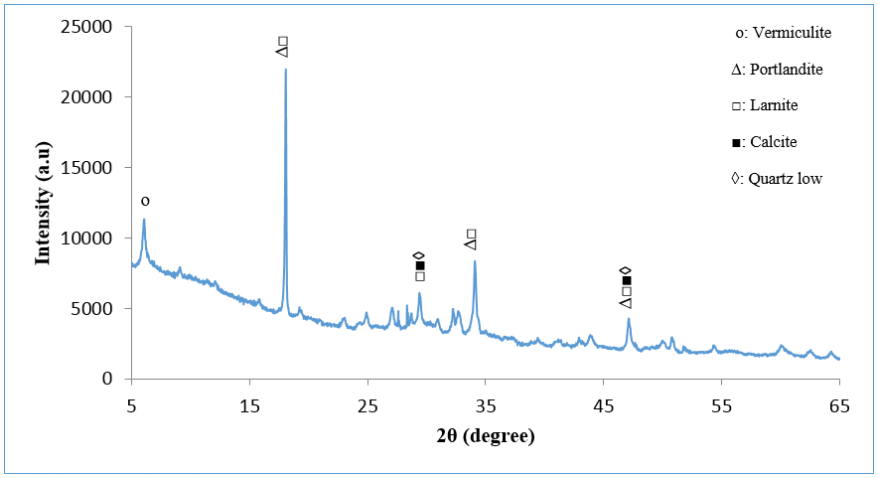
Şekil Ek 3.94. G32 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

BaO	CaO	SO_3	SiO_2	SrO	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO
34,4900	22,2900	13,2000	8,7400	5,0400	1,7800	1,5800	1,3800
PuO_2	MnO	K_2O	I	Cs_2O	TiO_2	ZnO	Na_2O
0,2980	0,2450	0,2030	0,1090	0,1000	0,0576	0,0247	0,3850
Pr_6O_{11}	Ag_2O	TeO_2	Nd_2O_3	Cr_2O_3	CuO	LOI	
0,0231	0,0148	0,0145	0,0128	0,0089	0,0071	10,0000	

Şekil Ek 3.95. G32 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu



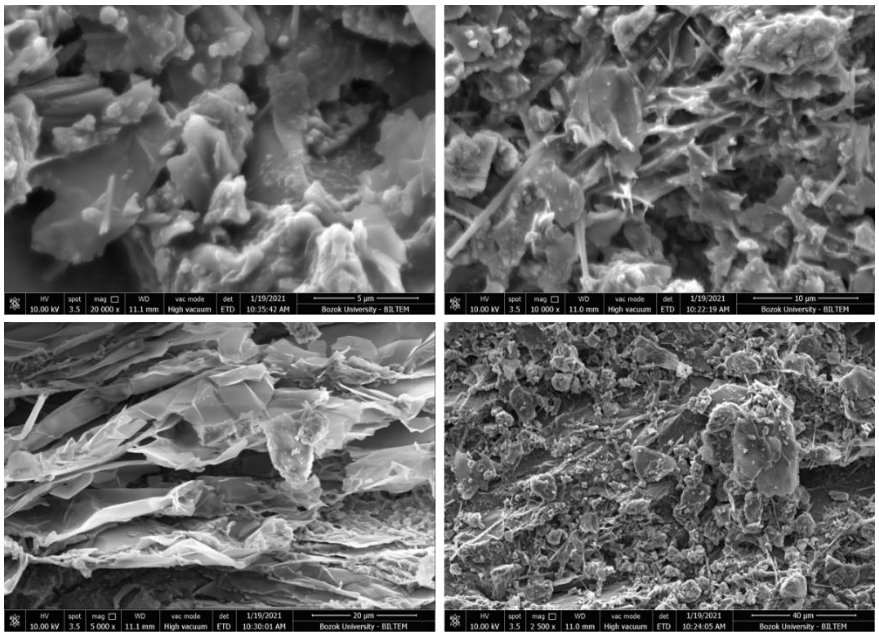
Şekil Ek 3.96. G32 kodlu numunenin SEM görüntüsü



Şekil Ek 3.97. G33 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

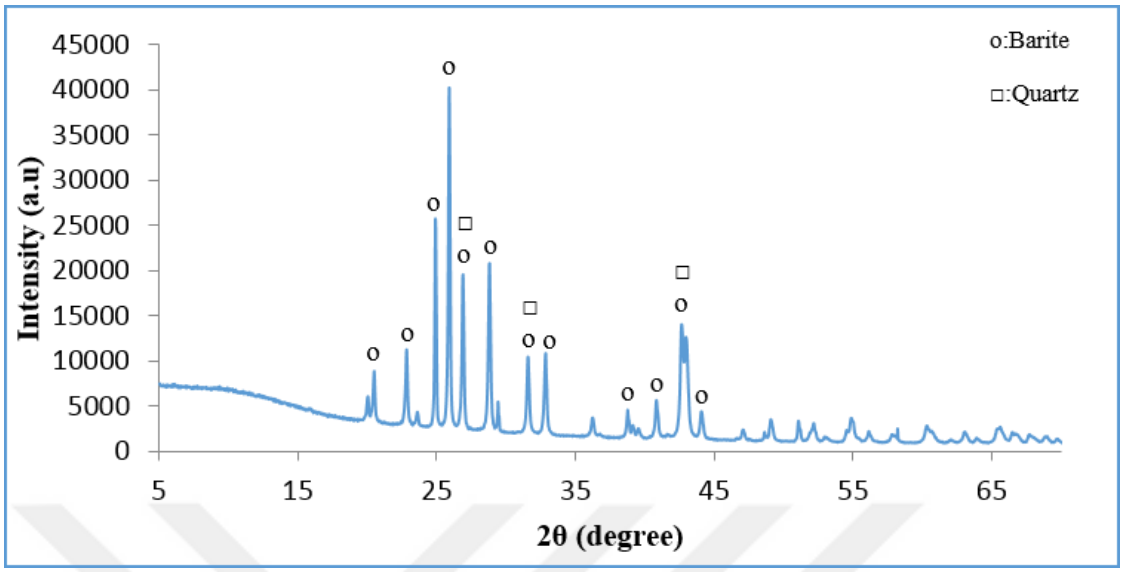
CaO	SiO_2	MgO	Al_2O_3	Fe_2O_3	SO_3	K_2O	TiO_2	BaO	Na_2O
32,7100	20,6900	10,2500	5,8600	3,6500	1,4900	0,5610	0,2560	0,2350	0,2150
MnO	SrO	ZnO	Cr_2O_3	CuO	V_2O_5	I	Cl	PuO_2	PbO
0,1840	0,1220	0,0733	0,0186	0,0168	0,0139	0,0103	0,0076	0,0073	0,0069
ZrO_2	Co_3O_4	NiO	Nd_2O_3	Nb_2O_5	MoO_3	Rb_2O	WO_3	Au	LOI
0,0065	0,0051	0,0042	0,0029	0,0026	0,0025	0,0022	0,0021	0,0020	23,6000

Şekil Ek 3.98. G33 kodlu numunenin X-ışını difraksiyonu

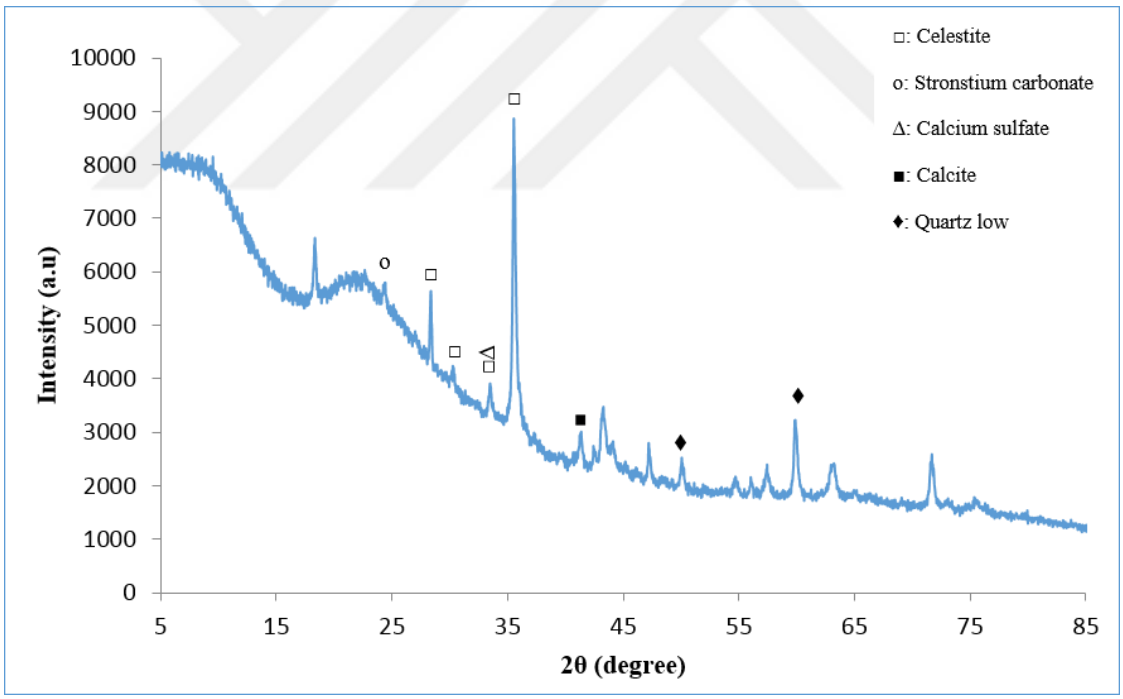


Şekil Ek 3.99. G33 kodlu numunenin SEM görüntüsü

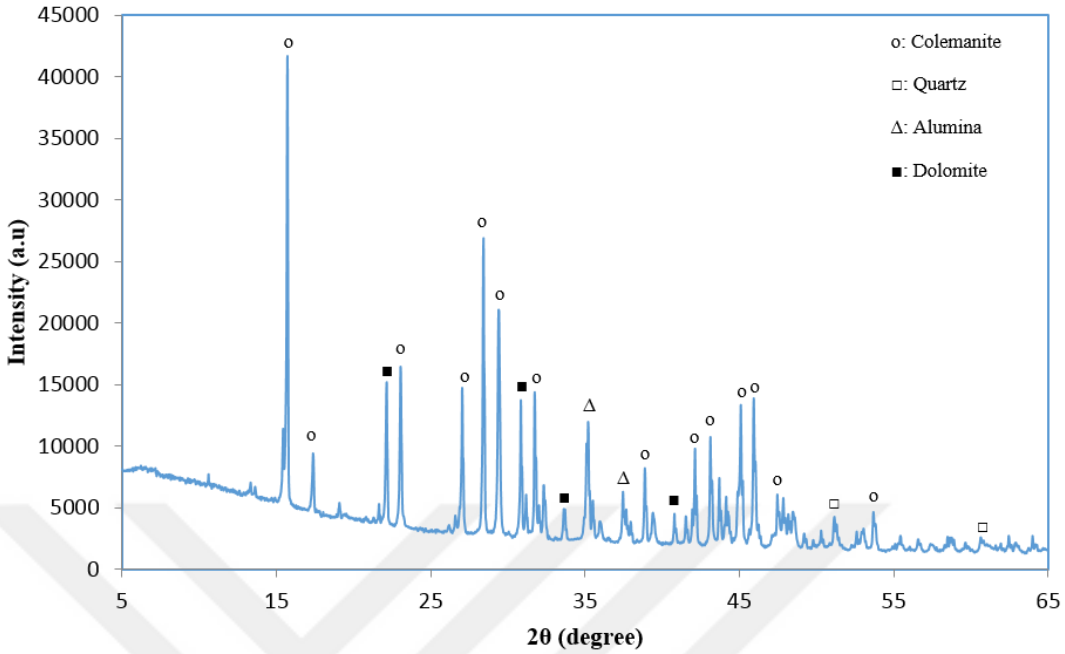
EK-4. Deneysel çalışmada kullanılan malzemelere ait XRD deney sonuçları



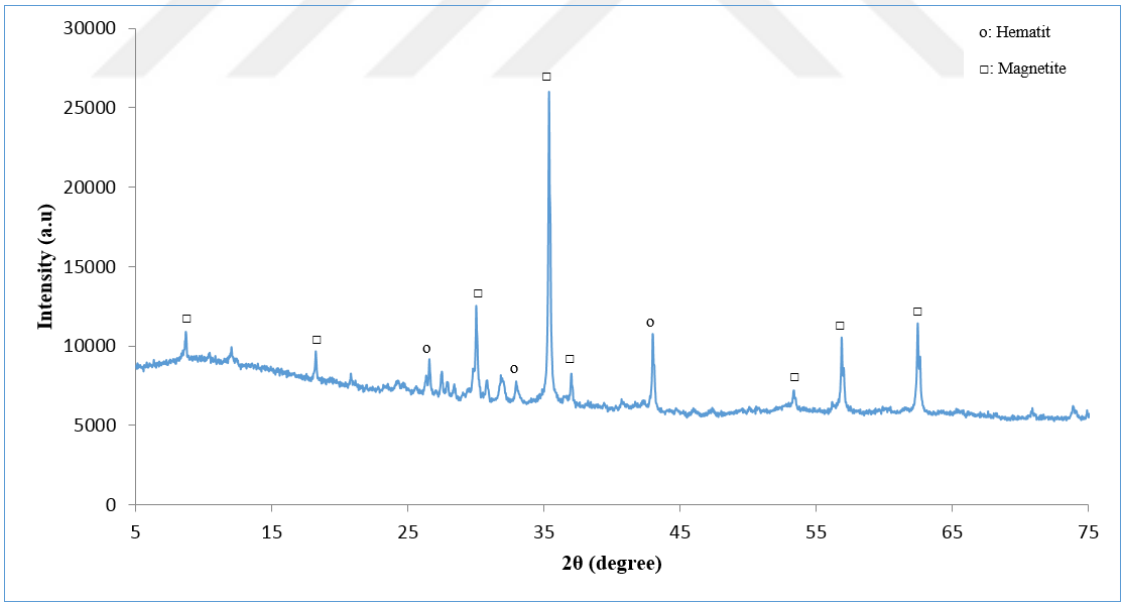
Şekil Ek 4.1. Barit X-ışını difraksiyonu, XRD paterni



Şekil Ek 4.2. Selestit X-ışını difraksiyonu, XRD paterni

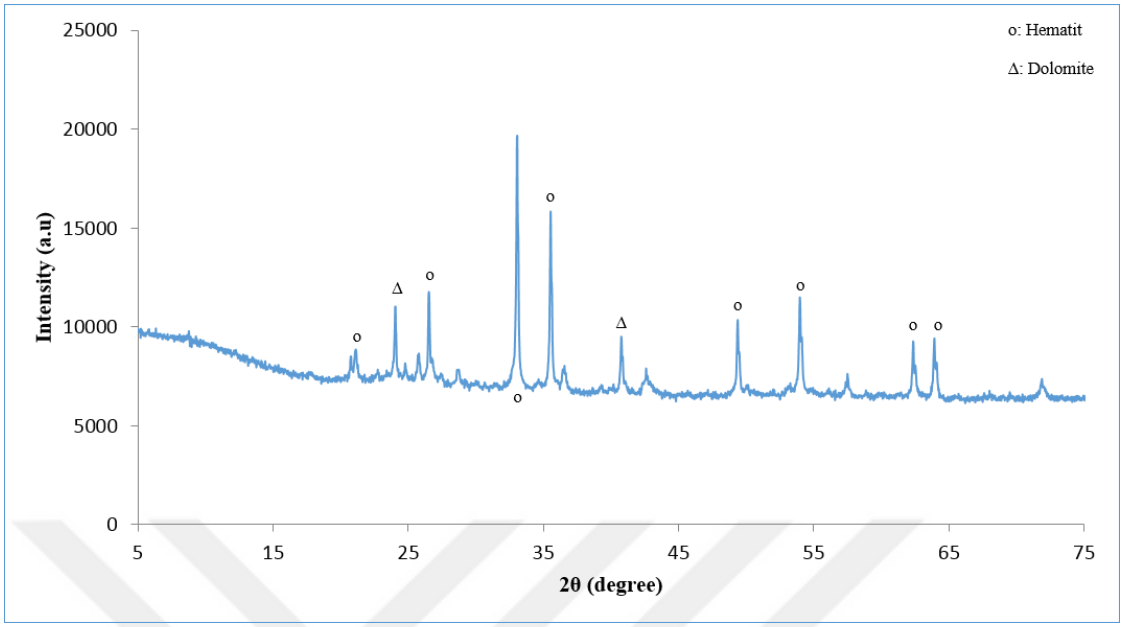


Şekil Ek 4.3. Kolemanit X-ışını difraksiyonu, XRD paterni

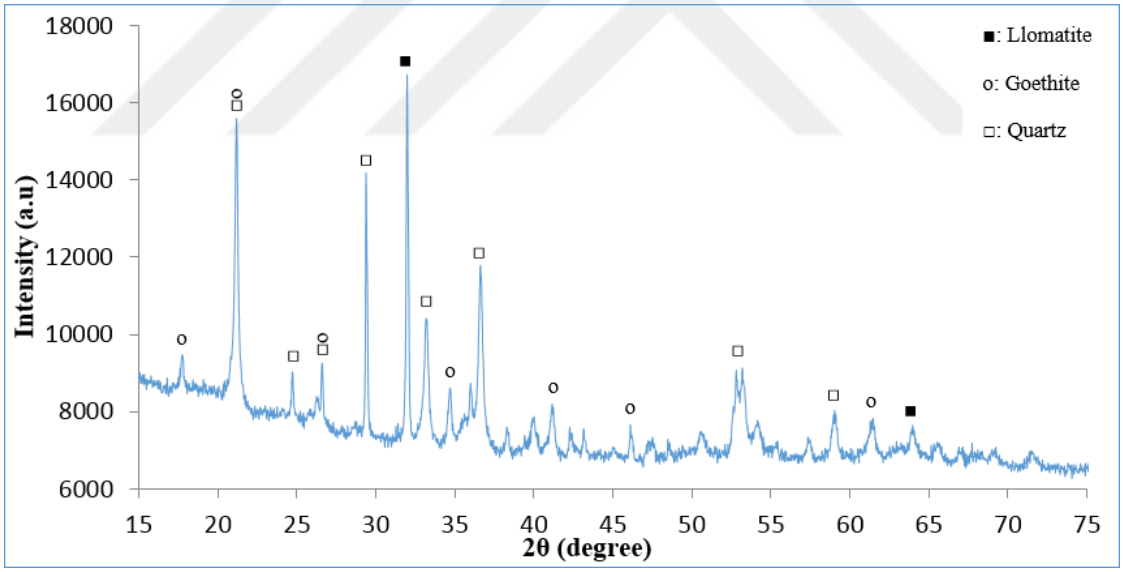


Şekil Ek 4.4. Manyetit X-ışını difraksiyonu, XRD paterni

EK-4. (devam) Deneysel çalışmada kullanılan malzemelere ait XRD deney sonuçları

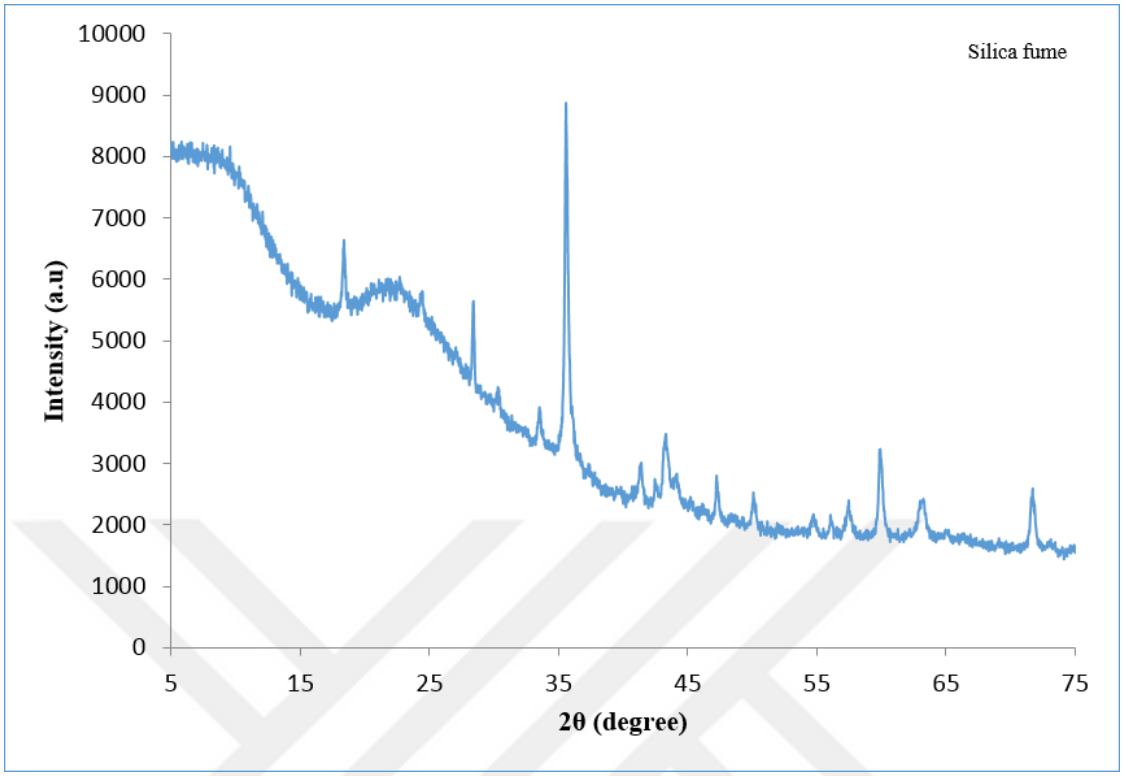


Şekil Ek 4.5. Hematit X-ışını difraksiyonu, XRD paterni

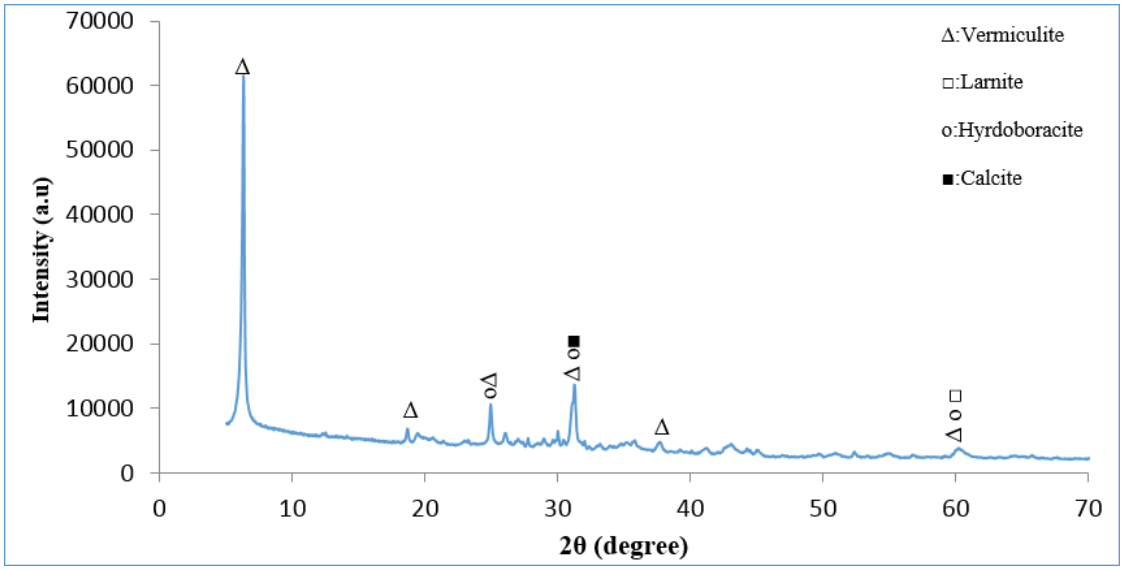


Şekil Ek 4.6. Limonit X-ışını difraksiyonu, XRD paterni

EK-4. (devam) Deneysel çalışmada kullanılan malzemelere ait XRD deney sonuçları



Şekil Ek 4.7. Silis dumanı X-ışını difraksiyonu, XRD paterni



Şekil Ek 4.8. Vemikülit X-ışını difraksiyonu, XRD paterni

EK-5. Numunelerin teorik radyasyon hesaplarında kullanılan kimyasal bileşenleri

Çizelge Ek 5.1 1. Grup numuneler

Oksit	G1 (B+C+W) %	G2 (S+C+W) %	G3 (K+C+W) %	G4 (M+C+W) %	G5 (H+C+W %	G6 (L+C+W) %	G7 (SD+C+W) %	G8 (V+C+W) %
$BaSO_4$	78.3345	-	-	-	-	-	-	-
SiO_2	3.9303	4.0216	9.3420	21.9960	18.3240	13.5139	54.7674	16.5558
Al_2O_3	1.0442	1.0039	1.3173	6.9298	3.8408	3.3702	0.5452	4.7395
Fe_2O_3	0.5395	0.8149	0.8920	46.1166	51.9528	46.8030	0.4148	2.9459
CaO	8.5769	17.4905	50.9326	11.1919	8.7653	10.0202	1.5170	28.0229
SO_3	1.3832	31.3258	1.0138	0.4709	0.4141	0.9043	0.3378	1.6168
MgO	0.4734	0.7209	3.4021	3.6751	0.8120	0.5518	2.4830	7.3810
Na_2O	0.6465	0.0952	0.3048	0.3234	0.1953	0.1945	0.0000	0.2432
K_2O	0.1763	0.1900	0.2329	2.8075	1.1233	0.7954	0.2963	0.4543
$SrSO_4$	1.8948	-	-	-	-	-	-	-
MnO	0.3229	0.0141	0.0156	-	-	-	-	0.0219
Cl	0.0721	0.0732	0.7195	0.0920	0.3441	0.4604	0.5428	1.5770
NH_3	0.0003	0.0003	0.0030	0.0004	0.0014	0.0019	0.0022	0.0065
Al	0.1412	0.1421	1.4838	0.1813	0.7075	0.9487	1.1111	3.2550
Fe	0.0424	0.0426	0.4451	0.0544	0.2123	0.2846	0.3333	0.9765
Na	0.1087	0.1095	1.1425	0.1396	0.5448	0.7305	0.8556	2.5064
Mn	0.0424	0.0426	0.4451	0.0544	0.2123	0.2846	0.3333	0.9765
SO_4	0.4378	0.4407	4.5998	0.5621	2.1933	2.9410	3.4444	10.0905
TiO_2	-	0.0083	0.0063	-	-	-	-	0.0897
BaO	-	1.3805	0.0513	-	-	-	-	0.0092
SrO	-	38.4056	1.4640	-	-	-	-	0.0083
Cr_2O_3	-	0.0083	0.0063	-	-	-	-	0.0028
P_2O_5	-	0.0083	0.0125	-	-	-	-	0.0372
LOI	1.0379	2.9253	16.0043	2.9135	5.2538	9.4670	0.7793	5.1362
Total (%)	99.2053	99.2641	93.8367	97.5089	94.8970	91.2721	99.2053	86.6532

Çizelge Ek 5.2 2. Grup numuneler

Oksit	G9 (B+SD+C+W) %	G10 (S+SD+C+W) %	G11 (K+SD+C+W) %	G12 (M+SD+C+W) %	G13 (H+SD+C+W) %	G14 (L+SD+C+W) %
$BaSO_4$	75.0965	-	-	-	-	-
SiO_2	5.2501	5.0962	11.9350	22.6872	19.7036	14.6358
Al_2O_3	1.0564	0.9442	1.4164	6.6841	3.8592	3.2862
Fe_2O_3	0.5753	0.7585	0.9588	44.1106	51.4522	44.7938
CaO	8.8373	16.0882	52.1181	11.3829	9.3215	10.2886
SO_3	1.3697	27.7066	0.9062	0.4813	0.4393	0.8969
MgO	0.6308	0.7258	3.7170	3.6080	0.8940	0.6264
Na_2O	0.6235	0.0879	0.3119	0.3132	0.1971	0.1903
K_2O	0.1779	0.1771	0.2489	2.6928	1.1210	0.7708
$SrSO_4$	1.8165	-	-	-	-	-
MnO	0.3095	-	-	-	-	-
Cl	0.1541	0.5058	0.5130	0.1735	0.2704	0.5196
NH_3	0.0006	0.0021	0.0021	0.0007	0.0011	0.0021
Al	0.3116	1.0440	1.0526	0.3510	0.5534	1.0718
Fe	0.0935	0.3132	0.3158	0.1053	0.1660	0.3215
Na	0.2400	0.8039	0.8105	0.2703	0.4262	0.8252
Mn	0.0935	0.3132	0.3158	0.1053	0.1660	0.3215
SO_4	0.9660	3.2366	3.2631	1.0881	1.7157	3.3224
TiO_2	-	0.0073	0.0063	-	-	-
BaO	-	1.2198	0.0514	-	-	-
SrO	-	33.9329	1.4675	-	-	-
Cr_2O_3	-	0.0073	0.0063	-	-	-
P_2O_5	-	0.0073	0.0125	-	-	-
LOI	1.0205	2.6109	16.0860	2.8126	5.2261	8.7338
Total (%)	98.6233	95.5889	95.5153	96.8670	95.5128	90.6069

EK-5. (devam) Numunelerin teorik radyasyon hesaplarında kullanılan kimyasal bileşenleri

Çizelge Ek 5.3 3. Grup numuneler

Oksit	G15 (B+S+C+W) %0	G16 (B+K+C+W) %	G17 (B+M+C+W) %	G18-1d (B+H+C+W) %	G18-2d (B+H+C+W) %	G19 (B+L+C+W) %
$BaSO_4$	40.4737	49.0153	40.6516	34.2665	38.9008	41.9127
SiO_2	3.8664	5.9790	12.1361	11.8889	10.8000	8.3255
Al_2O_3	0.9977	1.1500	3.7228	2.6993	2.3732	2.1105
Fe_2O_3	0.1610	0.6875	21.4594	22.7653	25.3627	21.8464
CaO	12.4151	24.5497	9.5882	14.6889	8.4946	9.2060
SO_3	15.0220	1.1983	0.9425	1.1209	0.8951	1.1653
MgO	0.6229	1.6967	1.9820	1.0101	0.6747	0.5586
Na_2O	0.3775	0.5194	0.4840	0.4112	0.4154	0.4355
K_2O	0.1778	0.1981	1.3802	0.6645	0.6299	0.4605
$SrSO_4$	0.9790	1.1856	0.9833	0.8289	0.9410	1.0138
MnO	0.1733	0.2079	0.1676	0.1412	0.1603	0.1728
Cl	0.1996	0.3048	0.1854	0.2685	0.3005	0.2723
NH_3	0.0008	0.0012	0.0008	0.0011	0.0012	0.0011
Al	0.4065	0.6237	0.3769	0.5435	0.6170	0.5576
Fe	0.1220	0.1871	0.1131	0.1631	0.1851	0.1673
Na	0.3130	0.4802	0.2902	0.4185	0.4751	0.4294
Mn	0.1220	0.1871	0.1131	0.1631	0.1851	0.1673
SO_4	1.2602	1.9335	1.1683	1.6849	1.9128	1.7286
TiO_2	0.0038	0.0024	-	-	-	-
BaO	0.6302	0.0193	-	-	-	-
SrO	17.5305	0.5512	-	-	-	-
Cr_2O_3	0.0038	0.0024	-	-	-	-
P_2O_5	0.0038	0.0047	-	-	-	-
LOI	1.8715	6.6750	1.8759	3.0019	3.0522	4.7464
Total (%)	97.7340	97.3601	97.6213	96.7300	96.3768	95.2775

Çizelge Ek 5.4 4. Grup numuneler

Oksit	G20 (B+S+SD+C+W) %	G21 (B+K+SD+C+W) %	G22 (B+M+SD+C+W) %	G23 (B+H+SD+C+W) %	G24 (B+L+SD+C+W) %
$BaSO_4$	50.0472	56.5800	50.5785	45.2045	51.9253
SiO_2	5.1756	6.6221	10.5176	10.1951	8.1340
Al_2O_3	0.9518	1.1124	2.7685	2.0908	1.7419
Fe_2O_3	0.6331	0.6477	13.9628	15.6193	14.1910
CaO	11.1861	18.3018	9.4540	11.9089	9.2725
SO_3	10.0445	1.2345	1.0706	1.1312	1.2230
MgO	0.6592	1.3056	1.5351	0.8640	0.6286
Na_2O	0.4444	0.5395	0.5163	0.4572	0.4897
K_2O	0.1768	0.1896	0.9485	0.4936	0.3602
$SrSO_4$	1.2106	1.3686	1.2235	1.0935	1.2560
MnO	0.2104	0.2367	0.2085	0.1863	0.2140
Cl	0.2890	0.3419	0.2472	0.3743	0.2700
NH_3	0.0012	0.0014	0.0010	0.0015	0.0011
Al	0.5926	0.7016	0.5054	0.7670	0.5528
Fe	0.1778	0.2105	0.1516	0.2301	0.1658
Na	0.4563	0.5402	0.3892	0.5906	0.4257
Mn	0.1778	0.2105	0.1516	0.2301	0.1658
SO_4	1.8370	2.1748	1.5668	2.3778	1.7137
TiO_2	0.0024	-	-	-	-
BaO	0.4020	0.0115	-	-	-
SrO	11.1841	0.3278	-	-	-
Cr_2O_3	0.0024	0.0014	-	-	-
P_2O_5	0.0024	0.0028	-	-	-
LOI	1.5404	4.3625	1.5529	2.3105	1.5032
Total (%)	97.4048	97.0253	97.3496	96.1266	94.2346

EK-5. (devam) Numunelerin teorik radyasyon hesaplarında kullanılan kimyasal bileşenleri

Çizelge Ek 5.5 5. Grup numuneler

Oksit	G25 (B+S+K+C+W) %	G26 (B+S+K+M+C+W) %	G27 (B+S+K+M+H+C+W) %	G28 (B+S+K+M+H+L+C+W) %
$BaSO_4$	31.7747	22.9886	17.6847	14.7332
SiO_2	5.2068	9.5459	11.3531	11.6674
Al_2O_3	1.0106	2.5396	2.7953	2.8799
Fe_2O_3	0.7233	12.4848	20.9811	25.0683
CaO	21.5659	18.8802	16.4371	15.3734
SO_3	11.6847	8.8189	6.8654	5.8810
MgO	1.3253	1.9338	1.6656	1.4812
Na_2O	0.3676	0.3520	0.3135	0.2931
K_2O	0.1930	0.8698	0.9154	0.8929
$SrSO_4$	0.7686	0.5561	0.4278	0.3564
MnO	0.1396	0.1012	0.0778	0.0649
Cl	0.2686	0.2459	0.3223	0.3603
NH_3	0.0011	0.0010	0.0013	0.0015
Al	0.5488	0.5016	0.6612	0.7404
Fe	0.1646	0.1505	0.1983	0.2221
Na	0.4226	0.3862	0.5091	0.5701
Mn	0.1646	0.1505	0.1983	0.2221
SO_4	1.7013	1.5548	2.0496	2.2953
TiO_2	0.0044	0.0033	0.0025	0.0021
BaO	0.4931	0.3675	0.2823	0.2358
SrO	13.7273	10.2312	7.8588	6.5636
Cr_2O_3	0.0044	0.0033	0.0025	0.0021
P_2O_5	0.0059	0.0044	0.0034	0.0028
LOI	5.2296	4.6365	4.7147	5.4068
Total (%)	97.4964	97.3074	96.3210	95.3168

Çizelge Ek 5.6 6. ve 7. Grup numuneler

Oksit	G29 (B+S+K+C+W) %	G30 (B+S+K+C+W) %	G31 (B+S+K+C+W) %	G32 (B+S+K+C+W) %	G33 (V) %
$BaSO_4$	127.7107	45.4109	47.4228	50.3289	-
SiO_2	4.4431	5.1260	4.3185	4.9098	16.5467
Al_2O_3	0.9636	1.0461	0.9652	1.0398	4.7395
Fe_2O_3	0.6625	0.6728	0.6406	0.6511	2.9459
CaO	15.8067	19.6620	14.5598	17.8192	28.0229
SO_3	10.7911	6.4533	9.3069	5.5888	1.6168
MgO	0.9313	1.2742	0.8668	1.1574	7.0661
Na_2O	0.4153	0.4615	0.4451	0.4881	0.2432
K_2O	0.1819	0.1889	0.1792	0.1858	0.4543
$SrSO_4$	1.0297	1.0985	1.1471	1.2174	-
MnO	0.1817	0.1932	0.2007	0.2125	0.0219
Cl	0.2802	0.2986	0.2954	0.2912	1.5770
NH_3	0.0011	0.0012	0.0012	0.0012	0.0065
Al	0.5739	0.6115	0.6057	0.5964	3.2550
Fe	0.1722	0.1835	0.1817	0.1789	0.9765
Na	0.4419	0.4709	0.4664	0.4592	2.5064
Mn	0.1722	0.1835	0.1817	0.1789	0.9765
SO_4	1.7791	1.8957	1.8777	1.8489	10.0905
TiO_2	0.0033	0.0029	0.0028	0.0024	0.0897
BaO	0.4435	0.2517	0.3741	0.2093	0.0092
SrO	12.3426	7.0117	10.4095	5.8290	0.0083
Cr_2O_3	0.0033	0.0029	0.0028	0.0024	0.0028
P_2O_5	0.0040	0.0043	0.0034	0.0036	0.0372
LOI	3.2590	4.7901	2.8915	4.1794	5.1362
Total (%)	182.5941	97.2959	97.3467	97.3799	86.3292

EK-6. İTÜ Enerji Enstitüsü radyasyon deney sonuç raporları

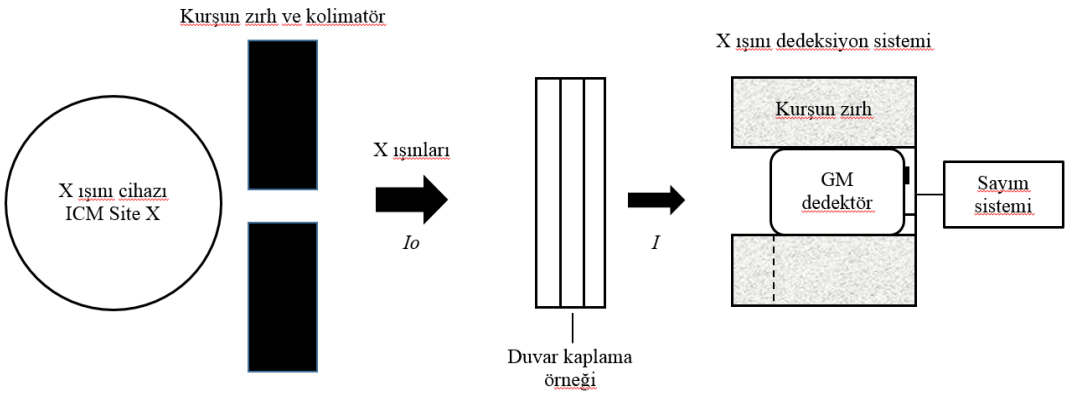
RAPOR

Lineer Zayıflatma Katsayıları

(X Işınları)

RAPOR NO:	2
ÖRNEK SAYISI:	37
RAPOR TARİHİ:	5.12.2020
ANALİZ TARİHİ:	12.11.2020
İSTEYEN KURUM	Bozok Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, ABD
İLGİLİ KİŞİ	Gülsüm SAĞLAM ÇİTOĞLU

Beton örneklerin x ışını lineer zayıflatma katsayıları, x ışını cihazının (ICM SiteX) 150 kiloVolt çalışma gerilimde ve 1 miliAmper hedef akımında yaydığı 150 keV enerjili x ışınları ve Geiger Müller (GM) tipi gazlı dedektörü bulunan doz ölçer ile ölçülmüştür (Şekil 1).



Şekil 1. X ışını için lineer zayıflatma katsayısı ölçüm sistemi

Kalınlıkları 0,5-1-2-3-4 cm olan beton örnekleri ve bunların çeşitli kalınlık kombinasyonları ile yapılan X-ışını ölçümleri sonucunda elde edilen değerler üzerinden yapılan analiz sonucunda aşağıdaki lineer zayıflatma katsayıları (linear attenuation coefficients) elde edilmiştir. Ölçümler her bir beton kalınlığı için birer

dakika aralıklarla alınmış ve her ölçüm ortalama gama sayımını bulmak için üç kere tekrarlanmıştır (*I ve* I_0). İlgili katsayılar 1 nolu denklem ile hesaplanmıştır.

$$I = I_0\, e^{-\mu x} \qquad (1)$$

I_0 : örnek yok iken X ışını şiddeti (sayım/saniye)
I : örneklerden geçen X ışını şiddeti (sayım/saniye)
x: örnek kalınlığı (cm)
μ: lineer zayıflatma katsayısı (cm^{-1})

Not: X-ışını sayımlarında arka fon (background) sayımı sıfır olarak kabul edilmiştir.

Genellikle radyoloji ve tedavi amaçlı kullanılan radyasyon kaynaklarının (örneğin 150 keV x-ışını) bulunduğu odaların duvarlarının kalınlıkları ve malzemeler şu şekilde tavsiye edilmektedir.

1. Eğer duvar delikli tuğladan imal edilmiş ise 2 mm kurşun levha ile kaplanması
2. Eğer dolu tuğla ile yapılmış ise 1 mm kurşun levha ile kaplanması
3. Duvar betondan yapılacak ise 2 mm kurşun eşdeğer kalınlığında ve yoğunluğu 2,3 g/cm^3 olan betondan yapılması şeklindedir.

3 nolu tavsiyede 2 mm kurşun eşdeğer kalınlık tanımı; radyasyonun şiddetinin yüzde birine (%1) düşüren beton kalınlığıdır. Bu amaçla her zırhlama malzemesine ait Yarı Değer Levha Kalınlığı (YDL) (Half Value Layer – HVL) ve Onda bir Değer Levha Kalınlığı (ODL) (Tenth Value Layer – TVL) hesaplamaları yapılır. Örnekte olduğu gibi 150 keV enerjili x-ışınının verdiği radyasyon şiddetinin yüzde bire düşmesi için gerekli kalınlık (2xTVL) 2 mm değerine eşittir. Bu hesap aşağıdaki şekilde yapılır.

Buna göre; X-ışını enerjisi 150 keV olduğuna göre 1 nolu ifadeden (2) nolu denklem türetilir. Buna göre kurşunun (Pb) 150 keV enerjili X- ışınına karşılık gelen lineer zayıflatma katsayısı değeri XCOM [1] dan 1,91 cm^2/gram olarak hesaplanır. Kurşunun yoğunluğu 11,35 gram/cm^3 olduğundan $\mu(150\ keV)_{Pb}$ = 21,679 cm^{-1}.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{100} = e^{-\mu x}$$

$$X(150keV) = \frac{ln(100)}{\mu(150keV)_{Pb}} \qquad (2)$$

X: 2xTVL eşdeğer kalınlık

(2) nolu denklemden bulunan kurşun eşdeğeri $X(150keV)_{Pb}$ = 0,21 cm=2,1 mm dir. Anlaşılacağı üzere 150 keV enerjisine sahip x-ışınının kurşun eşdeğeri 2.1 mm dir.

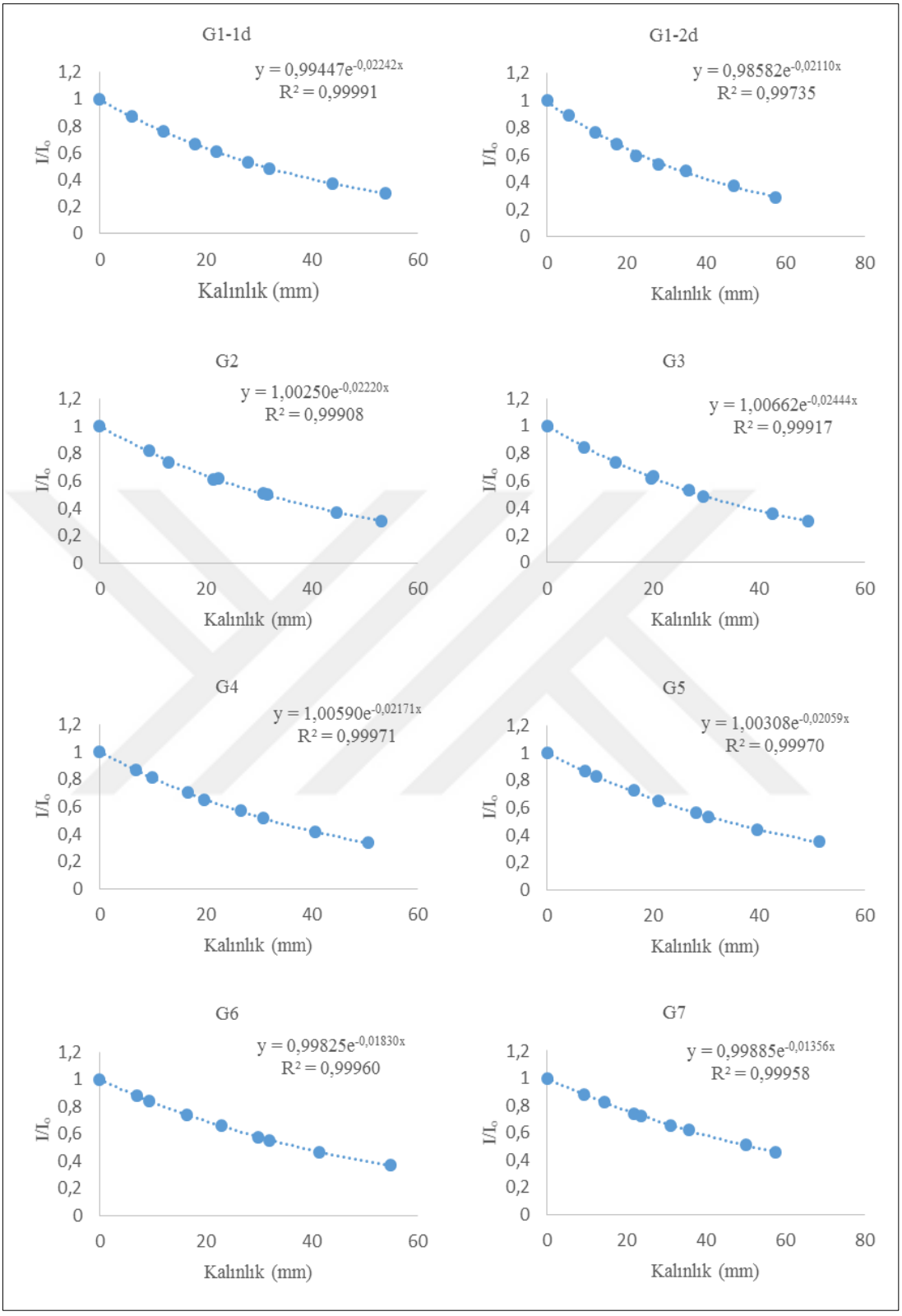
Tablo 1 de testleri istenilen beton örneklerin kod numaralarına göre X- ışınına (150 keV) karşı ölçülen lineer zayıflatma katsayıları (cm^{-1}) ve buna karşılık gelen kurşun eşdeğer kalınlıkları (cm) görülmektedir. Aynı zamanda Tablo 1 de XCOM ile her beton örneğin içinde bulunan kimyasal bileşiklerin oranlarından giderek teorik hesaplanan lineer zayıflatma katsayıları ve buna karşılık gelen kurşun eşdeğer kalınlıkları bulunmaktadır.

Duvar kaplama harç tipi	BHA	μ-katsayısı (Deneysel)	μ-katsayısı (Deneysel)	Dozu %1 e indirmek için gerekli 2TVL kalınlık	μ-katsayısı (XCOM)	μ-katsayısı (XCOM)	Fark (Deneysel-Teorik)
	(g/cm^3)	(cm^{-1})	(cm^2/g)	(cm)	(cm^{-1})	(cm^2/g)	(%)
G1-1d	3,11	1,4661	0,4714	3,1411	1,3864	0,4458	5,43
G1-2d	3,18	1,3487	0,4241	3,4145	1,4176	0,4458	5,11
G2	3,06	1,0946	0,3577	4,2072	0,6692	0,2187	38,86
G3	1,89	0,2444	0,1293	18,8428	0,2958	0,1565	21,02
G4	2,92	0,4963	0,1700	9,2790	0,4704	0,1611	5,22
G5	2,97	0,5196	0,1749	8,8629	0,4880	0,1643	6,09
G6	2,45	0,4335	0,1769	10,6232	0,4033	0,1646	6,97
G7	1,78	0,2199	0,1235	20,9421	0,2515	0,1413	14,38
G8	0,92	0,1741	0,1892	26,4513	0,1369	0,1488	21,37
G9	3,10	1,5473	0,4991	2,9763	1,3485	0,4350	12,85
G10	2,99	0,8475	0,2834	5,4338	0,6354	0,2125	25,03
G11	0,88	0,2062	0,2343	22,3378	0,1375	0,1563	33,28
G12-1d	2,89	0,4603	0,1593	10,0047	0,4638	0,1605	0,77
G12-2d	2,93	0,4804	0,1640	9,5861	0,4703	0,1605	2,11
G13	3,05	0,5477	0,1796	8,4082	0,5002	0,1640	8,67
G14	2,55	0,4384	0,1719	10,5045	0,4174	0,1637	4,78
G15-1d	3,20	1,2127	0,3790	3,7975	1,0810	0,3378	10,86
G15-2d	3,26	1,4794	0,4538	3,1129	1,1012	0,3378	25,56
G16	2,52	1,2691	0,5036	3,6287	0,8883	0,3525	30,01

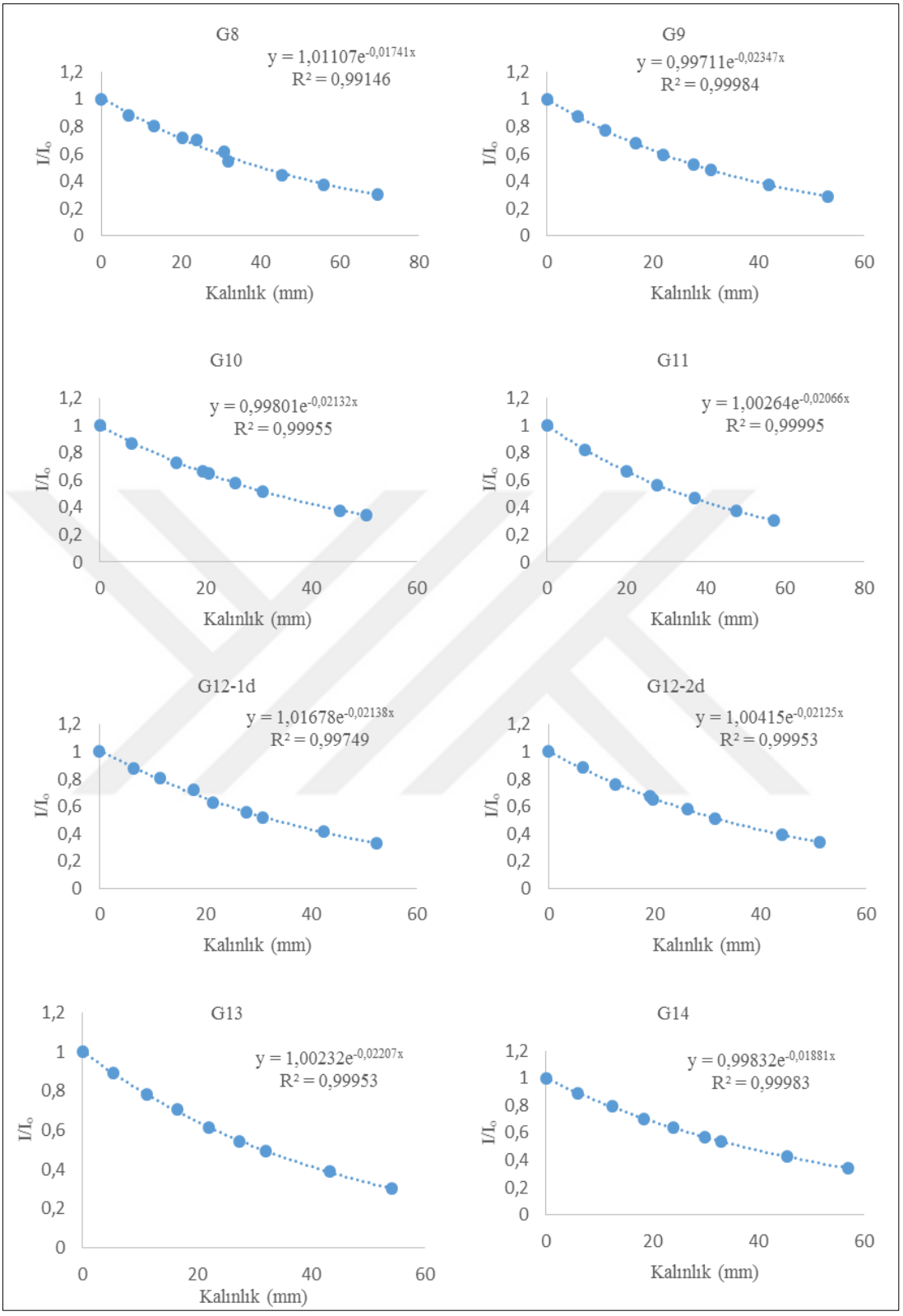
Tablo 1. X Işınları için zayıflatma katsayıları ve Kurşun Eşdeğerleri (2TVL)

Duvar kaplama harç tipi	BHA	μ-katsayısı (Deneysel)	μ-katsayısı (Deneysel)	Dozu %1 e indirmek için gerekli 2TVL kalınlık	μ-katsayısı (XCOM)	μ-katsayısı (XCOM)	Fark (Deneysel-Teorik)
	(g/cm^3)	(cm^{-1})	(cm^2/g)	(cm)	(cm^{-1})	(cm^2/g)	(%)
G17	3,00	1,1431	0,3810	4,0287	0,9372	0,3124	18,01
G18-1d	3,00	1,0389	0,3463	4,4327	0,8751	0,2917	15,77
G18-2d	3,11	1,1774	0,3786	3,9113	0,9675	0,3111	17,83
G19	2,89	1,1907	0,4120	3,8676	0,9471	0,3277	20,46
G20	3,13	1,4066	0,4494	3,2740	1,1374	0,3634	19,14
G21	2,79	1,3080	0,4688	3,5208	1,0529	0,3774	19,50
G22	3,05	1,3124	0,4303	3,5090	1,0635	0,3487	18,96
G23	2,94	1,2682	0,4314	3,6313	0,9776	0,3325	22,92
G24	3,06	1,3265	0,4335	3,4717	1,1053	0,3612	16,68
G25	2,70	1,1458	0,4244	4,0192	0,8205	0,3039	28,39
G26	2,66	0,5363	0,2016	8,5869	0,7033	0,2644	31,14
G27	2,77	0,8244	0,2976	5,5861	0,6703	0,2420	18,69
G28	2,73	0,7410	0,2714	6,2148	0,6287	0,2303	15,15
G29	2,86	1,2017	0,4202	3,8322	1,2152	0,4249	1,12
G30	2,67	1,0901	0,4083	4,2245	0,9228	0,3456	15,35
G31	2,84	1,1452	0,4032	4,0213	1,0091	0,3553	11,89
G32	2,79	1,3034	0,4672	3,5332	1,0083	0,3614	22,64
G33	0,95	0,1438	0,1514	32,0248	0,1414	0,1488	1,70

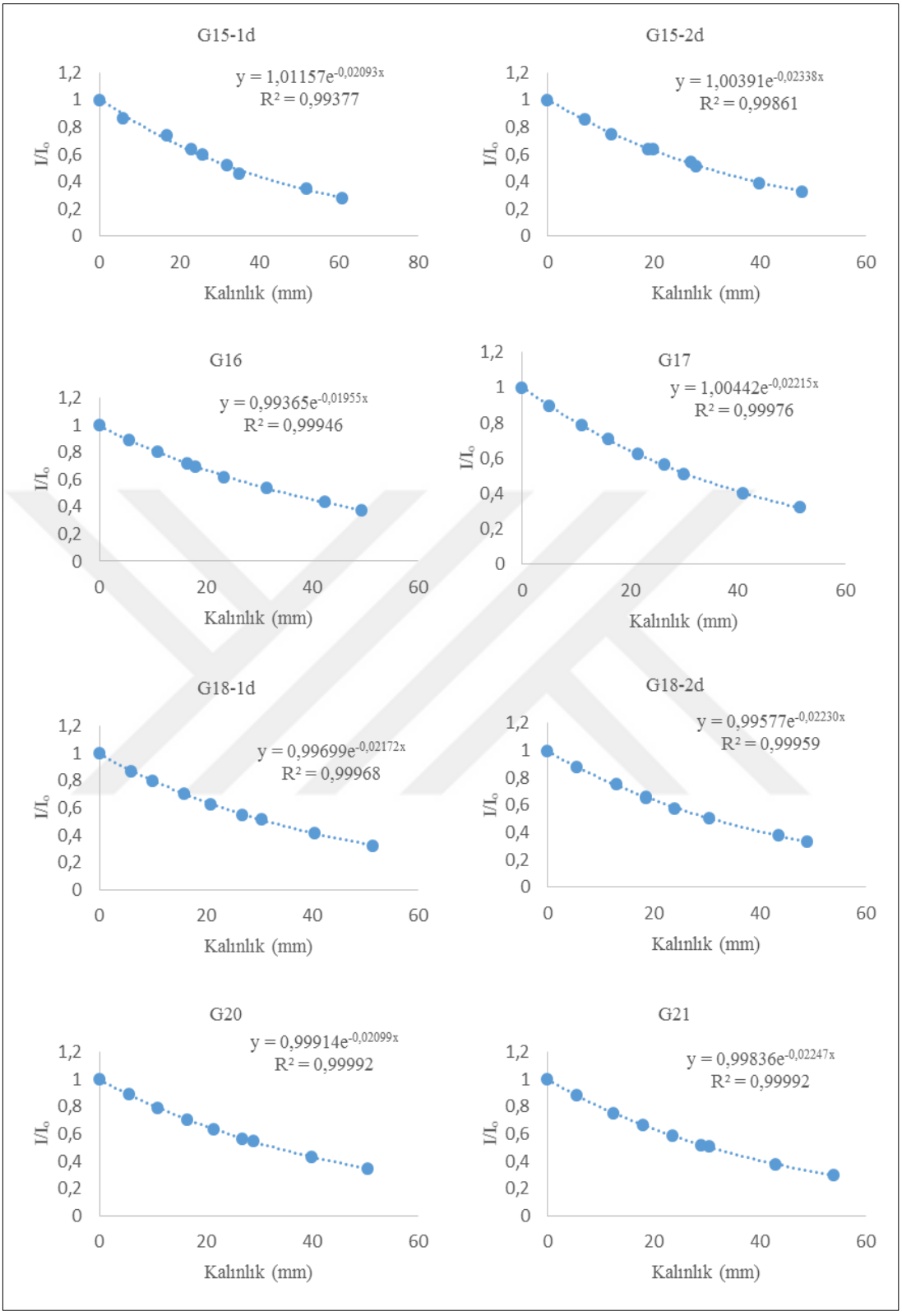
Tablo 1. (devam) X Işınları için zayıflatma katsayıları ve Kurşun Eşdeğerleri (2TVL)



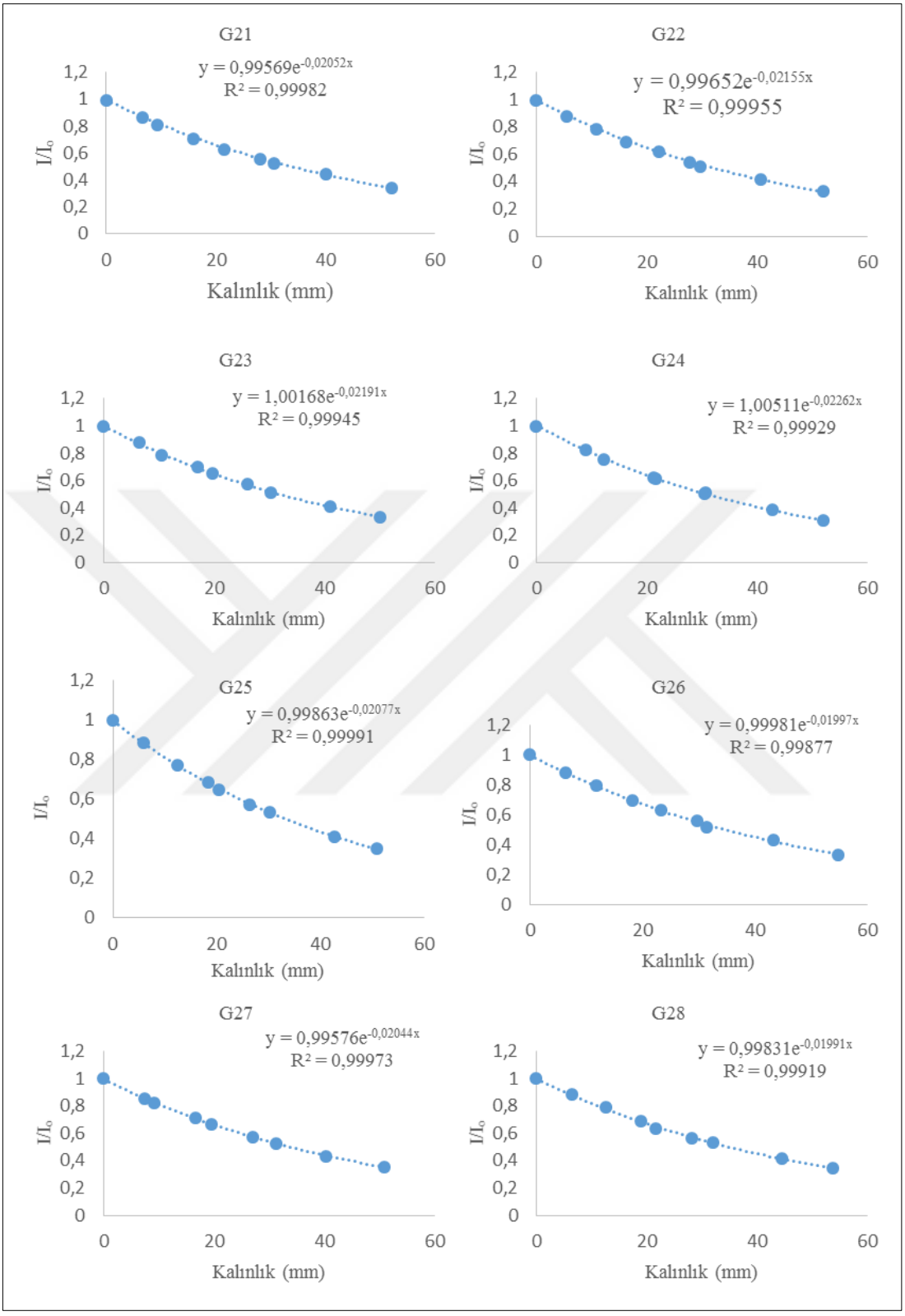
Şekil 2. G1-1d, G1-2d, G2, G3, G4, G5, G6 ve G7 duvar kaplama örneklerine ait I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi



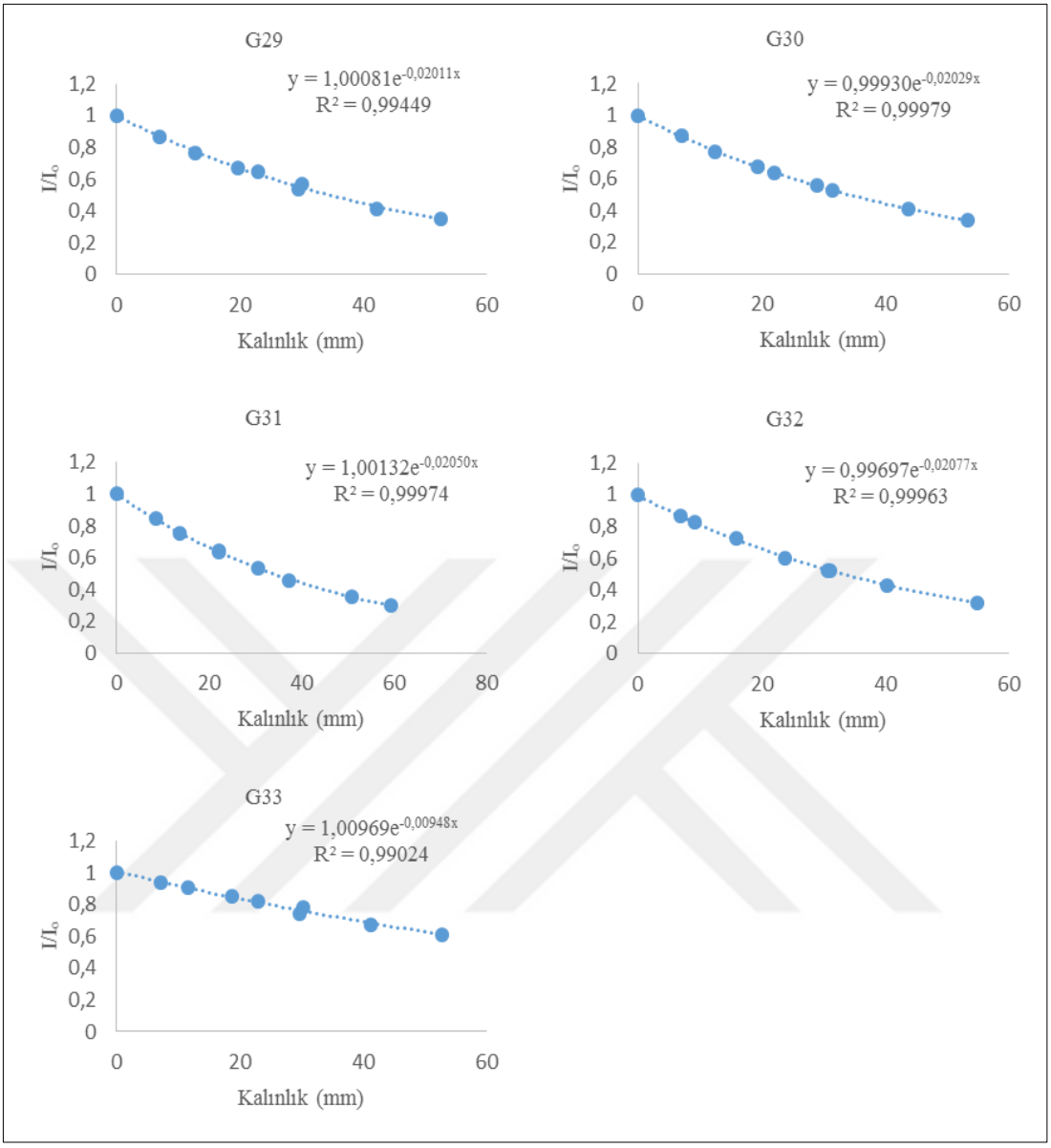
Şekil 3. G8, G9, G10, G11, G12-1d, G12-2d, G13 ve G14 duvar kaplama örneklerine ait I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi



Şekil 4. G15-1d, G15-2d, G16, G17, G18-1d, G18-2d, G19 ve G20 duvar kaplama örneklerine ait I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi



Şekil 5. G21, G22, G23, G24, G25, G26, G27 ve G28 duvar kaplama örneklerine ait I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi



Şekil 6. G29, G30, G31, G32 ve G33 duvar kaplama örneklerine ait I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi

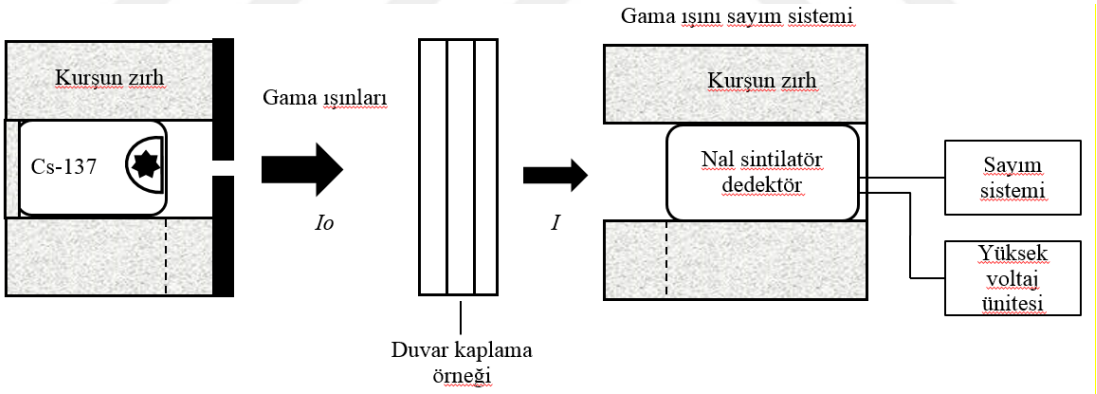
RAPOR

Lineer Zayıflatma Katsayıları

(Gama Işınları)

RAPOR NO:	1
ÖRNEK SAYISI:	37
RAPOR TARİHİ:	4.12.2020
ANALİZ TARİHİ:	9.11.2020
İSTEYEN KURUM	Bozok Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, ABD
İLGİLİ KİŞİ	Gülsüm SAĞLAM ÇİTOĞLU

Beton örneklerin gama ışını lineer zayıflatma katsayıları, Cs-137 radyoizotopunun yaydığı 662 keV enerjili gama ışınları ve NaI(Tl) sintilatör tipi detektör ile ölçülmüştür (Şekil 1).



Şekil 1. Gama ışını için lineer zayıflatma katsayısı ölçüm sistemi

Kalınlıkları 0,5-1-2-3-4 cm olan beton örnekleri ve bunların çeşitli kalınlık kombinasyonları ile yapılan X-ışını ölçümleri sonucunda elde edilen değerler üzerinden yapılan analiz sonucunda aşağıdaki lineer zayıflatma katsayıları (linear attenuation coefficients) elde edilmiştir. Ölçümler her bir beton kalınlığı için birer dakika aralıklarla alınmış ve her ölçüm ortalama gama sayımını bulmak için üç kere tekrarlanmıştır (*I ve* I_0). İlgili katsayılar 1 nolu denklem ile uyum işlemi yapılarak hesaplanmıştır.

$$I = I_0\, e^{-\mu x}$$

(1)

I_0 : örnek yok iken Gama ışını şiddeti (sayım/saniye)

I : örneklerden geçen Gama ışını şiddeti (sayım/saniye)

x: örnek kalınlığı (cm)

μ: lineer zayıflatma katsayısı (cm^{-1})

Not: Gama ışını sayımlarında arka fon (background) sayımı sıfır olarak kabul edilmiştir

Genellikle radyoloji ve tedavi amaçlı kullanılan radyasyon kaynaklarının (örneğin 150 keV x-ışını) bulunduğu odaların duvarlarının kalınlıkları ve malzemeler şu şekilde tavsiye edilmektedir.

1. Eğer duvar delikli tuğladan imal edilmiş ise 2 mm kurşun levha ile kaplanması
2. Eğer dolu tuğla ile yapılmış ise 1 mm kurşun levha ile kaplanması
3. Duvar betondan yapılacak ise 2 mm kurşun eşdeğer kalınlığında ve yoğunluğu 2,3 g/cm^3 olan betondan yapılması şeklindedir.

3 nolu tavsiyede 2 mm kurşun eşdeğer kalınlık tanımı; radyasyonun şiddetinin yüzde birine (%1) düşüren beton kalınlığıdır. Bu amaçla her zırhlama malzemesine ait Yarı Değer Levha Kalınlığı (YDL) (Half Value Layer – HVL) ve Onda bir Değer Levha Kalınlığı (ODL) (Tenth Value Layer – TVL) hesaplamaları yapılır. Örnekte olduğu gibi 150 keV enerjili x-ışınının verdiği radyasyon şiddetinin yüzde bire düşmesi için gerekli kalınlık (2xTVL) 2 mm değerine eşittir. Bu hesap aşağıdaki şekilde yapılır.

Buna göre; gama ışını enerjisi 662 keV olduğuna göre 1 nolu bağıntıdan (2) nolu denklem türetilir. Buna göre kurşunun (Pb) 662 keV enerjili gama ışınına karşılık gelen lineer zayıflatma katsayısı değeri XCOM [1] dan 0,104 cm^2/gram hesaplanır. Kurşunun yoğunluğu 11,35 $gram/cm^3$ alındığında $\mu(662\ keV)_{Pb} = 1{,}175\ cm^{-1}$.

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{100} = e^{-\mu x}$$

$$X(150keV) = \frac{ln(100)}{\mu(150keV)_{Pb}} \quad (2)$$

X: 2xTVL eşdeğer kalınlık

(2) nolu denklemden bulunan kurşun eşdeğeri $X(662\text{keV})_{Pb}$ = 3,92 cm dir. Anlaşılacağı üzere 150 keV enerjisine sahip x-ışınının kurşun eşdeğeri 2 mm iken, 662 keV gama ışınının kurşun eşdeğeri 3,92 cm dir.

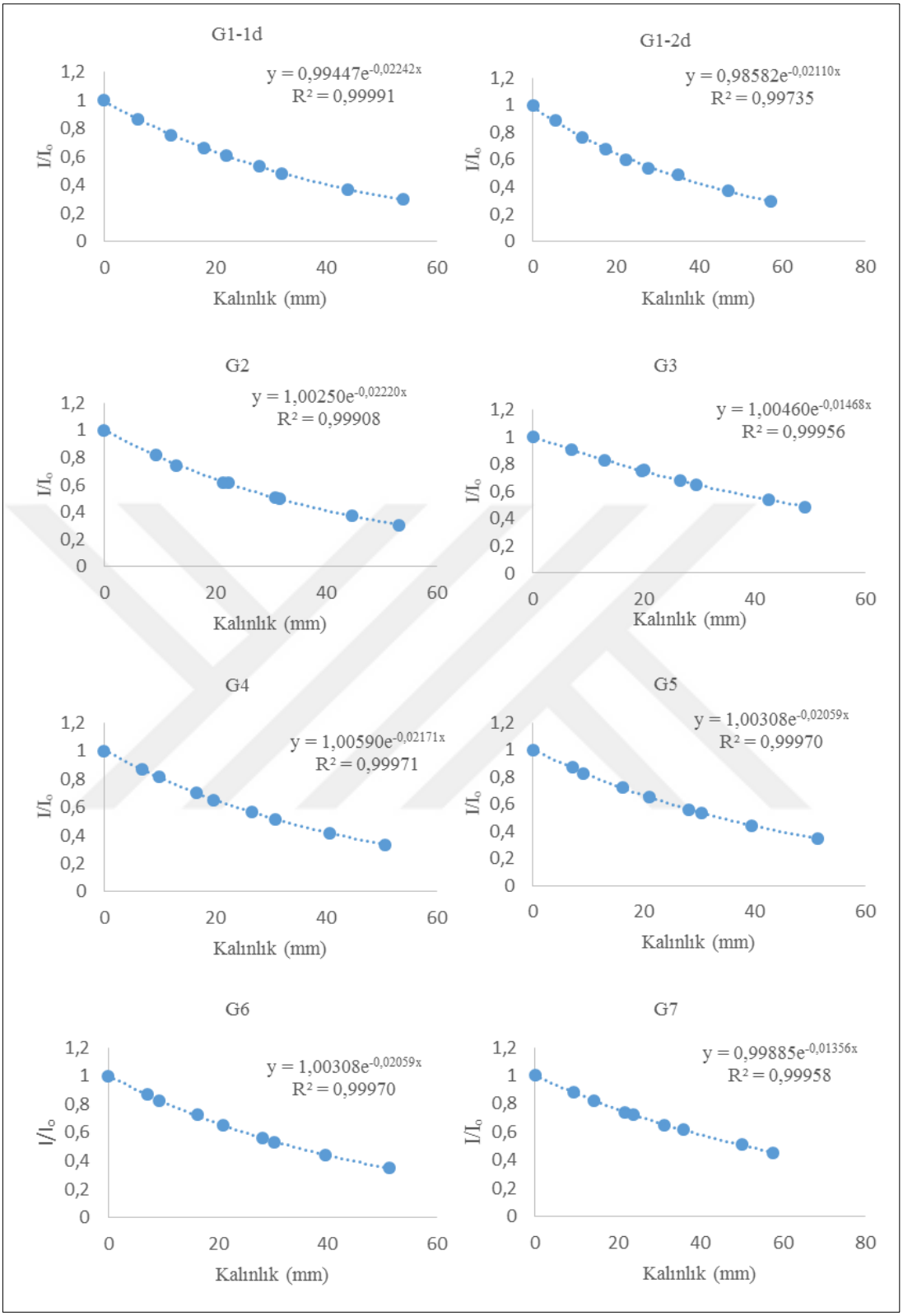
Tablo 1 de testleri istenilen beton örneklerin kod numaralarına göre gama ışınına (662 keV) karşı ölçülen deneysel ve hesaplanan XCOM lineer zayıflatma katsayıları (cm^{-1}) ve buna karşılık kurşun eşdeğer kalınlıkları (cm) görülmektedir. Aynı zamanda Tablo 1 de XCOM ile her beton örnek içinde bulunan kimyasal bileşiklerin oranlarından giderek teorik hesaplanan lineer zayıflatma katsayıları ve buna karşılık gelen kurşun eşdeğer kalınlıkları bulunmaktadır.

Duvar kaplama harç tipi	BHA	μ-katsayısı (Deneysel)	μ-katsayısı (Deneysel)	Dozu %1 e indirmek için gerekli 2TVL kalınlık	μ-katsayısı (XCOM)	μ-katsayısı (XCOM)	Fark (Deneysel-Teorik)
	(g/cm^3)	(cm^{-1})	(cm^2/g)	(cm)	(cm^{-1})	(cm^2/g)	(%)
G1-1d	3,11	0,2242	0,0721	20,5400	0,2373	0,07629	5,83
G1-2d	3,18	0,2110	0,0664	21,8250	0,2426	0,07629	14,98
G2	3,06	0,2220	0,0725	20,7440	0,2324	0,07596	4,70
G3	1,89	0,1468	0,0777	31,3700	0,1469	0,07773	0,07
G4	2,92	0,2171	0,0743	21,2120	0,2230	0,07637	2,72
G5	2,97	0,2059	0,0693	22,3660	0,2261	0,07614	9,83
G6	2,45	0,1830	0,0747	25,1650	0,1866	0,07615	1,95
G7	1,78	0,1356	0,0762	33,9610	0,1364	0,07661	0,56
G8	0,92	0,1159	0,1260	39,7340	0,0712	0,07735	38,60
G9	3,10	0,2347	0,0757	19,6220	0,2420	0,07806	3,10
G10	2,99	0,2132	0,0713	21,6000	0,2273	0,07603	6,63
G11	0,88	0,1320	0,1500	34,8880	0,0685	0,07779	48,14
G12-1d	2,89	0,2138	0,0740	21,5400	0,2208	0,07641	3,29
G12-2d	2,93	0,2125	0,0725	21,6710	0,2239	0,07641	5,36
G13	3,05	0,2207	0,0724	20,8660	0,2324	0,07619	5,29
G14	2,55	0,1881	0,0738	24,4830	0,1943	0,07620	3,30
G15-1d	3,20	0,2093	0,0654	22,0030	0,2467	0,07710	17,88
G15-2d	3,26	0,2338	0,0717	19,6970	0,2542	0,07798	8,73
G16	2,52	0,1955	0,0776	23,5560	0,1947	0,07728	0,39

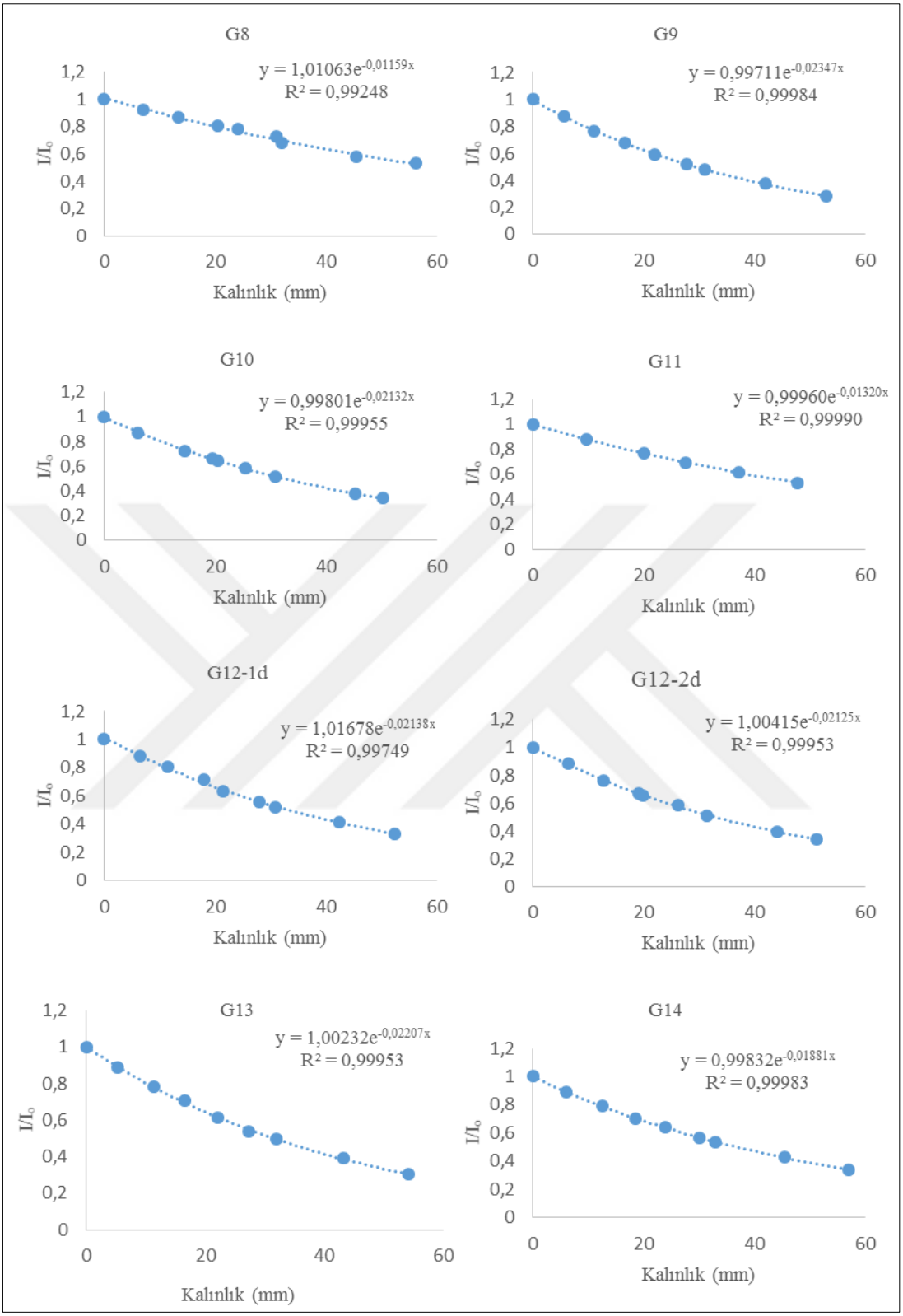
Tablo 1. Gama Işınları için zayıflatma katsayıları ve Kurşun Eşdeğerleri (2TVL)

Duvar kaplama harç tipi	BHA	μ-katsayısı (Deneysel)	μ-katsayısı (Deneysel)	Dozu %1 e indirmek için gerekli 2TVL kalınlık	μ-katsayısı (XCOM)	μ-katsayısı (XCOM)	Fark (Deneysel-Teorik)
	(g/cm^3)	(cm^{-1})	(cm^2/g)	(cm)	(cm^{-1})	(cm^2/g)	(%)
G17	3,00	0,2215	0,0738	20,7910	0,2318	0,07725	4,63
G18-1d	3,00	0,2172	0,0724	21,2020	2,3148	0,77160	965,75
G18-2d	3,11	0,2230	0,0717	20,6510	2,3630	0,75980	959,63
G19	2,89	0,2099	0,0726	21,9400	0,2233	0,07728	6,40
G20	3,13	0,2247	0,0718	20,4950	0,2423	0,07741	7,83
G21	2,79	0,2052	0,0735	22,4420	0,2176	0,07798	6,03
G22	3,05	0,2155	0,0707	21,3700	0,2365	0,07754	9,74
G23	2,94	0,2191	0,0745	21,0190	0,2240	0,07618	2,22
G24	3,06	0,2262	0,0739	20,3590	0,2373	0,07756	4,92
G25	2,70	0,2077	0,0769	22,1720	0,2085	0,07724	0,41
G26	2,66	0,1997	0,0751	23,0600	0,2048	0,07700	2,56
G27	2,77	0,2044	0,0738	22,5300	0,2102	0,07588	2,83
G28	2,73	0,1991	0,0729	23,1300	0,2094	0,07671	5,18
G29	2,86	0,2011	0,0703	22,9000	0,2225	0,07778	10,62
G30	2,67	0,2029	0,0760	22,6970	2,0725	0,77620	921,42
G31	2,84	0,2050	0,0722	22,4640	0,2199	0,07744	7,28
G32	2,79	0,2077	0,0744	22,1720	0,2168	0,07769	4,36
G33	0,95	0,0948	0,0998	48,5780	0,0735	0,07735	22,49

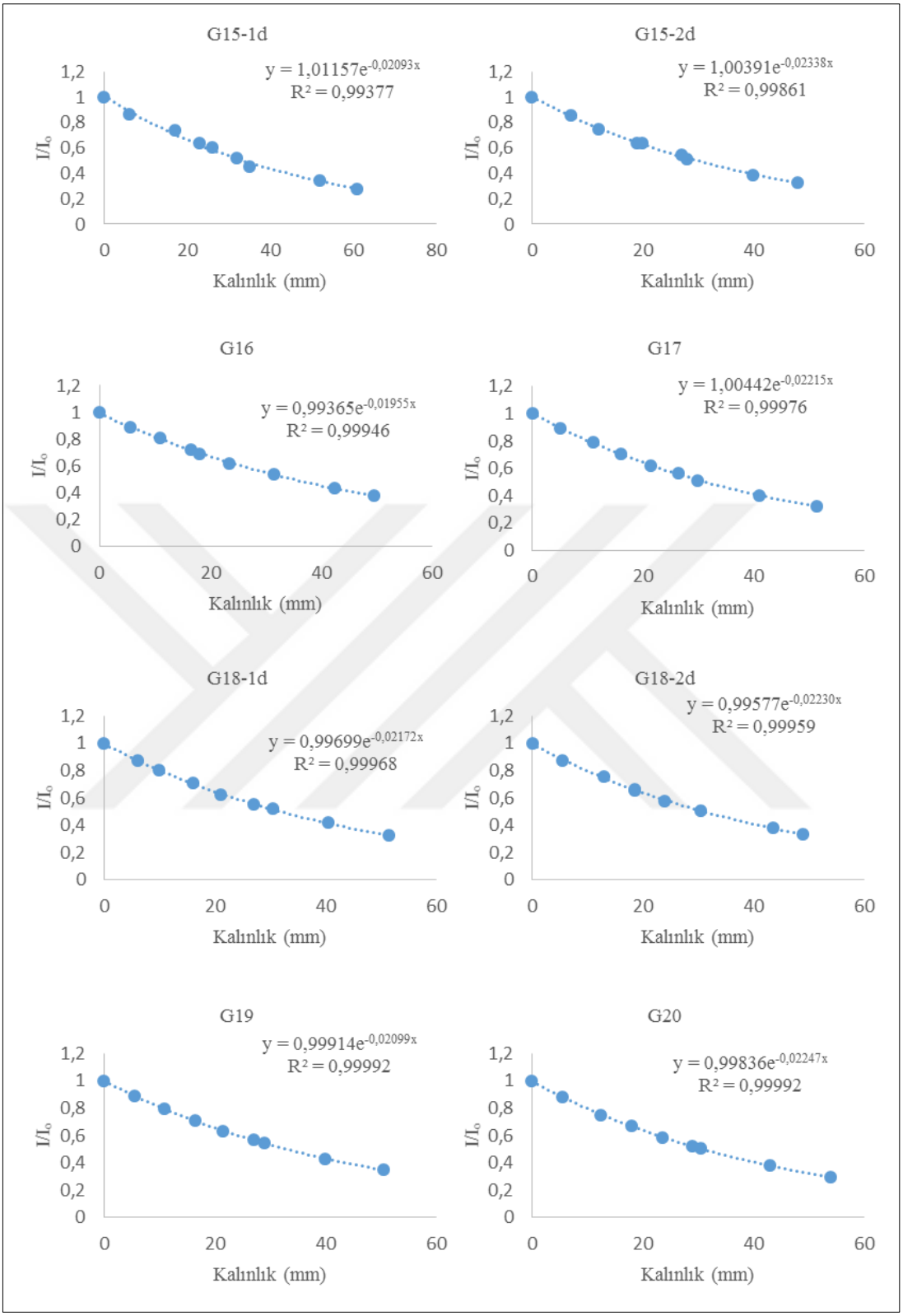
Tablo 1. (devam) Gama Işınları için zayıflatma katsayıları ve Kurşun Eşdeğerleri (2TVL)



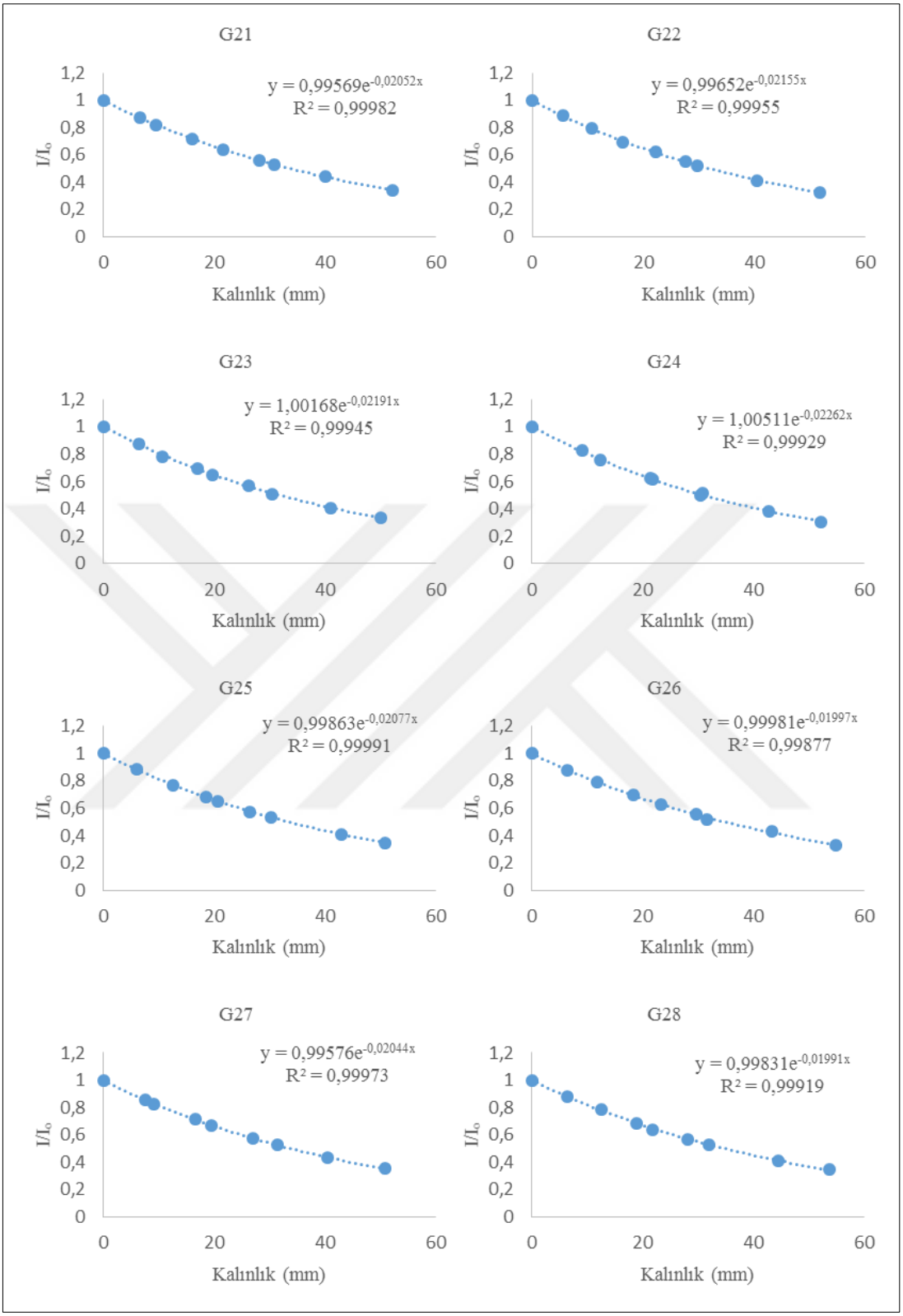
Şekil 2. G1-1d, G1-2d, G2, G3, G4, G5, G6 ve G7 duvar kaplama örneklerine ait I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi



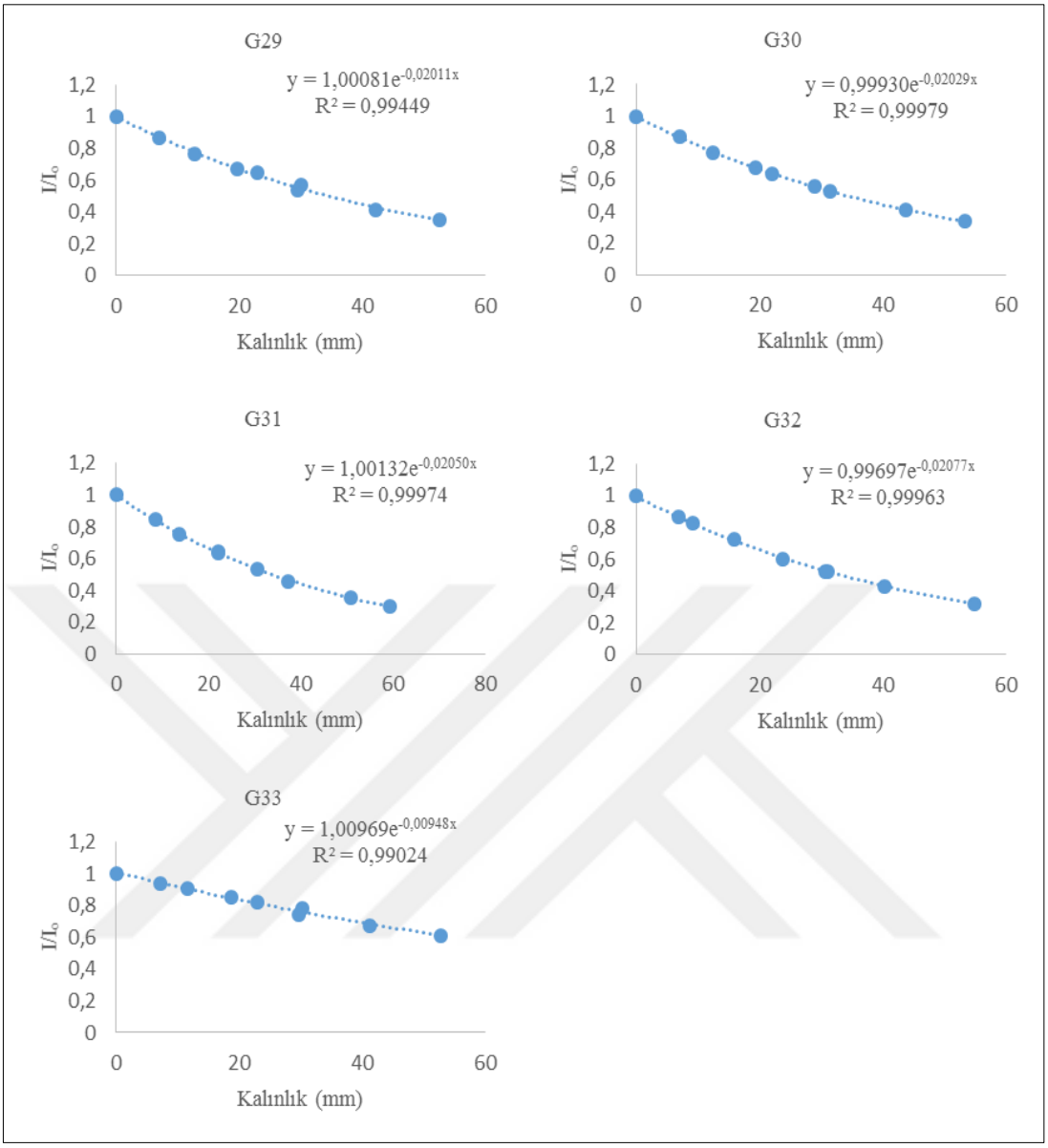
Şekil 3. G8, G9, G10, G11, G12-1d, G12-2d, G13 ve G14 duvar kaplama örneklerine ait I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi



Şekil 4. G15-1d, G15-2d, G16, G17, G18-1d, G18-2d, G19 ve G20 duvar kaplama örneklerine ait I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi



Şekil 5. G21, G22, G23, G24, G25, G26, G27 ve G28 duvar kaplama örneklerine ait I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi



Şekil 6. G29, G30, G31, G32 ve G33 duvar kaplama örneklerine ait I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi

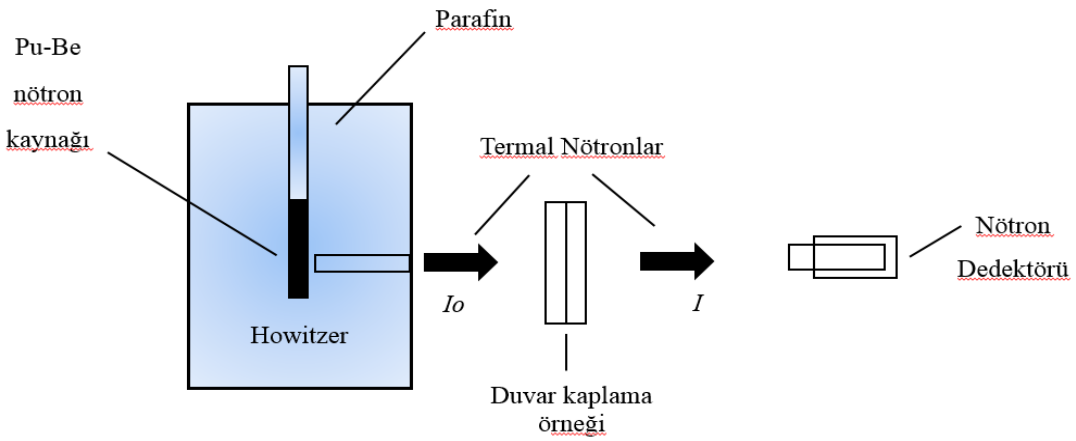
RAPOR

Lineer Zayıflatma Katsayıları

(Nötronlar)

RAPOR NO:	3
ÖRNEK SAYISI:	37
RAPOR TARİHİ:	14.12.2020
ANALİZ TARİHİ:	16.11.2020
İSTEYEN KURUM	Bozok Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği, ABD
İLGİLİ KİŞİ	Gülsüm SAĞLAM ÇİTOĞLU

Beton örneklerin termal nötron lineer lineer zayıflatma katsayılarını ölçmek için Howitzer (Nuclear Chicago NH-3) içinde bulunan Pu-Be nötron kaynağı ($1.85x10^{11}$ Bq) kullanılmıştır. Örnekten geçen 0,025eV kinetik enerjili nötronlar He-3 nötron detektörü ile ölçülmüştür. (Şekil 1)



Şekil 1. Nötron için lineer zayıflatma katsayısı ölçüm sistemi

He-3 nötron detektörünün sayım yapan penceresi nötron kaynağı (Pu-Be) ortada olan Howitzer' in nötron çıkış kanalını (I_0) doğrudan görmektedir. 0,5-1-2-3-4 cm kalınlıklarla ve bunların çeşitli kombinasyonları ile yapılan sayımlar (I) sonucunda elde edilen

değerler üzerinden yapılan hesaplamalar sonucunda beton örnekler için aşağıdaki Tablo 1 de bulunan nötron lineer zayıflatma katsayıları (μ) bulunmuştur.

Ölçümler her bir kalınlık için birer dakika aralıklarla alınmış ve her ölçüm ortalama nötron şiddetini bulmak için 3 kere tekrarlanmıştır (hem I ve hem de I_0) ve ortalamaları alınmıştır. Bu katsayılar Denklem 1 ile uyum işlemi yapılarak hesaplanmıştır.

$$I = (1 + b\mu x).I_0\, e^{-\mu x} \quad (1)$$

I_0 : örnek yok iken nötronun şiddeti (sayım/saniye)
I : örneklerden geçen nötronun şiddeti (sayım/saniye)
x: örnek kalınlığı (cm)
μ: lineer zayıflatma katsayısı (cm^{-1})
b: yığılma faktörü (nötronlar için)
Not: Nötron sayımlarında arka fon (background) sayımı sıfır olarak kabul edilmiştir.

Genellikle radyoloji ve tedavi amaçlı kullanılan radyasyon kaynaklarının (örneğin 150 keV x-ışını) bulunduğu odaların duvarlarının kalınlıkları ve malzemeler şu şekilde tavsiye edilmektedir.

1. Eğer duvar delikli tuğladan imal edilmiş ise 2 mm kurşun levha ile kaplanması
2. Eğer dolu tuğla ile yapılmış ise 1 mm kurşun levha ile kaplanması
3. Duvar betondan yapılacak ise 2 mm kurşun eşdeğer kalınlığında ve yoğunluğu 2,3 g/cm^3 olan betondan yapılması şeklindedir.

3 nolu tavsiyede 2 mm kurşun eşdeğer kalınlık tanımı; radyasyonun şiddetinin yüzde birine (%1) düşüren beton kalınlığıdır. Bu amaçla her zırhlama malzemesine ait Yarı Değer Levha Kalınlığı (YDL) (Half Value Layer – HVL) ve Onda bir Değer Levha Kalınlığı (ODL) (Tenth Value Layer – TVL) hesaplamaları yapılır. Örnekte olduğu gibi 150 keV enerjili x-ışınının verdiği radyasyon şiddetinin yüzde bire düşmesi için gerekli kalınlık (2xTVL) 2 mm değerine eşittir.

Nötronlar partikül radyasyon sınıfında olup yukarıda değerlendirilen x veya gama ışınlarından (elektromanyetik radyasyon) farklıdır. Nötronlar elektrik yükü sıfır (nötr)

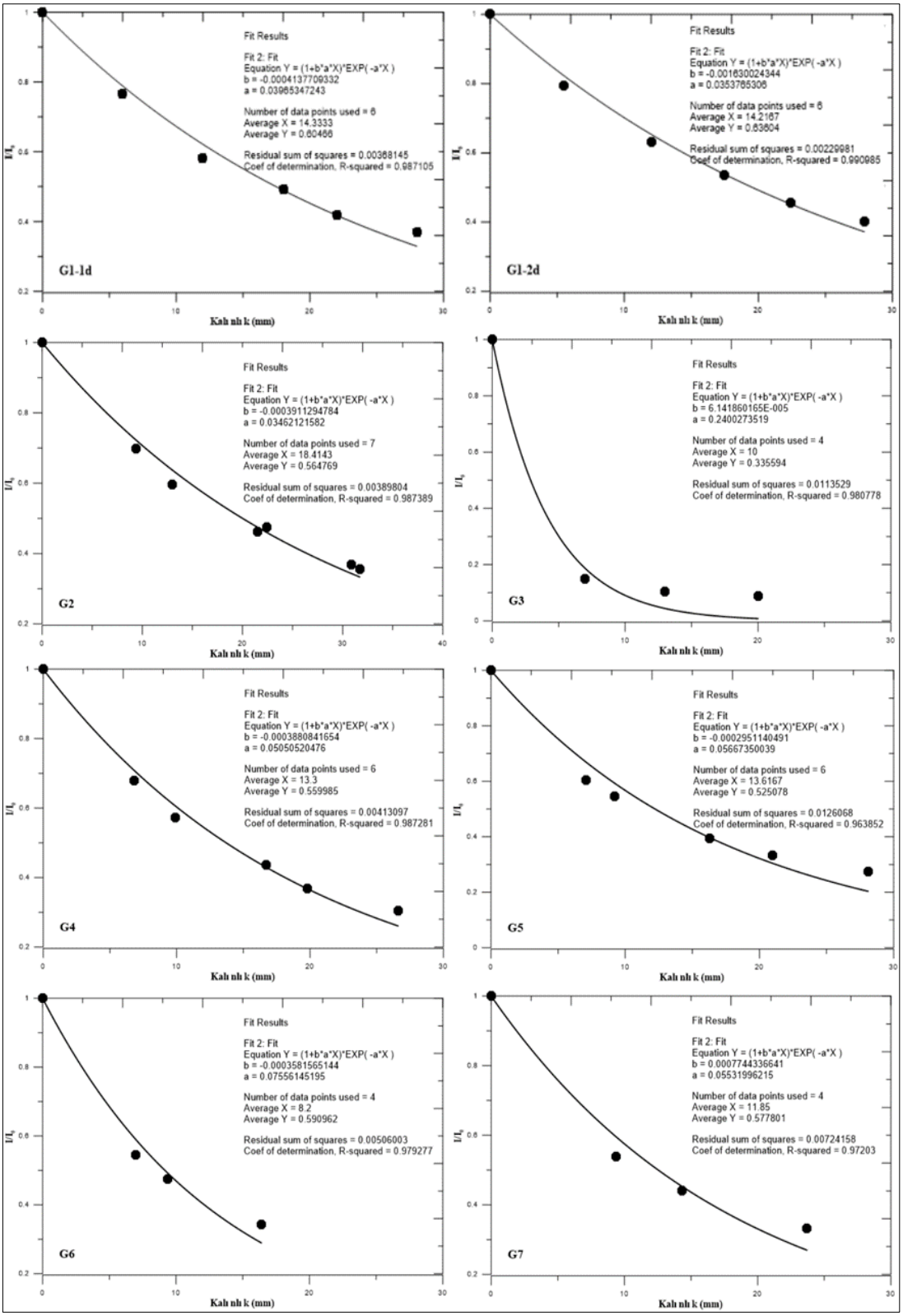
olan bir parçacıktır. Soğurucu malzeme içinde oldukça girici özelliğe sahiptir. Bu nedenle nötronların şiddetini zayıflatmak için kullanılan betonların kalınlıkları diğer radyasyon türlerine (x ve gama ışınları) göre daha fazladır. Bu nedenle kurşun eşdeğeri kalınlığı yerine 2TVL ve 5TVL değerleri hesaplanmıştır. (Tablo 1)

Duvar kaplama harç tipi	BHA	Lineer zayıflatma katsayısı (Deneysel)	Kütle zayıflatma katsayısı (Deneysel)	Dozu %1 e indirmek için gerekli 2TVL kalınlık	Dozu 10^{-5} e indirmek için gerekli 5TVL kalınlık
	(g/cm^3)	(cm^{-1})	(cm^2/g)	(cm)	(cm)
G1-1d	3,11	0,3965	0,1275	11,6146	29,0364
G1-2d	3,18	0,3538	0,1113	13,0163	32,5408
G2	3,06	0,3462	0,1131	13,3021	33,2551
G3	1,89	2,4003	1,2700	1,9186	4,7965
G4	2,92	0,5051	0,1730	9,1173	22,7934
G5	2,97	0,5667	0,1908	8,1263	20,3157
G6	2,45	0,7556	0,3084	6,0947	15,2368
G7	1,78	0,5532	0,3108	8,3246	20,8115
G8	0,92	0,6779	0,7368	6,7933	16,9832
G9	3,10	0,4117	0,1328	11,1857	27,9644
G10	2,99	0,3972	0,1328	11,5941	28,9852
G11	0,88	2,0205	2,2960	2,2792	5,6981
G12-1d	2,89	0,4408	0,1525	10,4473	26,1183
G12-2d	2,93	0,4985	0,1701	9,2381	23,0951
G13	3,05	0,5567	0,1825	8,2723	20,6807
G14	2,55	0,6992	0,2742	6,5863	16,4659
G15-1d	3,20	0,3157	0,0987	14,5872	36,4679
G15-2d	3,26	0,3662	0,1123	12,5756	31,4389
G16	2,52	1,9888	0,7892	2,3156	5,7889
G17	3,00	0,4051	0,1350	11,3680	28,4200
G18-1d	3,00	0,5071	0,1690	9,0814	22,7035
G18-2d	3,11	0,4824	0,1551	9,5464	23,8659
G19	2,89	0,5489	0,1899	8,3898	20,9745

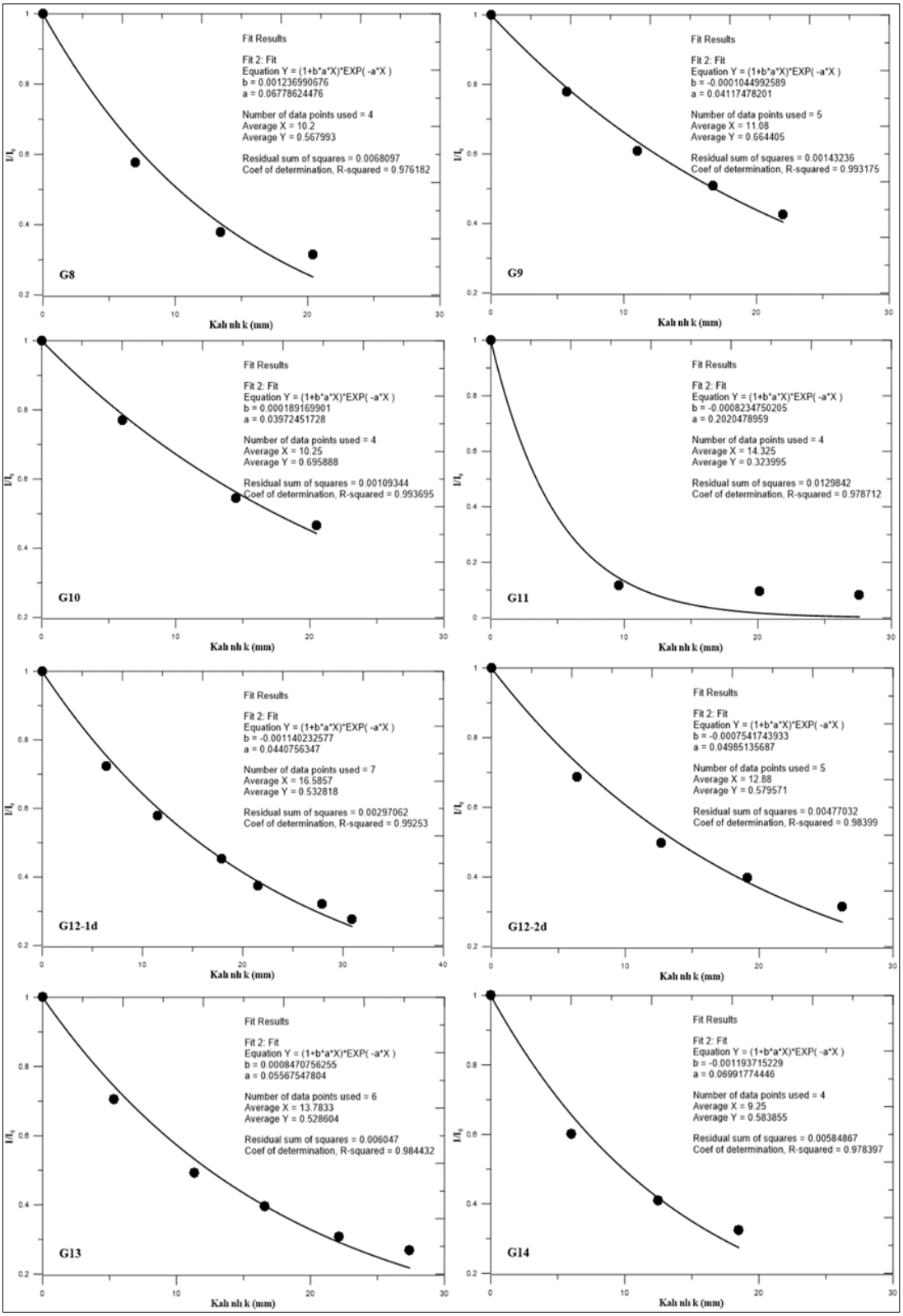
Tablo 1. Termal nötronlar için zayıflatma katsayıları

Duvar kaplama harç tipi	BHA	Lineer zayıflatma katsayısı (Deneysel)	Kütle zayıflatma katsayısı (Deneysel)	Dozu %1 e indirmek için gerekli 2TVL kalınlık	Dozu 10^{-5} e indirmek için gerekli 5TVL kalınlık
	(g/cm^3)	(cm^{-1})	(cm^2/g)	(cm)	(cm)
G20	3,13	0,3791	0,1211	12,1476	30,3691
G21	2,79	1,5077	0,5404	3,0544	7,6361
G22	3,05	0,3812	0,1250	12,0807	30,2018
G23	2,94	0,4445	0,1512	10,3603	25,9008
G24	3,06	0,4598	0,1503	10,0156	25,0390
G25	2,70	1,5090	0,5589	3,0518	7,6295
G26	2,66	1,3611	0,5117	3,3834	8,4585
G27	2,77	1,1878	0,4288	3,8771	9,6926
G28	2,73	1,0721	0,3927	4,2955	10,7387
G29	2,86	0,9676	0,3383	4,7594	11,8984
G30	2,67	1,4108	0,5284	3,2642	8,1606
G31	2,84	0,7981	0,2810	5,7702	14,4254
G32	2,79	1,2859	0,4609	3,5813	8,9532
G33	0,95	0,6857	0,7218	6,7160	16,7900

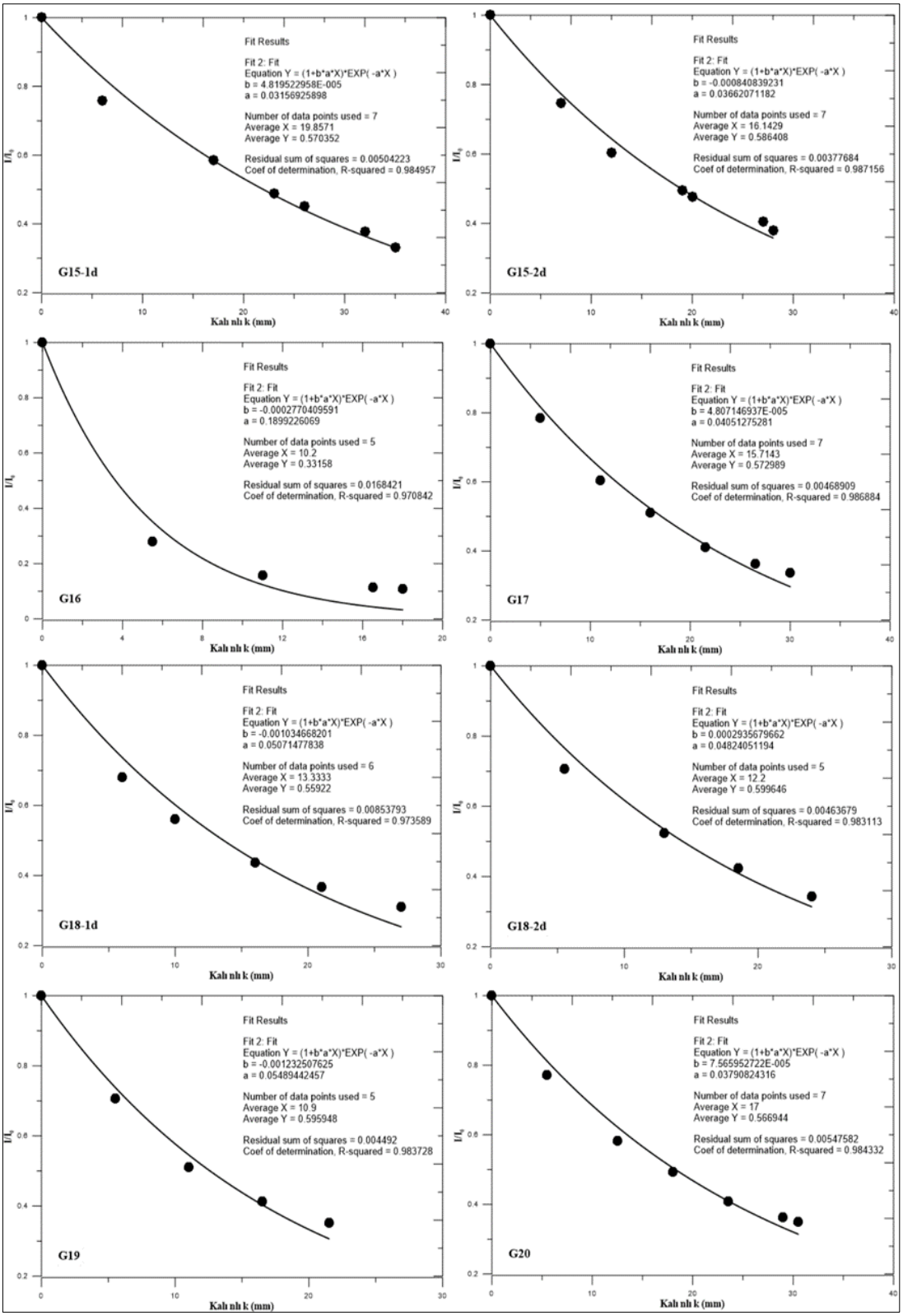
Tablo 1. (devam) Termal nötronlar için zayıflatma katsayıları



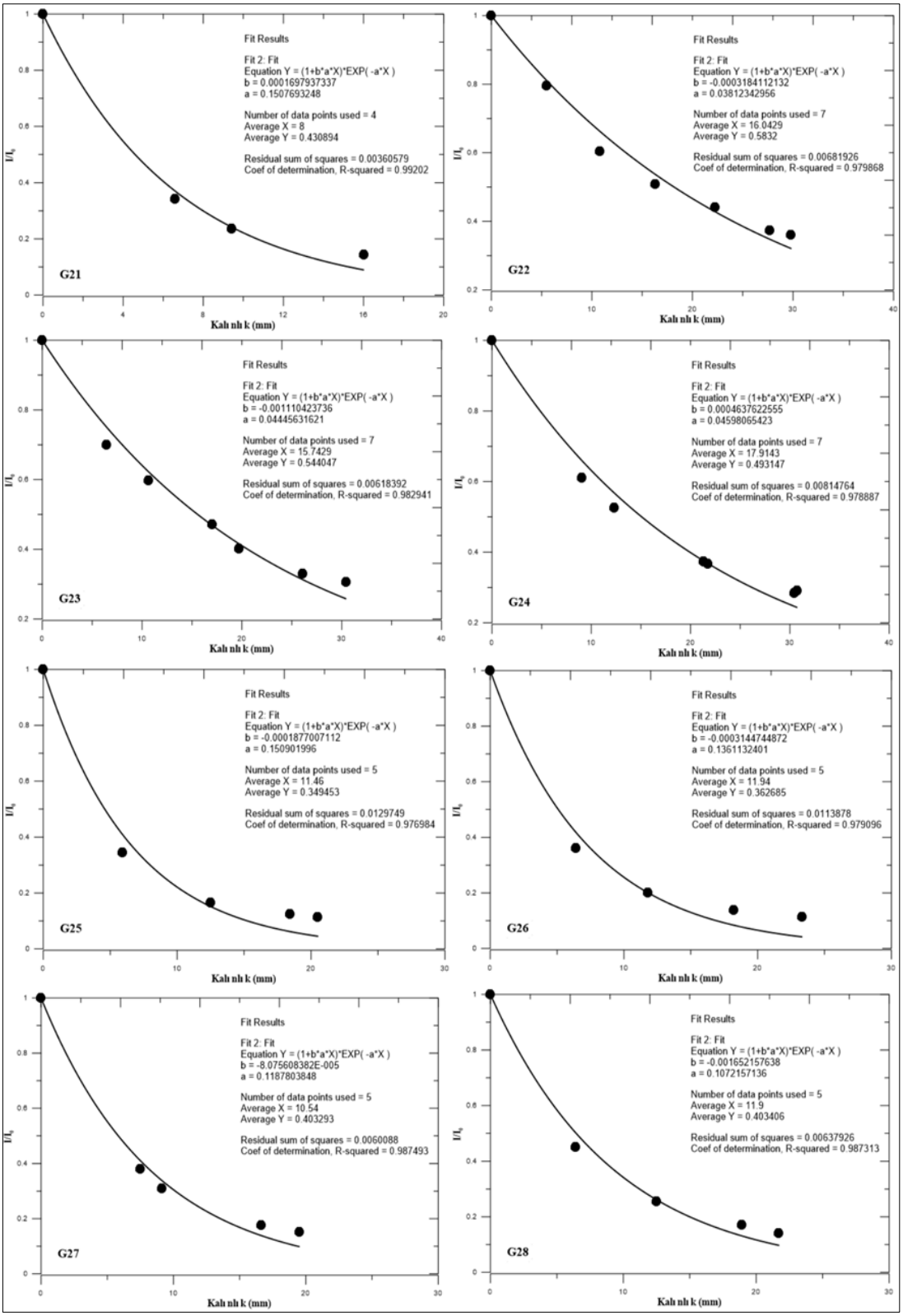
Şekil 2. G1-1d, G1-2d, G3, G4, G5, G6 ve G7 duvar kaplama örneklerine ait I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi



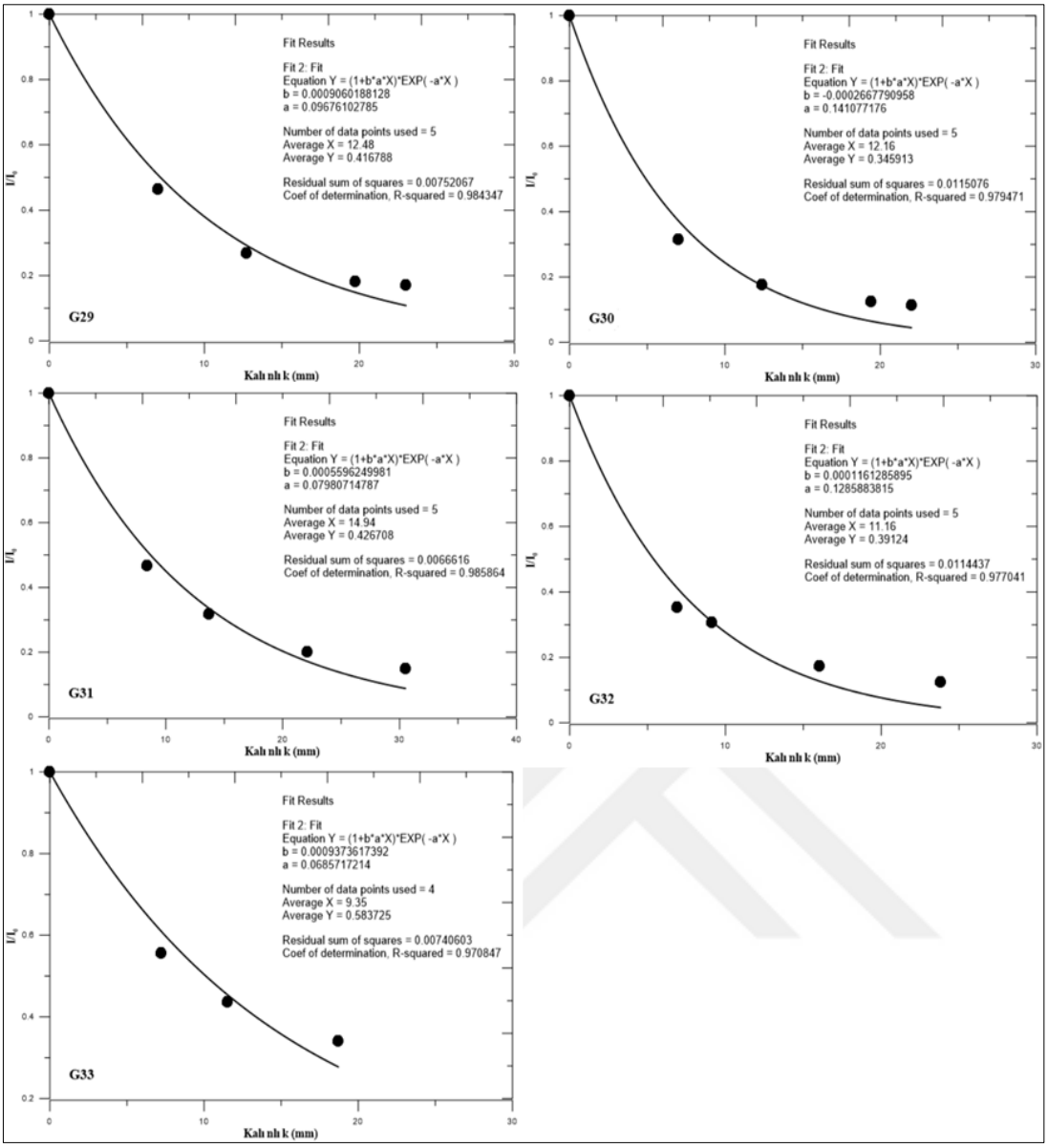
Şekil 3. G8, G9, G10, G11, G12-1d, G12-2d, G13 ve G14 duvar kaplama örneklerine ait I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi



Şekil 4. G15-1d, G15-2d, G16, G17, G18-1d, G18-2d, G19 ve G20 duvar kaplama örneklerine ait I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi



Şekil 5. G21, G22, G23, G24, G25, G26, G27 ve G28 duvar kaplama örneklerine ait I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi



Şekil 6. G29, G30, G31, G32 ve G33 duvar kaplama örneklerine ait I/I_0 oranının kalınlık ile değişimi