



**BİLECİK
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**MERMER ATIKLARININ YOL TEMEL MALZEMESİ
OLARAK FARKLI BOYUT ARALIKLARINDA İKAME
EDİLMESİ**

**Ahmet Neim KAHVECİ
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Nazile URAL**

**BİLECİK, 2020
Referans No: 10336732**



BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ

**BİLECİK
ŞEYH EDEBALI ÜNİVERSİTESİ**

**Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**MERMER ATIKLARININ YOL TEMEL MALZEMESİ
OLARAK FARKLI BOYUT ARALIKLARINDA İKAME
EDİLMESİ**

**Ahmet Neim KAHVECİ
Yüksek Lisans Tezi**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Nazile URAL**

BİLECİK, 2020



BİLECİK ŞEYH EDEBALI
ÜNİVERSİTESİ

BİLECİK

SEYH EDEBALI UNIVERSITY

**Graduate School of Sciences
Department of Civil Engineering**

**SUBSTITUTION OF MARBLE WASTES IN DIFFERENT SIZE
RANGES AS ROAD BASE MATERIAL**

**Ahmet Neim KAHVECİ
Master's Thesis**

**Thesis Advisor
Assoc. Prof. Dr. Nazile URAL**

BİLECİK, 2020

TEŞEKKÜR

Tez çalıőmam sırasında kıymetli bilgi, birikim ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan değerli danıőman hocam sayın Doç.Dr. Nazile URAL'a sonsuz teőekkürlerimi sunarım. Bu süreçte ve daha önceki eğitim hayatım boyunca desteğini hiçbir zaman üzerimden esirgemeyen, meslek hayatımın her aşamasında kendisini örnek alabileceğim abim Prof. Dr. Kamil KAHVECİ'ye teőekkürlerimi sunarım.

Hayatımın her aşamasında yardımını hiç esirgemeyen sevgili eőim Dr. Öğr. Üyesi Hilal KAHVECİ'ye teőekkürü bir borç bilirim. Enerjileriyle gücüme güç katan kızım Neva'ya ve oğlum İbrahim Arda'ya sevgilerimi sunuyorum.

Çalıőmalarım boyunca maddi ve manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme ve özellikle elbet bir gün buluőacaęımıza inandığım, bu günlere ulaőmamda en büyük katkıya sahip olan, çok erken kaybettiğim canım Babama sonsuz teşekkür ederim.

Haziran 2020

Ahmet Neim KAHVECİ
(İnşaat Mühendisi)

BEYANNAME

Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kılavuzu'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada, tez içindeki tüm verileri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun olarak sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu Üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmada kullanılmadığını beyan ederim.

10/06/ 2020

Ahmet Neim KAHVECİ

MERMER ATIKLARININ YOL TEMEL MALZEMESİ OLARAK FARKLI BOYUT ARALIKLARINDA İKAME EDİLMESİ

ÖZET

Dünyada sürekli olarak çoğalan nüfus, teknoloji ve sanayide yaşanan gelişmeler ile insanların artan ihtiyaçları sonucunda atık malzemeler artmaktadır. Atık olarak oluşan bu malzemeler istenmeyen bir takım çevre sorunlarını beraberinde getirmektedirler. Bu durum sonucunda ise atıkların geri dönüşümünün yapılması ya da farklı amaçlar için kullanımı zorunlu hale gelmiştir. Üretim miktarı olarak milyonlar mertebesini bulan ve endüstriyel faaliyetler sonucunda oluşan bu atıkların; farklı endüstri kollarında bir hammadde kaynağı olarak kullanılması ve atık bertarafı ile maliyet düşüşü konuları önem arz etmektedir. Hammadde tüketiminin en fazla olduğu sektörlerden birisi de inşaat sektörüdür. İnşaat sektörü, imalat aşamalarındaki giderlerini en asgari düzeyde tutmaya, enerji tüketimi ve hammadde kullanımını olabildiği kadar en aza indirmeye çalışmaktadır. Hammadde kullanımının yüksek miktarlarda olduğu bu sektörde, en fazla tüketilen hammadde agregadır. İnşaat sektöründe önemli bir yere sahip olan yol inşaatlarının esnek üstyapılarında kullanılan malzemelerin yaklaşık %95'i agregadan oluşmaktadır. İmalatta kullanılan bu agrega, civardaki uygun agrega ocaklarından veya doğal agrega kaynaklarından temin edilmektedir. Dünyada ve ülkemizde her geçen gün artan yol inşaatları yeni agrega ocaklarına olan ihtiyacı da giderek artırmaktadır. Agregaya ocaklarına olan ihtiyacın artması sonucunda ise yeryüzünün genel yapısı yer yer deformasyona uğramaktadır. Kütleli miktarlarda malzeme ihtiyacı olan yol inşaatlarında atık malzeme kullanımı, bir taraftan dünyada sınırlı miktarlarda bulunan doğal kaynakların hızla tüketimini önlerken, diğer taraftan da inşaat maliyetlerini azaltma bakımından fayda sağlamaktadır. Bu kapsamda Bilecik ili mermer ocaklarında oluşan atıkların Karayolu Teknik Şartnamesine (KTŞ) göre yol temel malzemesi olarak farklı boyut aralıklarında ikame edilmesi amacı ile bir çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada KTŞ'de belirtilen laboratuvar deneyleri yapılmıştır. Deneylerden elde edilen sonuçlar mermer atıklarının yol temel malzemesi olarak farklı boyut aralıklarında ikame edilebileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler

Mermer atığı; Yol temel malzemesi; Bilecik ili.

SUBSTITUTION OF MARBLE WASTES IN DIFFERENT SIZE RANGES AS ROAD BASE MATERIAL

ABSTRACT

The waste materials increase as a result of the expanding human needs associated with population growth and technological and industrial advances. These waste by-products bring about some undesirable environmental impacts. This necessitates the recycling or the usage of them for different purposes. The waste materials are produced as a result of industrial activity and their amounts reach millions of tons per year. It is, therefore, crucial to use these materials as raw material in different industrial sectors and to reduce the cost by waste disposal. The construction sector is one of the sectors with the highest raw material consumption. The construction sector struggles to reduce the building expenses, energy consumption, and raw material usage to a minimum. The most consumed raw material is aggregate in this sector with high raw material usage. The flexible top layers of roads are important in the construction sector and approximately 95% of the material used in these layers is aggregate. The aggregate used in construction is provided from either aggregate mines or natural aggregate sources. The need for new aggregate mines gradually increases due to the increase in road constructions in the world and in our country. As a consequence of the increasing need for aggregate mines, the Earth's crust is deformed from place to place. The waste material usage in road construction in need of bulk material prevents the fast consumption of limited natural sources in the world and is beneficial due to reductions in construction costs. In this direction, a study is conducted for the aim of substitution of marble wastes produced in the mines of Bilecik province as road base material in accordance with the Turkish Highway Specification (KTŞ). The laboratory experiments specified in the Turkish Highway Specification were conducted in this study. The experimental results show that marble waste in different size ranges can be substituted as road base material.

Keywords: Marble waste; Road base material, Bilecik province

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No
TEŞEKKÜR
BEYANNAME
ÖZET.....	I
ABSTRACT	II
İÇİNDEKİLER	III
ÇİZELGELER DİZİNİ	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	VIII
SİMGELER VE KISALTMALAR	XII
1. GİRİŞ.....	1
2. MERMERİN TANIMI VE DÜNYA'DA, TÜRKİYE'DE VE BİLECİK'TE	
MERMER	4
2.1. Mermerin Tanımı	4
2.1.1. Bilimsel Tanım	4
2.2.2. Ticari Tanım.....	4
2.2. Dünya'da Mermer	5
2.3. Türkiye'de Mermer	5
2.4. Bilecik'te Mermer	7
2.5. Mermer Atıkları.....	11
3. KARAYOLU ÜST YAPISI	17
3.1. Yol Altyapısı	17
3.2. Yol Üstyapısı.....	18
3.2.1. Rijit Üstyapı	19
3.2.2. Esnek Üstyapı	19
3.2.2.1. Üstyapı Taban Zemini	21
3.2.2.2. Alt Temel Tabakası.....	22
3.2.2.3. Temel Tabakası	24
4. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI	31
5. MATERYAL VE YÖNTEM	44
5.1. Materyal	44
5.2. Yöntem	46

5.2.1.Elek Analizi.....	48
5.2.2.Parçalanma Direncinin Tayini Los Angeles Metodu	50
5.2.3.Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi	52
5.2.4.Özgül Ağırlık ve Su Emme (Absorbsiyon) Deneyi.....	54
5.2.5.Yassılık İndeksi Deneyi.....	56
5.2.6.NaOH İle Organik Madde Tespiti Deneyi.....	57
5.2.7.Kil Topağı Deneyi	58
5.2.8.Likit Limit Deneyi	59
5.2.9.Plastik Limit Deneyi.....	61
5.2.10. Metilen Mavisı Deneyi.....	62
5.2.11. Modifiye Proktor Deneyi	63
5.2.12. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi	65
5.2.13. Donma-Çözünme Deneyi.....	67
5.2.14. X-Işınları Difraktogramı (XRD) Analizi	68
5.2.15. X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF) Analizi	69
5.2.16. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM-EDS) Analizleri	69
6. DENEY SONUÇLARI.....	71
6.1. Elek Analizi Deneyi	71
6.2. Parçalanma Direncinin Tayini Los Angeles Metodu	75
6.3. Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi	76
6.4. Özgül Ağırlık ve Su Emme (Absorbsiyon) Deneyi.....	77
6.5. Yassılık İndeksi Deneyi.....	78
6.6. NaOH İle Organik Madde Tespiti Deneyi.....	79
6.7. Kil Topağı Deneyi.....	79
6.8. Likit Limit Deneyi.....	80
6.9. Plastik Limit Deneyi.....	81
6.10. Metilen Mavisı Deneyi.....	81
6.11. Modifiye Proktor Deneyi.....	82
6.12. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi	87
6.13.Donma-Çözünme Deneyi.....	98
6.14.X-Işınları Difraktogramı (XRD) Analizi.....	116
6.15.X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF) Analizi.....	118

6.16.Taramalı Elektron Mikroskop (SEM-EDS) Analizleri	119
6.17.Deney Sonuçlarının Genel Değerlendirilmesi.....	121
7. MALİYET ANALİZİ	132
8. SONUÇLAR.....	135
KAYNAKLAR	138
EKLER.....	144
ÖZ GEÇMİŞ.....

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Türkiye mermer üretim miktarları.....	7
Çizelge 2.2. Bilecik ili mermer işletmelerinin coğrafi olarak dağılımı	10
Çizelge 2.3. Bilecik ili mermer rezervi.....	11
Çizelge 2.4. Firma başına açığa çıkan atık miktarı ve değerlendirilme şekli	15
Çizelge 3.1. Alt temel malzemesi gradasyon limitleri.....	23
Çizelge 3.2. Alt temel malzemesi fiziksel özellikleri	24
Çizelge 3.3. Kaba agregaların fiziksel özellikleri.....	25
Çizelge 3.4. İnce agregaların fiziksel özellikleri	26
Çizelge 3.5. Granüler temel tabakasının gradasyon limitleri.....	27
Çizelge 3.6. PMT tabakasının gradasyon limitleri.....	28
Çizelge 3.7. ÇBGT tabakasının gradasyonu	29
Çizelge 5.1. TİP-1 PM temel tabakası karışım oranları.....	46
Çizelge 5.2. Oluşturulan karışım tipleri.....	46
Çizelge 5.3. Deney sayıları ve kullanılan standartlar	48
Çizelge 5.4. Amerikan elek sistemi	50
Çizelge 5.5. Su emme deneyi numune miktarları	54
Çizelge 5.6. Yassılık indeksi deneyi gerekli malzeme miktarları.....	56
Çizelge 5.7. Numune dane boyutlarına karşılık gelen elek boyutları.....	59
Çizelge 6.1. Zemin sınıflandırılması.....	74
Çizelge 6.2. NaOH ile organik madde tespit deneyi sonuçları.....	79
Çizelge 6.3. Modifiye proktor deney sonuçları	84
Çizelge 6.4. Modifiye proktor sonrası karışımlarda oluşan kayıplar.....	85
Çizelge 6.5. XRF deney sonuçları	118
Çizelge 6.6. Deney sonuçlarının karşılaştırılması.....	121
Çizelge 6.7. CBR değerlerinin karşılaştırılması	123
Çizelge 6.8. Kuru ve yaş CBR değerlerindeki değişim	124
Çizelge 6.9. Donma-çözünme çevrim sayısına göre numunelerin su muhtevası	126
Çizelge 6.10. Anlık kür sonunda donma-çözünme CBR değerleri.....	128
Çizelge 6.11. 7 gün kür sonunda donma-çözünme CBR değerleri.....	128
Çizelge 6.12. Donma sonrası taşıma kapasitesinin değişimi	131

Çizelge 7.1. Doğal agrega birim maliyet analizi.....	132
Çizelge 7.2. Mermer atıkları birim maliyet analizi.....	133

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. a: Kontrolsüz atık depolama, b: Kontrollü atık bertarafı (modelleme)	3
Şekil 2.1. Türkiye mermer yatakları haritası	6
Şekil 2.2. Türkiye mermer üretim miktarı	7
Şekil 2.3. Bilecik ili mermer ocağı	8
Şekil 2.4. Bilecik ili maden haritası	9
Şekil 2.5. Bilecik ili maden türleri haritası	9
Şekil 2.6. Yol üst yapılarında kullanılan endüstriyel atık malzemelerin sınıflandırılması	15
Şekil 3.1. Üst yapı en kesiti	18
Şekil 5.1. Agregat stok sahası	44
Şekil 5.2. a: Mermer ocağından mermer temini, b: Mini konkasör yardımı ile malzeme kırımı	45
Şekil 5.3. Elek analizi deneyinden bir görünüm	49
Şekil 5.4. a: Los Angeles aşınma cihazı, b: Deney öncesi numune, c: Deney sonrası numune, d: Deney sonrası yıkanmış numune	51
Şekil 5.5. a: Deney öncesi numune, b: Çözelti içerisindeki numune, c: 1.deney sonucu numune, d: 5.deney sonucu numune	53
Şekil 5.6. a: Su emme deneyi, b: Numunenin etüvde kurutulması, c: Özgül ağırlık deneyi.....	55
Şekil 5.7. Yassılık indeksi deneyi	56
Şekil 5.8. a: Çözelti hazırlığı, b: Mermer atığı numunesi, c: Kırmataş agregat numunesi	58
Şekil 5.9. Numune hazırlanması ve deney aşaması	59
Şekil 5.10. Likit limit deney hazırlığı	60
Şekil 5.11. Metilen mavisi deneyi.....	63
Şekil 5.12. Modifiye proktor deneyi yapılışı	64
Şekil 5.13. Yaş CBR deney aşamaları	66
Şekil 5.14. Türkiye için hazırlanan eş donma-çözünme haritası	67
Şekil 5.15. Kapalı sistem donma-çözünme cihazı	68
Şekil 6.1. Karışım-1 elek analizi grafiği	72

Şekil 6.2. Karışım-2 elek analizi grafiği	72
Şekil 6.3. Karışım-3 elek analizi grafiği	73
Şekil 6.4. Karışım-4 elek analizi grafiği	73
Şekil 6.5. Karışım-5 elek analizi grafiği	74
Şekil 6.6. Los Angeles aşınma deneyi sonuçları.....	75
Şekil 6.7. Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deney sonuçları.....	76
Şekil 6.8. Su emme deneyi sonuçları	77
Şekil 6.9. Yassılık indeksi deney sonuçları	78
Şekil 6.10. Kil topağı deney sonuçları (kırmataş agrega).....	80
Şekil 6.11. Kil topağı deney sonuçları (mermer atığı).....	80
Şekil 6.12. Likit limit deney sonuçları (a: kırmataş agrega, b: mermer atığı).....	81
Şekil 6.13. Metilen mavisi deney sonuçları	82
Şekil 6.14. Karışım-1 modifiye proktor deneyi grafiği.....	83
Şekil 6.15. Karışım-2 modifiye proktor deneyi grafiği.....	83
Şekil 6.16. Karışım-3 modifiye proktor deneyi grafiği.....	83
Şekil 6.17. Karışım-4 modifiye proktor deneyi grafiği.....	84
Şekil 6.18. Karışım-5 modifiye proktor deneyi grafiği.....	84
Şekil 6.19. Hazırlanan kuru karışımlar (a: Karışım-1, b: Karışım-2, c: Karışım-3, d:Karışım-4, e: Karışım-5)	86
Şekil 6.20. Optimum su muhtevastaki karışımlar (a: Karışım-1, b: Karışım-2, c:Karışım-3, d: Karışım-4, e: Karışım-5)	87
Şekil 6.21. Karışım-1 kuru CBR grafiği (anlık)	88
Şekil 6.22. Karışım-1 yaş CBR grafiği (anlık)	88
Şekil 6.23. Karışım-2 kuru CBR grafiği (anlık)	89
Şekil 6.24. Karışım-2 yaş CBR grafiği (anlık)	89
Şekil 6.25. Karışım-3 kuru CBR grafiği (anlık)	89
Şekil 6.26. Karışım-3 yaş CBR grafiği (anlık)	90
Şekil 6.27. Karışım-4 kuru CBR grafiği (anlık)	90
Şekil 6.28. Karışım-4 yaş CBR grafiği (anlık)	90
Şekil 6.29. Karışım-5 kuru CBR grafiği (anlık)	91
Şekil 6.30. Karışım-5 yaş CBR grafiği (anlık)	91
Şekil 6.31. Tüm karışım tiplerinin CBR değerleri (anlık)	92

Şekil 6.32. Karışım-1 kuru CBR grafiği (7 gün kür).....	93
Şekil 6.33. Karışım-1 yaş CBR grafiği (7 gün kür).....	93
Şekil 6.34. Karışım-2 kuru CBR grafiği (7 gün kür).....	93
Şekil 6.35. Karışım-2 yaş CBR grafiği (7 gün kür).....	94
Şekil 6.36. Karışım-3 kuru CBR grafiği (7 gün kür).....	94
Şekil 6.37. Karışım-3 yaş CBR grafiği (7 gün kür).....	94
Şekil 6.38. Karışım-4 kuru CBR grafiği (7 gün kür).....	95
Şekil 6.39. Karışım-4 yaş CBR grafiği (7 gün kür).....	95
Şekil 6.40. Karışım-5 kuru CBR grafiği (7 gün kür).....	95
Şekil 6.41. Karışım-5 yaş CBR grafiği (7 gün kür).....	96
Şekil 6.42. Tüm karışım tiplerinin CBR değerleri (7 gün kür).....	96
Şekil 6.43. Kuru CBR anlık ve 7 günlük kür sonuçlarının karşılaştırılması.....	97
Şekil 6.44. Yaş CBR anlık ve 7 günlük kür sonuçlarının karşılaştırılması.....	97
Şekil 6.45. Karışım-1, 4 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık).....	98
Şekil 6.46. Karışım-1, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık).....	99
Şekil 6.47. Karışım-1, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık).....	99
Şekil 6.48. Karışım-2, 4 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık).....	99
Şekil 6.49. Karışım-2, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık).....	100
Şekil 6.50. Karışım-2, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık).....	100
Şekil 6.51. Karışım-3, 4 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık).....	100
Şekil 6.52. Karışım-3, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık).....	101
Şekil 6.53. Karışım-3, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık).....	101
Şekil 6.54. Karışım-4, 4 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık).....	101
Şekil 6.55. Karışım-4, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık).....	102
Şekil 6.56. Karışım-4, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık).....	102
Şekil 6.57. Karışım-5, 4 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık).....	102
Şekil 6.58. Karışım-5, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık).....	103
Şekil 6.59. Karışım-5, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık).....	103
Şekil 6.60. Karışım-1 donma-çözünme karşılaştırma (anlık).....	104
Şekil 6.61. Karışım-2 donma-çözünme karşılaştırma (anlık).....	105
Şekil 6.62. Karışım-3 donma-çözünme karşılaştırma (anlık).....	105
Şekil 6.63. Karışım-4 donma-çözünme karşılaştırma (anlık).....	106

Şekil 6.64. Karışım-5 donma-çözünme karşılaştırma (anlık).....	107
Şekil 6.65. Karışım-1, 4 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür).....	108
Şekil 6.66. Karışım-1, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür).....	108
Şekil 6.67. Karışım-1, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür).....	108
Şekil 6.68. Karışım-2, 4 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür).....	109
Şekil 6.69. Karışım-2, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür).....	109
Şekil 6.70. Karışım-2, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür).....	109
Şekil 6.71. Karışım-3, 4 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür).....	110
Şekil 6.72. Karışım-3, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür).....	110
Şekil 6.73. Karışım-3, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür).....	110
Şekil 6.74. Karışım-4, 4 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür).....	111
Şekil 6.75. Karışım-4, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür).....	111
Şekil 6.76. Karışım-4, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür).....	111
Şekil 6.77. Karışım-5, 4 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür).....	112
Şekil 6.78. Karışım-5, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür).....	112
Şekil 6.79. Karışım-5, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür).....	112
Şekil 6.80. Karışım-1 donma-çözünme karşılaştırma (7 gün kür).....	113
Şekil 6.81. Karışım-2 donma-çözünme karşılaştırma (7 gün kür).....	113
Şekil 6.82. Karışım-3 donma-çözünme karşılaştırma (7 gün kür).....	114
Şekil 6.83. Karışım-4 donma-çözünme karşılaştırma (7 gün kür).....	115
Şekil 6.84. Karışım-5 donma-çözünme karşılaştırma (7 gün kür).....	116
Şekil 6.85. Kırmataş agrega XRD grafiği.....	117
Şekil 6.86. Mermer atığı XRD grafiği	117
Şekil 6.87. Kırmataş agrega SEM görüntüleri (a: 1000 kat büyütülmüş, b: 5000 kat büyütülmüş, c: 10000 kat büyütülmüş).....	119
Şekil 6.88. Mermer atığı SEM görüntüleri (a: 1000 kat büyütülmüş, b: 5000 kat büyütülmüş, c: 10000 kat büyütülmüş).....	119
Şekil 6.89. Kırmataş agrega EDS görüntüsü ve grafiği.....	120
Şekil 6.90. Mermer atığı EDS görüntüsü ve grafiği	120
Şekil 6.91. Donma nedeni ile dane gözenek suyunun hareketi.....	127
Şekil 6.92. CBR deneyi sırasında yaşanan su kaybı.....	130

SİMGELER VE KISALTMALAR

mm:	Milimetre
kg:	Kilogram
gr:	Gram
mg:	Miligram
ml:	Mililitre
l:	Litre
sa:	Saat
cm:	Santimetre
m:	Metre
t:	Ton
°C:	Celcius
km:	Kilometre
WL:	Likit limit
Wp:	Plastik limit
IP:	Plastisite indisi
Mg:	Magnezyum
K:	Potasyum
Ca:	Kalsiyum
dk:	Dakika
K:	Motorlu araç taşıma katsayısı
M:	Mesafe
TL:	Türk Lirası
KTŞ:	Karayolu Teknik Şartnamesi

1. GİRİŞ

Teknolojideki gelişmeler ve dünya nüfusunda yaşanan sürekli artış neticesinde atıklar oluşmaktadır. Kullanım dışı malzeme olarak isimlendirilen atıklar beraberinde bir takım çevre sorunlarını da sebep olmaktadır. Özellikle sanayi atıklarının hacminde yaşanan hızlı artış çevre kirliliğine sebep olmakta ve bu kirlilikte doğal yaşam üzerinde olumsuz etkiler bırakmaktadır. Dünyamızda bulunan doğal kaynakların hızlı bir şekilde tükenmesiyle birlikte karşılaşılan bu sorunların çözümü de büyük bir önem kazanmaktadır. Günümüzde, oluşan atıkların azaltılması, hammadde kaynağı olarak mevcut atıkların değerlendirilmesi ve kullanılmış olan hammaddelerin yeniden değerlendirilmesi gibi atık yönetimi konularında çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. Üretim miktarının milyonlar mertebesine ulaştığı ve endüstriyel faaliyetler sonucunda meydana gelen atıklar; farklı endüstri kollarında bir hammadde kaynağı olarak yeniden kullanımı ile geri kazanımı, maliyet düşüşü, atık bertarafı ve etkin bir şekilde kaynak kullanımı gibi nedenlerden ötürü önemli bir hal almaktadır.

Mermer atıklarının çevre ve diğer bakımlardan etkileri;

1. Atık yok edilemezdir,
2. Bu atıkların dökülebileceği alanlar sınırlıdır ve görüntüsü çirkindir,
3. Döküldüğü alanda toprağın kirlenmesi,
4. Döküldüğü alandaki nehir ve diğer su kaynaklarının kirlenmesi ve dolayısıyla içme suyu ve sulama kaynaklarının bundan etkilenmesi,
5. Havanın kirlenmesi (Kushwah vd., 2015) şeklinde listenebilir.

Yapılan çalışmalarda meydana gelen atıklardan yeni ürünler elde edilebilmesi veya oluşan atıkların katkı maddesi olarak yeniden kullanılması hedeflenmektedir. Atık olarak oluşan malzemelerin yeniden kullanımı veya geri dönüşümü ile, yeryüzünde kısıtlı miktarlarda bulunan doğal kaynakların tüketimi azaltılacak ve doğada meydana gelecek tahribatın önüne geçilecektir. Diğer taraftan atık malzemenin geri dönüşümü, üretimde verimliliği artırarak atık depolaması ile oluşabilecek çevre problemlerini de en aza indirmektedir (Bilensoy, 2010).

Hammadde tüketiminde en fazla paya sahip olan sektörlerden biri de inşaat sektörüdür. İnşaat sektörünün amaçları arasında, imalat aşamasındaki maliyetleri minimum düzeye indirmek, enerji tüketimi ve hammadde kullanımını mümkün olduğu kadar en aza indirmek yer almaktadır.

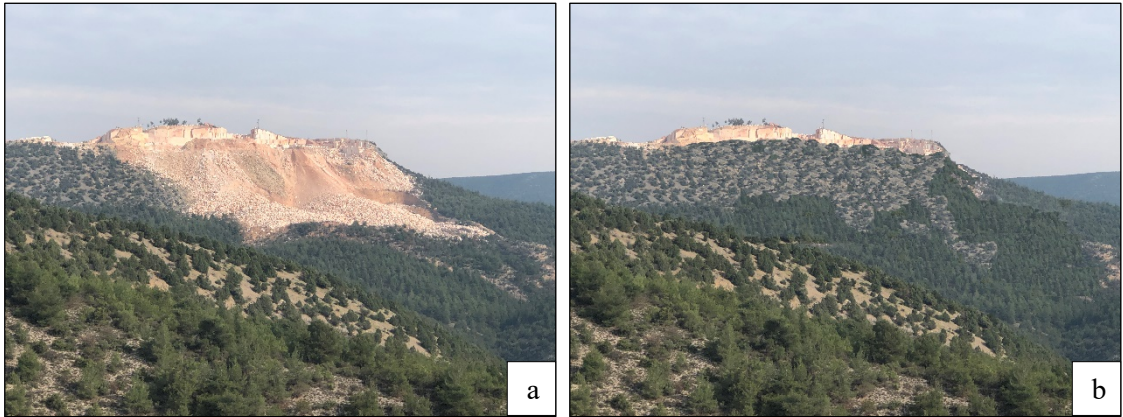
Hammadde tüketiminin en çok olduğu inşaat sektöründe en fazla tüketilen hammadde ise agregadır. Bu sektörünün önemli bir alanını oluşturan yol inşaatlarında üstyapıda kullanılan malzemelerin yaklaşık %95'ini agregalar oluşturmaktadır. İmalatta kullanılan agrega, çevredeki uygun agrega ocaklarından temin edilmektedir. Bu nedenle her geçen gün agregaya olan ihtiyacın artması ile birlikte yeni agrega ocaklarına olan ihtiyaçta giderek artmaktadır. Agregada ocaklarına olan ihtiyacın artması ile, yeryüzünün genel yapısında yer yer bozulmalar meydana gelmektedir. Bunun yanı sıra yerleşim yerlerinin yakınında bulunan ocaklarda kaliteli malzemenin azalmasıyla, yerleşim yerlerinden daha uzak mesafelerde bulunan ocaklara bir yönelme söz konusu olacaktır. Bu yönelme sonucunda malzeme temini için nakliye maliyetlerinde bir artış yaşanacaktır (Yılmaz ve Süttaş, 2008). Bu sebeple, yol inşaatlarında atıkların kullanılması çok yönlü fayda sağlamaktadır. Büyük miktarlarda malzeme ihtiyacı olan yol inşaatlarında atık kullanımı, bir taraftan dünyamızda kısıtlı miktarlarda bulunan doğal kaynakların hızla azalmasını önlerken, diğer taraftan da inşaat maliyetlerinde yaşanan düşüş bakımından fayda sağlamaktadır (Alataş vd., 2006).

Türkiye 'de ve dünyada son yıllarda yol yapım maliyetlerinin yüksek olması ve atık maddelerin kullanıldıkları yol üst yapısının performans özelliklerinde sağladıkları katkı nedeniyle, araştırmacılar bu atık maddelerin yeniden kullanılması konusundaki çalışmalara yönelmiştir.

Gelişmiş ülkeler de gereksiz doğal kaynak kullanımını engellemenin yanında, hayat standartlarını iyileştirme amaçlı ve meydana gelen enerji ihtiyacıyla, atıkların geri kazanılmasını amaçlayan yöntemlerin geliştirilmesine hız vermiştir. Ülkemizde ise geri dönüşüm amaçlı çalışmalar henüz istenen seviyede olmasa da son yıllarda hız kazanmıştır. Daha önceleri önemsenmeyen atık yönetimi planlaması son yıllarda yapılan yasal zorunluluklarla birlikte endüstri ve sanayi işletmeleri için vazgeçilmez bir durum haline gelmiştir. Geri dönüşüm; meydana gelen atıkların ham madde olarak kullanılması ile yeni bir ürün elde edilmesi olarak adlandırılmaktadır. Geri dönüşüm evreleri ise, kaynaktan ayrıştırma, kullanılabilir atıkların ayrı ayrı toplanması, sınıflandırılması, değerlendirilmesi ve elde edilen yeni ürünün ekonomiye geri kazandırılması olmak üzere beş adımdan oluşmaktadır. Geri kazanım da amaç atıkların, yeniden kullanılarak enerji elde etme veya fiziksel ve kimyasal birtakım işlemler uygulanması sonucunda yeni bir ürün elde etmek amacı ile toplanmasıdır. Gelişmekte olan ve ekonomik olarak birtakım

zorluklar çeken ülkelerin doğal kaynaklarından verimli bir şekilde uzun süre faydalanabilmeleri için atık israfını önleyerek, ekonomik olarak katma değere sahip malzemeleri geri kazanma ve tekrar kullanma metotlarını araştırmaları gerekmektedir.

Geri dönüşümün sağladığı diğer bir fayda ise doğal kaynakların gereksiz yere tahrip edilmemesidir. Dünya nüfusunda yaşanan hızlı artış ve tüketim alışkanlıklarında meydana gelen değişimler ile doğal kaynaklar günden güne azalmaktadır. Azalan doğal kaynakları verimli bir şekilde kullanabilmek için malzeme üretiminde hammadde ihtiyacını azaltarak, geri dönüştürülebilir atıkları yeniden kullanmak gerekmektedir. Bu yüzden doğal kaynakların korunması ve gerektiği gibi kullanılması geri dönüşüm açısından önemli bir işlemdir. Geri dönüşüm amacı ile yapılan tüm çalışmalar, atık yönetimi çalışmalarını ülke genelinde yaygınlaştırarak, oluşacak atık miktarlarını azaltmayı amaçlamaktadır. Bu sebeple atık yönetimi ile çevreye verilen olumsuz etkiler azalacak, yeni hammadde ihtiyacı azalacak ve enerjide tasarruf sağlanacaktır. Şekil 1.1.(a)'da mermer ocaklarının doğa içerisindeki oluşturmuş oldukları durumlar ve tahribatlar görülmektedir. Atıkların kontrolsüz şekilde doğaya bırakılması yerine geri dönüşümü tercih edilerek yol inşaatlarında kullanılmış olması ile hem atık bertarafı için ekstra bir maliyet hem de bu istenmeyen çevresel sorunlar oluşmayacaktı. Atık malzemenin geri dönüşüm için ocak sahasından uzaklaştırıldığı düşünüldüğünde ocakta ortaya çıkacak görüntü Şekil 1.1 (b)'de modellenmiştir. Görüldüğü üzere atık kontrolü ile olumsuz çevresel faktörlerin önüne geçilmiş, atıkların geri kazanılması ile doğamızda sınırlı miktarlarda bulunan hammaddeye olan ihtiyaç azalmış ve yine ekonomik bir fayda sağlanmıştır.



Şekil 1.1. a: Kontrolsüz atık depolama, b: Kontrollü atık bertarafı (modelleme)

2. MERMERİN TANIMI VE DÜNYA'DA, TÜRKİYE'DE VE BİLECİK'TE MERMER

2.1. Mermerin Tanımı

Doğal taşlar insanlığın var oluşundan günümüze kadar sanatta ve yapı sektöründe sıkça kullanılan ve vazgeçilemez olan en önemli doğal kaynak olmuştur. Doğal taşları kökenlerine, kullanım alanlarına ve sertliklerine göre değişik şekillerde sınıflandırılırlar. Doğal taş kökeninden gelmekte olan mermerler bilimsel ve ticari tanım olmak üzere iki farklı tanıma sahiptir (Genç, 2004).

2.1.1. Bilimsel Tanım

Başkalaşım (metamorfizma) geçiren ve bu başkalaşımın izlerini bünyesinde taşıyan kalker (CaCO_3), dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) gibi karbonat bileşimli kayaçlar mermer olarak adlandırılır. Gerçek mermer olarak bilinen bu kayaçlarda, yüksek miktarlarda kalsiyum karbonat (CaCO_3), daha az miktarlarda magnezyum karbonat (MgCO_3) ve değişik miktarlarda metal oksitler bulunur. Mermerler saf bir yapıda olduklarında renkleri yarı saydam ve beyaz iken daha sonra yaşadıkları biçim değişiklikleri ve çeşitli kimyasal çözünme süreçleri ile ilginç ve farklı renkte görünüm kazanırlar. Örneğin bu değişimler sonucunda kırmızı, sarı, pembe, siyah ve mavimsi renkte olabilmektedirler. Aynı zamanda yer hareketleri ile mermer kayacında kırılmalar oluşmakta ve oluşan bu kırıklara daha sonradan kalsit dolması ile kayaç içerisinde damarlı bir yapı oluşabilmektedir (Genç, 2004).

2.2.2. Ticari Tanım

Ticari standartlara uygun şekilde istenilen ebatlarda blok elde edilebilen, kesilip parlatılabilen veya işlenebilen yüzeye sahip ve taş özellikleri bakımından kaplama taşı normlarında olan her türden taş (magmatik, metaformik ve tortul) ticari anlamda mermer olarak tanımlanmaktadır. Bu tanımlamaya göre gerçek mermere ilave olarak iyi bir şekilde parlatılabilen kalker, kumtaşı, traverten, gibi tortul; gnays, kuvarsit gibi metamorfik; bazalt, granit, siyenit, serpartin, andezit, gibi magmatik taşlar da mermer olarak isimlendirilmektedir (Genç, 2004).

2.2. Dünya’da Mermer

Dünya mermer rezervleri incelendiğinde, genel olarak Alp-Himalaya kuşağı içerisinde bulunan Portekiz, İspanya, İtalya, Türkiye, Yunanistan, İran, Pakistan gibi ülkelerde karbonatlı kayaç (mermer, traverten, kireçtaşı ve oniks) rezervlerinin fazla bulunduğu görülmektedir. İşletilebilir magmatik kayaç (serttaş) rezervlerinin ise Finlandiya, İspanya, Norveç, Rusya, Ukrayna, Çin, Pakistan, Hindistan, Güney Afrika ve Brezilya’da kümelenildiği görülmektedir (Bilensoy, 2010).

İtalya dünya mermer sektöründe lider ülke konumundadır. Gerek rezerv gerekse üretim ve işleme teknolojisi alanında dünya mermerciliğinin merkezi durumundadır. Son yıllarda mermer rezervlerinin azalması, çevreci grupların baskısı ve İtalya’nın farklı türdeki mermerlerini dünya pazarlarına sokma isteği dünyanın en büyük blok ithalatçısı durumunda olmasına sebep olmuştur. Bunun yanında Türkiye, Yunanistan, İspanya, Portekiz, Brezilya, Çin, Arjantin, Hindistan, Tayvan, Güney Kore işlenmiş mermer ihraç eden ülkelerdir. İsrail, Suudi Arabistan, Fas, Fransa, Belçika, Almanya, İngiltere, Finlandiya, Japonya, Avustralya ve Yeni Zelanda kendi üretimleri yanında blok ithalatı da yapan ülkelerdir. Rusya, İskandinavya Ülkeleri, Orta Asya Cumhuriyetleri, Nepal ve Güney Afrika Ülkeleri zengin rezervlere sahip ancak bunları değerlendiremeyen ve blok olarak satan ülkelerdir. Özellikle Çin’in maliyet faktörüne bakmadan gerçekleştirdiği üretim artışı tüm dünyada bir etki yaratmıştır. Bu iki ürün grubunda Türkiye, İspanya, İtalya, Çin, Fransa, Hindistan ve Portekiz önemli ihracatçı ülkeler konumuna gelmiştir. İspanya 2006 yılı itibariyle ham blok mermer ürünü ihracatında tüm dünyada gerçekleşen toplam ihracatın %24’üne sahip olarak ilk sırayı almıştır. Türkiye ise %17.6’lık bir payla ihracatta ikinci sırada yer almıştır (Bilensoy, 2010).

2.3. Türkiye’de Mermer

Ülkemiz doğal taş rezervleri bakımından zengin bir konuma sahiptir. Ülke genelinde jeolojik rezerv içerisindeki işletilebilir (görünür) rezervin miktarı belli değildir. Türkiye’de masif nitelikte olan metamorfik temeller içerisinde küçük ya da büyük yayıllı mercek formunda mermer yatakları bulunmaktadır.

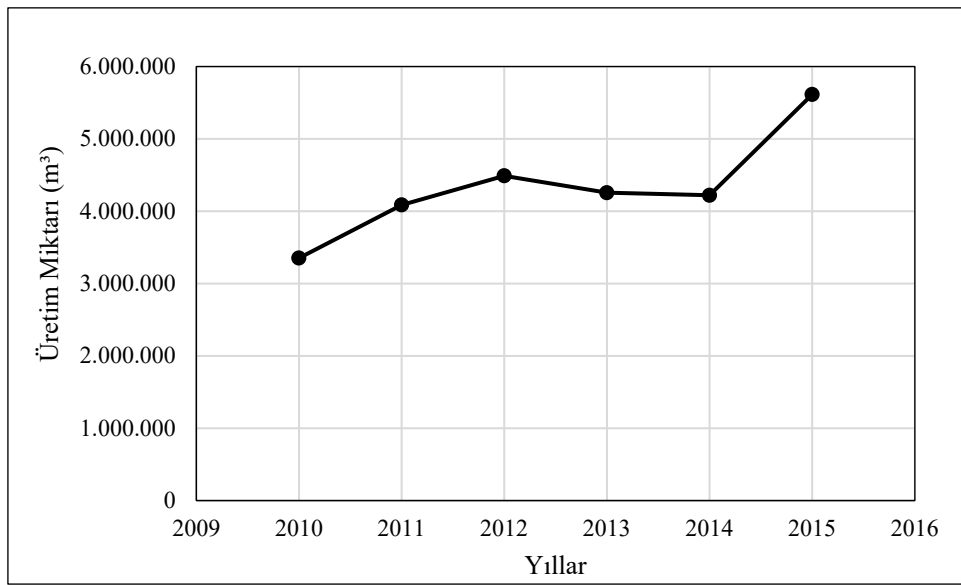
Türkiye mermer rezervleri yoğun olarak (Şekil 2.1.);

- İç Anadolu Bölgesi sınırları içerisinde Konya ve Eskişehir civarında,
- Marmara Bölgesi sınırları içerisinde Balıkesir, Bilecik, Kırklareli ve çevresinde,

2012 yılına kadar belirli oranlarda bir artış göstermiş ve en yüksek değerine 2012 yılında ulaşmıştır. Çok keskin değişimlere rastlamamakla birlikte 2012 yılından sonra mermer üretim miktarında bir miktar dalgalanmalar yaşanmıştır.

Çizelge 2.1. Türkiye mermer üretim miktarları (Kacı, 2017)

Maden	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Mermer (m ³)	3.352.070	4.086.222	4.488.947	4.255.545	4.220.564	5.613.435



Şekil 2.2. Türkiye mermer üretim miktarı

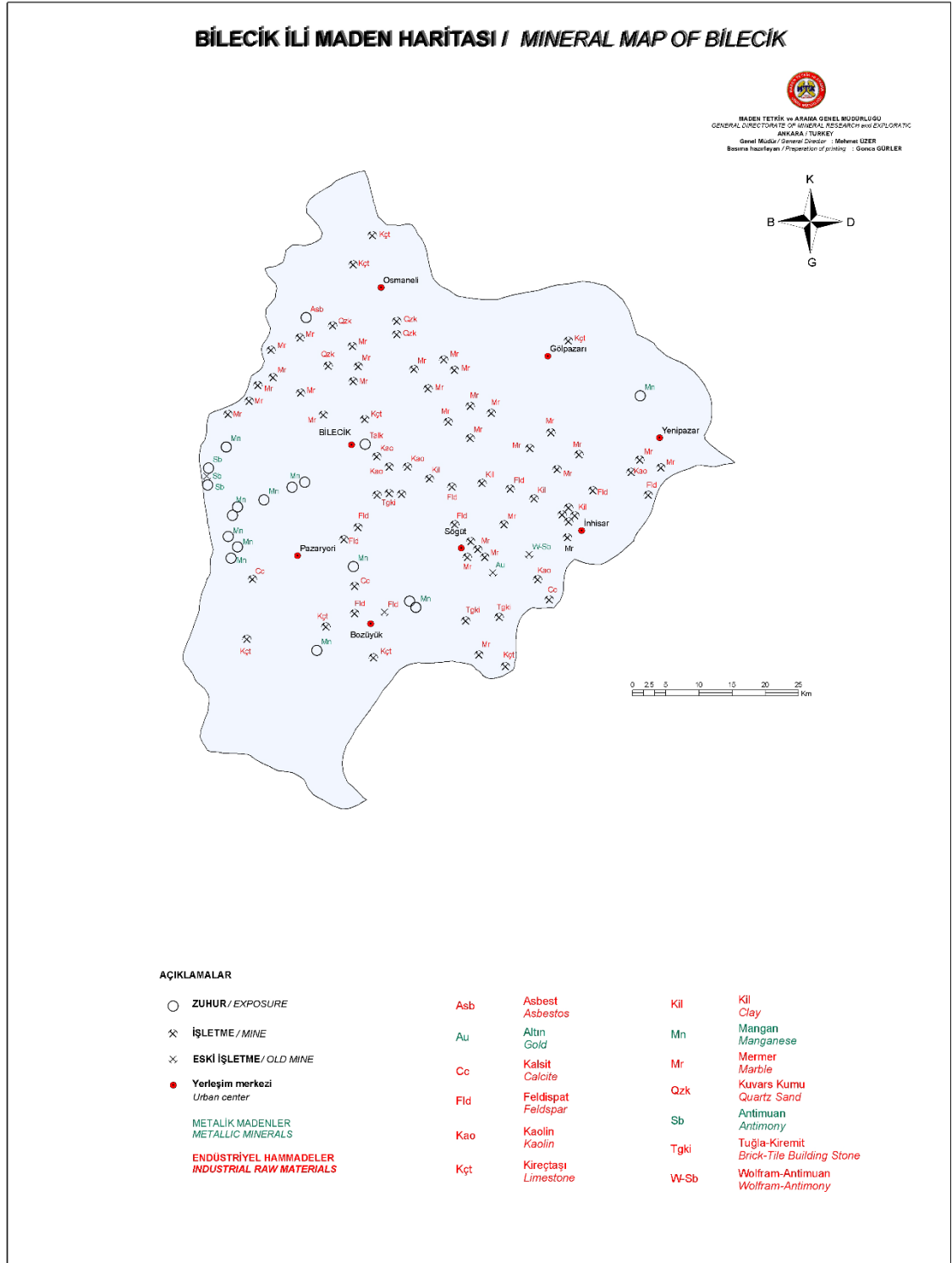
2.4. Bilecik'te Mermer

Bilecik ilinin Türkiye mermer rezervlerinin çok büyük bir kısmına sahip olduğu bilinmektedir. Bilecik ilinde kurulu bulunan (Şekil 2.3.) ve mermer işletmecileri tarafından üretilen Bilecik Bej Mermerleri dünyada yaklaşık olarak 80 ülkeye ihraç edilmektedir. Bu ihracatın yaklaşık olarak %15'lik kısmı Bilecik Mermer Sanayicileri tarafından yapılmaktadır. Bilecik Bej Mermeri, dünyadaki en lüks yapılarda, büyük ölçekli proje ve binalarda, geniş bir yelpazede kullanılan ve öncelikli olarak tercih edilen bir mermer cinsi olmuştur. Bilecik Bej Mermerinin bu denli tercih edilmesinden dolayı Bilecik'te ve çevresinde mermer sanayisinde hızlı bir gelişme yaşanmaktadır. Bilecik Bej Mermerinin sahip olduğu büyük rezervler yüzlerce mermer sanayicisine uzun yıllar

sürecek çalışma imkânı sunmaktadır (BMD, 2013). Şekil 2.4.'te Bilecik iline ait maden türleri ve Çizelge 2.2.'de mermer işletmelerinin coğrafi olarak dağılımı verilmiştir.



Şekil 2.3. Bilecik ili mermer ocağı



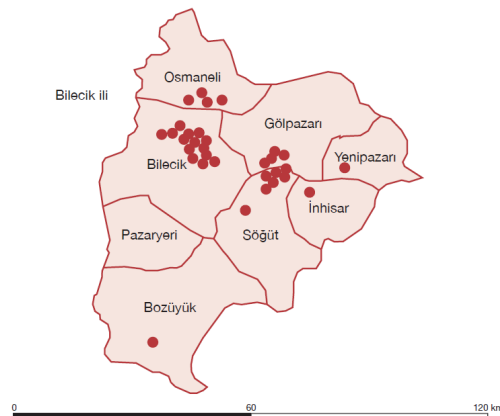
Şekil 2.4. Bilecik ili maden haritası (MTA, 2020)

Çizelge 2.2. Bilecik ili mermer işletmelerinin coğrafi olarak dağılımı (Kacı, 2017)

İlçeler	Mermer Ocağı Sayısı	Fabrika Sayısı	Toplam Mermer İşletme Sayısı
Bilecik Merkez	22	22	44
Bozüyük	1	4	5
Osmaneli	2	9	11
İnhisar	3	1	4
Gölpazarı	8	1	9
Söğüt	5	4	9
Yenipazar	5	-	5
Pazaryeri	1	-	1
Toplam	47	41	88

Bilecik ilinde mermer işletmelerinin coğrafi dağılımına bakıldığında ağırlığın Bilecik merkezde olduğu görülmektedir. Toplamda 41 mermer fabrikasından 22 tanesi ve 47 mermer ocağının da 22 tanesi merkezde bulunmaktadır.

Mermer ocaklarının dağılımına bakıldığında ise ocakların Merkez, Gölpazarı, Söğüt ve Yenipazar ilçelerinin arasında kalan bir hat boyunca sıkılaştığını görmekteyiz. Merkezde bulunan ocakların ise özellikle Bilecik-Yenişehir yolu üzerinde yoğunlaştığı bilinmektedir. Bunun yanında Bozüyük, Osmaneli ve İnhisar ilçelerinde ise az sayıda ocak bulunmaktadır. İlçelere göre ocak ve fabrika dağılımı Şekil 2.5.'de verilmiştir.

**Şekil 2.5.** Bilecik ili ilçelerine göre fabrika ve ocak dağılımı (Kacı, 2017)

Bilecik bölgesinde endüstriyel hammadde kaynağı olarak önemli düzeylerde mermer rezervleri mevcuttur. Bilecik pembe-gülkurusu ve Bilecik beji (Gölpazarı beji ve Söğüt beji) olarak adlandırılan bu mermerlerin sahip oldukları toplam rezerv 406.000.000 m³ olarak belirlenmiştir. Toplam bu rezerv içerisinde 400.000.000 m³ ile en büyük rezerve Gölpazarı-Şahinler köyü bölgesi sahiptir. Bu bölgede bej renkli, mikritik kalsitten oluşmuş mermerlerin çatlak ve boşluklarında sparitik kalsit dolgularına rastlanır. Sertliği 4, porozitesi %0.4 ve yoğunluğu ise 2.74 gr/cm³'tür. Taşçılar ve Çukurören bölgesinde bulunan rezervlerde ise mermerler pembe/bej hamur içerisinde gülkurusu-pembe damar ve merccek oluşumludur. Sertliği 4, porozitesi %0.5 ve yoğunluğu 2.72 gr/cm³'tür, yatak rezervi ise 1.000.000 m³'tür. Söğüt bölgesinde bulunan mermerler bej renkli olup, mikritik dokulu kriptokristalin kalsit ve dolomit kristallerinden oluşmuştur. Sertliği 3-4, porozitesi %0.659 veyoğunluğu 2.73 gr/cm³ olup yatağında yaklaşık olarak 5.000.000 m³ jeolojik rezerv tespit edilmiştir. Bu bilgiler Çizelge 2.3'te verilmiştir (Kacı, 2017).

Çizelge 2.3. Bilecik ili mermer rezervi (Kacı, 2017)

Mermer	Bölge	Kalite	Rezerv (m ³)	Yapı
Bilecik Pembe-Gülkurusu	Taşçılar-Çukurören Köyü	Sertlik: 4 Yoğunluk: 2.72 g/cm ³ Porozite: %0.5	1.000.000	Pembe/bej hamur içinde gülkurusu- pembe damar ve merccek desenlidir.
Gölpazarı Beji	Gölpazarı-Şahinler Köyü	Sertlik: 4 Yoğunluk 2.74 g/cm ³ Porozite: %0.4	400.000.000	Bej renkli, mikritik kalsitten oluşan mermerlerin çatlak ve boşluklarında sparitik kalsit dolguları izlenir
Söğüt Beji	Söğüt	Sertlik: 3- 4 Yoğunluk: 2.73 g/cm ³ Porozite: %0.659	5.000.000 jeolojik rezerv	Bej renkli, mikritik dokulu kriptokristalin kalsit ve dolomit kristallerinden oluşmuştur.

2.5. Mermer Atıkları

Mermer işleme ve kesme fabrikalarında üretim ve imalat sonucunda kayıp olarak ortaya belirli oranlarda atık ve/veya atıklar çıkmaktadır. Ülkemizde mermer rezervlerinin fazlalığı ve günümüzdeki mermere olan ihtiyacın artması, mermer fabrika ve işleme tesislerinin sayısında da hızlı bir artışa neden olmuştur. Fabrika ve işleme tesislerindeki artan üretimle beraber bu tesislerdeki mermer atıklarının miktarı da artış göstermiştir.

Ülkemizde kesilen ve işlenen doğal taşlardan yaklaşık %30'luk bir miktar atık olarak ortaya çıkmaktadır. Bu atıkların çevre üzerinde oluşturdukları olumsuz etkilerinin yanında, ekonomik olarak da bir kayıp oluşturdukları göz ardı edilmemelidir. Günümüzde değişik alanlarda değerlendirilebilen bu atıklar, alternatiflerinin yerine kullanıldıkları takdirde çok daha ekonomik bir hammadde kaynağı olabilmektedirler (Bilensoy, 2010).

Mermer ocaklarında blok üretimi sırasında karşılaşılan sorunlar (fay, yarık, çatlak), istenilen boyutta blok elde edilememesine ve dolayısıyla da irili ufaklı molozların atık olarak açığa çıkmasına neden olabilmektedir. Bu çeşit mermer atıklarının oluşumuna ocağın jeolojik yapısına ve kristal yapısına uygun üretim yöntemini seçmemek, yani yanlış üretim metodu kullanmak sebep olmaktadır (Bilensoy, 2010).

Mermer ocaklarında meydana gelen çok büyük ve istenmeyen şekildeki parçalar, çeşitli yöntemler kullanılarak istenilen boyutlarda altından, üstünden ve yanlarından kesilirler. Kesim sonucunda bir miktar atık oluşmaktadır. Bu atıklar ve ocakta oluşan tüm diğer atıklar ocağın bir tarafında depo edilirler. Ortaya çıkan bu atıkların tamamının değerlendirilmesi şimdiye kadar mümkün olmadığından, mermer ocaklarının etrafında veya yamacında bir yığın olarak bekletilmektedir (Lappa vd., 1997).

Mermer atıkları ekosistemde ciddi zararlar oluşturarak doğaya ait olan fiziksel, kimyasal ve biyolojik özellikleri önemli ölçüde etkilemektedir.

- Karada toprağın su emmesini ve porozitesini düşürdüğü için ürün verimlerinde düşüşler yaşanır. Bu alanlarda var olan bitkisel yaşam yok olma tehlikesi yaşamaktadır.

- Küçük parçalar havada uçarak hava kirliliğine sebep olurken insan sağlığı üzerinde olumsuz yönde etkiler yaratmaktadırlar. Bu küçük parçalar nehirlerden, kanallardan ve yoldan akan su içine nüfuz ederek suyun kalitesini bozarken depolanma kapasitesini de düşürür.

- Karada uzun bir süre kaldıkları zaman suyun akış rejiminde bozulmalara ve yer altı su kaynakları üzerinde olumsuz etkilere sahiptir.

- Çevreye dağılan atık yığınları görsel açıdan çirkin bir görüntü oluşturur. Bu atıklar yerleşim alanının sahip olduğu turizm ve endüstriyel potansiyeli üzerinde olumsuz bir etkiye sahiptir (Vijayalakshmi vd., 2001).

Mermer işleme tesislerinin yoğun olduğu bölgelerde meydana gelen mermer atık sahaları kamuoyu ve çeşitli çevre örgütleri nezdinde çevre ve doğa üzerinde yarattığı olumsuz etkiler yarattığı gerekçesiyle ciddi tepkilere neden olmaktadır.

Mermer atığı, mermerin ocaktan blok olarak çıkarılması, daha sonra bu blokların fabrikada işlenmesi sırasında meydana gelen ve mermer üretimi sonrasında geriye kalan mermer parça ve tozları olarak kabul edilmektedir. Bu atıkları oluşum yerlerine göre iki değişik şekilde sınıflandırılır, bunlar; ocaklarda ve fabrikalarda oluşan atıklardır. Boyutlarına göre sınıflandırma ise; molozlar, paledyenler, kapaklar ve toz atıklar olarak yapılmaktadır (Bilgin, 2010).

Mermer tesislerinde işlenen malzemeden oluşan toz ve kırıntı artıklar işlenen mermerlerin yaklaşık olarak %30'unu oluşturmaktadır. Farklı sanayi kollarında kullanım alanı bulabilen kırıntı atıklar alternatif malzemelerin yerine kullanıldığı zaman daha düşük bir maliyet oluşturabilmektedir. Diğer taraftan mermer işletmelerinde üretim sonrası ortaya çıkan toz atıklar ise genellikle değerlendirilememekte olup çevresel açıdan kirliliğe sebep olmaktadır (Bilgin, 2010).

Atıkların faydalı bir şekilde yeniden kullanılmasını sağlamak ve sürdürülebilir olmasını başarmak çevresel açıdan çok önemli bir girişimdir. Bunun yanında bilimsel araştırmalardan faydalanılmadan yapılan bir geri kazanım tam tersine istenmeyen etkilere yol açabilir. Başarılı bir araştırma sonucunda yeni bir yapı malzemesinin geliştirilmesi veya atık malzemelerin hammadde olarak kullanılması teknik, çevresel, finansal, pazarlama, kanuni ve sosyal açıdan bakıldığında çok karmaşık ve disiplinler arası bir iştir.

Nüfusun ve şehirleşmenin artması ile teknik yeniliklere bağlı olarak yaşam kalitesinin artması beklenmektedir. Yaşam kalitesindeki bu artış endüstriyel, madeni, evsel ve tarımsal alanlarda üretilen katı atıkların miktarında ve türünde artışa katkı sağlamaktadır.

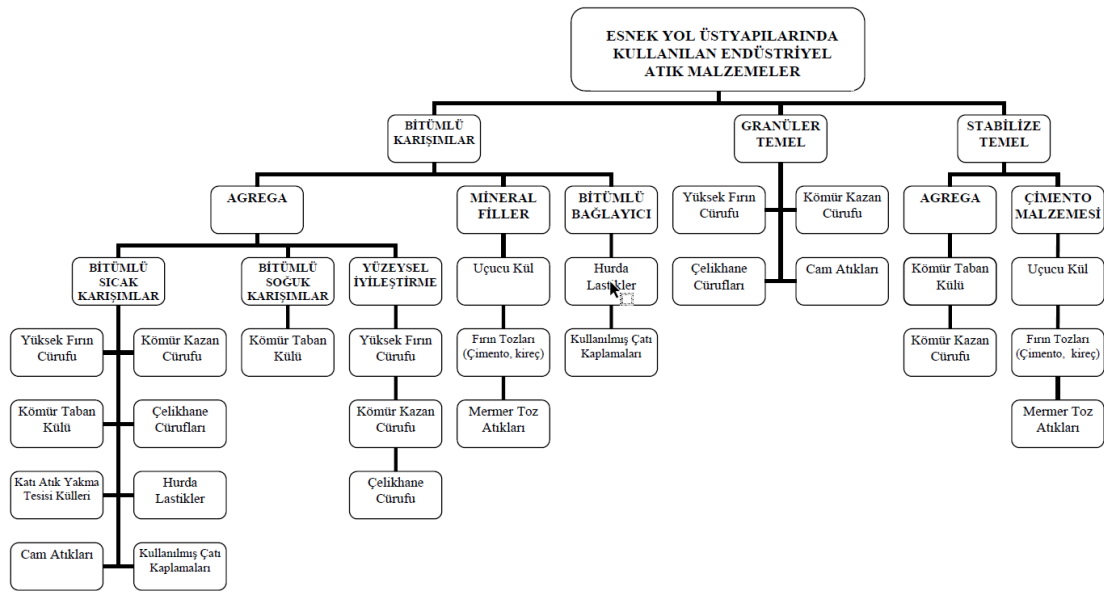
Endüstriyel atıkların hammadde olarak kullanımı veya alternatif yeni malzemelerin gelişiminde kullanılması düşük maliyet sağlamanın yanı sıra çevrenin korunmasını da beraberinde sağlayacaktır (Dhanapian vd., 2009a; 2009b).

Ocaklarda sayalama işlemi sonucunda da mermer atıkları oluşmaktadır. Ocakların yapısına uygun bir şekilde elde edilen şekilsiz ve kaba parçalar, çeşitli amaçlar doğrultusunda değişik yöntemlerle istenen ebatlarda alt, üst ve yanlarından kesilirler. Bu atıklar genel olarak pasa olarak adlandırılırlar. Bu atıklar ocak üretim miktarının yaklaşık olarak %50'sini oluştururlar ve bu atıkların tamamıyla değerlendirilmesi mümkün değildir. Bu atıklar mermer ocaklarının etrafında bir taş yığını olarak bekletilmektedir. Bu tip işletmeler çevrenin üzerinde olumsuz etki yaratmaktadırlar. Her mermer işletmesi bir

takım estetik kayıpların yanında doğanın kendine has özelliklerinin de yok olmasına sebep olur (Nicholson, 1995).

Fabrikada istenilen boyutlarda plakalar elde edebilmek için mermer blokları üzerinde kesim işlemi yapılmaktadır. Elde edilen bu plakalarda baş kesme ve yan kesme işlemleri ile uygun ölçülerde boyutlandırmalar yapılır. Ardından mermer plakalarında parlatma ve cilalama işlemleri yapılır. Bu esnada çok küçük boyutlarda mermer toz atıkları oluşmaktadır. Bu işlemlerin su kullanılarak yapılması ile açığa çıkan atıklar su ile beraber taşınmaktadır. Taşınan bu atıklar genellikle havuz yöntemi kullanılarak uygun bir şekilde toplanmaktadır. Daha sonra suyun ayrıştırılması sonucunda artık tozlar elde edilmektedir (Şentürk vd., 1996).

Günümüzde parça mermer atıkları; sıkıştırılmış yol tabakasında, baraj ve inşaatlarda dolgu malzemesi, beton agregası, döşeme plağı agregası, paledyen, demir yollarında zemin malzemesi ve yer döşeme malzemesi olarak kullanılmaktadır. Toz mermer atıkları ise, yol malzemesi olarak fiiller yerine, zirai kireçtaşı, zirai toprak ve zemin ayarlayıcı olarak, yem ve mineralli besinlerde, sıva katkı malzemesi olarak, çimento üretiminde, kireç üretiminde, kalsine dolomit üretiminde, cüruf yapıcı malzeme olarak, refrakter malzeme olarak, asit nötrleştirmede, cam üretiminde, kağıt üretiminde, şeker rafinasyonunda, baca gazından kükürdün giderilmesinde, karo ve tuğla üretiminde kullanılmaktadır (Bilgin, 2010). Esnek yol üstyapılarında kullanılan endüstriyel atık malzemeler Şekil 2.6.'da verilmiştir.



Şekil 2.6. Yol üst yapılarında kullanılabilen endüstriyel atık malzemelerin sınıflandırılması (Çağlar, 2007)

Bilecik ili mermer sektöründe 35 firma özelinde yapılan araştırmada her firma başına günlük ortalama 35 ton civarında atık mermer çıkmaktadır. Bu atığı çıkaran firmalardan %17.1'i atık malzemeyi geri dönüşüm malzemesi olarak çalıştıkları bölgede özellikle de yollarda dolgu malzemesi olarak kullanmaktadırlar. Bu firmaların %14.2'si ise atıkları atıl bir şekilde depolamakta ve herhangi bir şekilde kullanmamaktadır, %68.5 oranındaki firma ise atık malzemeyi ziyan olacak şekilde buldukları bölgede bırakmaktadırlar (Çizelge 2.4.) (Kacı, 2017).

Çizelge 2.4. Firma başına açığa çıkan atık miktarı ve değerlendirilme şekli (Kacı, 2017)

Atık mermer miktarı (ton/gün)		35.00	
Değerlendirilme Şekli			
	Geri Dönüşüm	Atıl Olarak	Ziyan
Firma Sayısı	6	5	24
Oran (%)	17.10	14.20	68.50

Mermer atıkları günümüzde tehlikeli bir atık olarak görülmesine de doğaya zarar verdikleri ve görüntü kirliliği oluşturdukları bilinmektedir. Bunun yanında tarım arazileri üzerinde olumsuz etkiler yaparak tarımın gelişmesini engelleyebilmektedir.

Mermer atıklarının değerlendirildiği alanları; inşaat sanayi, seramik sektörü, çimento imalat sanayi, kâğıt sanayi, plastik sanayi, yol yapımı ve kimya sektörü olarak sıralayabiliriz. Yapılan bu çalışmada mermer ocaklarından alınan atıkların, yol üst yapısının temel kısmında kullanılan malzemelerin yerine kullanılıp kullanılmayacağı ve şartnamelerde belirtilen kriterleri sağlayıp sağlamadığı araştırılmıştır. Bu amaçla, çalışma kapsamında; elek analizi, yassılık indeksi deneyi, hava tesirlerine ve donmaya karşı dayanıklılık deneyi, Los Angeles aşınma deneyi, NaOH ile yapılan organik madde tespiti deneyi, su emme ve özgül ağırlık deneyi, Atterberg kıvam limitleri deneyi, metilen mavisi deneyi, kil topağı deneyi, modifiye proktor deneyi, kuru ve yaş Kaliforniya taşıma oranı (CBR) deneyi, donma-çözünme deneyi, XRF, XRD, SEM ve EDS analizleri yapılmıştır.

3. KARAYOLU ÜST YAPISI

Karayolu, önceden belirlenmiş olan geometrik standartlar göz önünde bulundurularak karar verilmiş bir güzergah boyunca, doğal zeminin istenilen kotlarda oluşturulması ve üzerinde hareket edecek motorlu taşıtların arzu edilen hız, güvenlik ve konfor koşullarında hareketlerinin sağlanabilmesi için inşa edilen yapıların tamamı olarak tanımlanabilir. Bir karayolu, altyapı ve üstyapı olmak üzere iki ana kısımdan oluşmaktadır (İlıcılı vd, 2001).

3.1. Yol Altyapısı

Taşıt ve yayaların bir karayolunu rahatlıkla kullanabilmeleri için mevcut zeminin belli bir en kesit şekline dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla yol en kesitinde bulunan bazı yerlerde kazı, bazı yerlerde ise dolgular yapılır. Bu kazı ve dolgu işlemlerinin yapıldığı işe toprak işi adı verilir. Doğal zeminin düzeltilmesi sonucunda oluşan işe tesviye denir. Toprak işlerinin yapılmasından sonra oluşan yüzeye ise tesviye yüzeyi denir. Projesine uygun bir şekilde tesviye yüzeyine enine ve boyuna eğimler verilir. Daha sonra bir greyder ile son olarak detaylı bir düzeltme işlemi yapılır ve bu işleme ince tesviye (reglaj) adı verilir. Reglajı yapılmış olan bir yol kesiti üstyapı inşasına hazır demektir (Yayla, 2004).

Yapımı tamamlanmış olan bir karayolunda, altyapı olarak adlandırılan bölge tesviye yüzeyi ile doğal zemin çizgisi arasında bulunan kısımdır. Bu kısım, yolun dolgu ihtiyacı olan kesimlerinde, dışarıdan getirilen toprak yardımı ile oluşturulmuş bir gövdeden, yarma kesimlerinde ise doğal zeminden oluşmaktadır. Bunun yanında yarma yapılacak kesimlerde tesviye yüzeyini oluşturmak için yapılmış olan dolgu çalışmaları da alt yapı kapsamındadır. İlaveten köprü, viyadük, tünel, menfez ve istinat duvarı gibi sanat yapıları da yolun altyapı kısmında olduğu kabul edilir (İlıcılı vd., 2001).

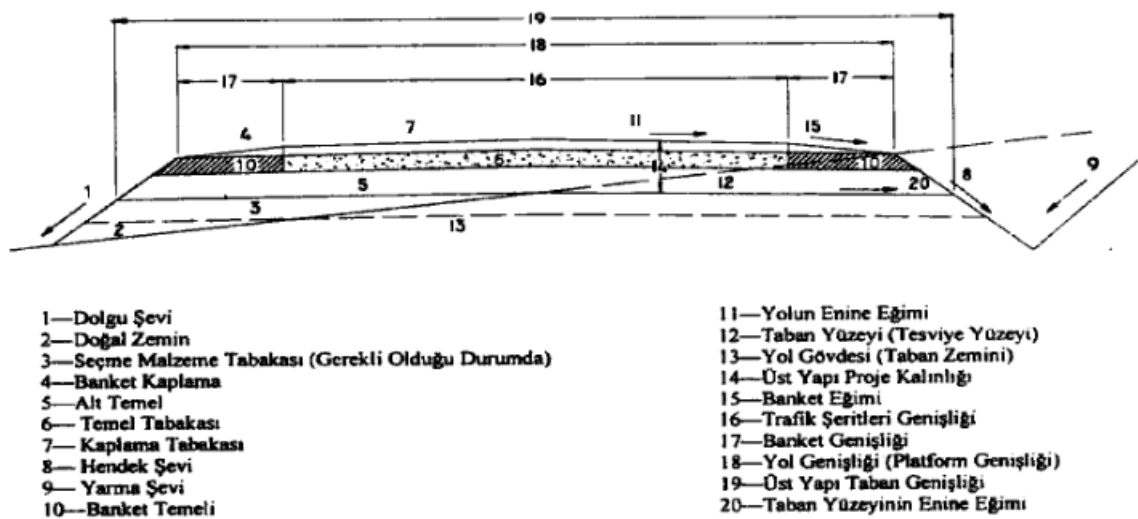
Altyapı yolun ana taşıyıcı kısmını oluşturur. Altyapının görevleri arasında, istenilen kotta düzgün bir yüzey sağlamak, üst yapının kendisinden gelen ve üst yapı tarafından aktarılan yükleri daha geniş bir alana yaymak ve az da olsa, yolu dış etkilere koruma olarak sıralanabilir. Altyapı kesiminin istenilen bu görevleri sağlayabilmesi trafik yüklerine, don ve su etkilerine karşı dayanıklı olmasına dayanmaktadır. Altyapı kesimi oluşturulurken; çürük zemin, bitkisel toprak ve sıkıştırma yapılamayan zeminlerin kullanılmamasına dikkat edilmelidir. Bu faktörler göz önünde bulundurularak altyapıyı

meydana getiren zemin özelliklerinin çok iyi etüt edilmesi gerekmektedir (İlıcılı vd., 2001).

3.2. Yol Üstyapısı

Bir üstyapının amaçları, trafik yüklerini altyapının taşıyabilecek olduğu değerlere indirmek, altyapıyı dış etkenlerden korumak ve düzgün bir yuvarlanma yüzeyi elde etme olarak sıralanabilir. Bu amaçlar doğrultusunda altyapı üzerinde oluşturulan alt temel, temel ve kaplama tabakalarının oluşturduğu bütüne üstyapı denilmektedir (İlıcılı vd., 2001).

Kaplama altında bulunan temel tabakası, bağlayıcı malzemesi olmayan ya da bir bağlayıcı madde yardımı ile karıştırılan belirli bir granülometrideki malzemelerden oluşur. Kaplamanın ana görevinin, üstyapının mevcut yük taşıma kapasitesini artırmanın yanı sıra, trafik hareketleri sonucunda oluşan yüksek kayma gerilmelerine dayanabilecek, don olaylarına karşı koruma sağlayabilecek ve drenaja yardımcı olabilecek niteliklerde olmalıdır. Alt temel tabakasının görevleri arasında, trafik yüklerini taban üzerine iletilerek yayılmasını sağlamak, ince daneli yapıya sahip altyapıların temel tabakasına etki etmesini önlemek ayrıca su ve don tesirlerine karşı direnç sağlamak ve tampon bölge görevi oluşturmak gösterilebilir. Bu amaçlar doğrultusunda tesviye yüzeyi üzerine serilen tabakalara alt temel tabakası denilmektedir (Umar ve Ağar, 1985). Karayolu üst yapısına ait bir kesit Şekil 3.1.'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Üst yapı en kesiti

Üstyapıları, kaplama tabakasında kullanılan malzemelerin özelliklerine, türlerine ve yapım yöntemlerine göre rijit, yarı rijit ve esnek üstyapı olmak üzere üç ana grupta inceleyebiliriz.

3.2.1. Rijit Üstyapı

Rijit üstyapılar, taban zemini üzerine serilen granüler alt temelden ve/veya temel üzerin de oluşturulan koruma betonu ve onun üzerine de donatılı veya donatısız olarak, anolar halinde oluşturulmuş beton plakalardan oluşur. Yapılacak yoldaki ano ebatları, donatı miktarları ve plaka kalınlıkları yolun proje ömrü süresince yoldan geçecek trafik yoğunluğuna ve taban zemininin gösterecek olduğu mukavemete bağlıdır (Önal ve Kahramangil, 2013).

Beton, yol kaplaması olarak kullanıldığında; üzerine gelen trafik yüklerini tabana ileterek tabanın herhangi bir deformasyona uğramasını önlemektir. Bir beton kaplamanın davranışına bakılacak olursa, üretilen beton tabakalarının özelliklerinin yanında, kaplamanın altına serilen alt temel ve temel tabakaları ile mevcut olan taban zemininin özellikleri farklılık göstermektedir. Bu sebeple projelendirme sırasında, taban zemini, alt temel ve temel malzemeleri, betonu oluşturan kum, çakıl veya kırmataş, çimento ve betonarme demiri gibi kullanılan malzemelerin özelliklerinin iyi şekilde incelenmesi gerekmektedir. Beton yollar, enine ve boyuna derzlerle birbirinden ayrılmış olan yaklaşık 20-25 m²'lik bir alana sahip plakalar halinde bulunurlar. Bu plaka tabakasının rijitliğinin yüksek olması sebebiyle taban zemininde meydana gelen gerilmeler geniş bir alana yayılmaktadır (Fındık, 2005).

3.2.2. Esnek Üstyapı

Esnek üst yapılar taban zemini üzerine serilen granüler alt temel ve temel tabakalarının üzerine bitümlü kaplamaların serilmesi ile oluşurlar (Önal ve Kahramangil, 2013). Esnek üstyapının görevi, tesviye yüzeyiyle sıkı bir etkileşim içerisinde olan trafik yüklerini, alt temel, temel ve kaplama tabakaları aracılığı ile taban zeminine düzgün bir şekilde aktarmaktır. Esnek üstyapının adezyonu, stabilitesi, dane sürtünmesi ve kohezyonu gibi özellikleri kullanılan agreganın ve bitümlü bağlayıcının özelliklerine direkt olarak bağlıdır. Esnek bir üst yapının amaçları; trafik yüklerini alt yapı tabakasının taşıyabileceği değere indirmek, trafiğin aşındırma etkilerine karşı koymak, taşıtlar için düzgün bir yuvarlanma yüzeyi oluşturmak, alt yapıyı muhafaza etmek, yapıya gelen

yüzeysel su seviyesini ve temel tabakasına iletilmekte olan kayma gerilmelerini minimuma indirme olarak sıralanabilir (İlçalı, 2001).

Bir esnek üst yapıda bulunan; alt temel, temel ve kaplama tabakaları dayanımları, performansları, malzeme özellikleri, geçirimsizlikleri, yapım teknikleri ve yapım süreleri ile birbirinden çok farklıdır. Yolun kaplama kısmından aşağı doğru gidildikçe, tabakalarda kullanılan malzemelerin kalitesi ve mekanik özellikleri düşmektedir. Esnek üstyapıları meydana getiren tabakalar, taban zemini ve bu tabakalardan oluşan esnek yol üstyapısının başarısı, belirtilen tabakaların ve taban zemininin şartnamelerde belirtilen şekilde projelendirilip uygulanmasına bağlıdır (Tunç, 2007); (Umar ve Ağar, 1985).

Bir üstyapıda trafik yüklerine direkt maruz kalan kısım kaplama tabakasıdır. Trafik yükleriyle oluşan çekme ve basınç gerilmelerinin maksimum seviyede olması sebebiyle kaplama tabakası, üstyapının diğer tabakalarından daha yüksek bir elastisite modülüne sahip olması gerekmektedir. Bu tabakalar, binder ve aşınma tabakaları olmak üzere iki kısımdan meydana gelmektedir. Aşınma tabakası, çok kaliteli yapılması gereken, trafiğe karşı dayanımın yanı sıra su geçirimsizliğini sağlamak ve sürtünme oluşturmak gibi görevlere de sahip olan bir konfor tabakasıdır. Binder tabakası ise kaplama tabakası kalınlığının fazla olması durumlarında serilen tabakanın sıkıştırılmasında kolaylık sağlamak ve ekonomik tarafta kalmak için, aşınma tabakasındaki agrega boyutlarından daha iri boyutlardaki agregalardan yapılan tabakadır. Trafiği mümkün olduğunca emniyetli ve konforlu şekilde aktarabilmesi için kaplama tabakasının yeterli pürüzlülüğe ve üniform bir yuvarlanma yüzeyine sahip olması gerekmektedir. Ayrıca, taşıtların geçişi sırasında su sıçramasını ve yol yüzeyinde küçük havuzcukların oluşmasını engellemek amacıyla drenaj tesislerine de sahip olması gerekmektedir (Umar ve Ağar, 1991).

Trafik yüklerinin bu tabakalardan aktarılması ile taban zeminine geçmesi, zemin içerisindeki klasik yük dağılımına benzemektedir. Tekerlek yüklerine maruz kalan esnek üstyapıda deformasyonlar meydana gelir ve her tabaka, kendi üzerine gelen bu yükü bir alt tabakaya daha geniş bir alana yaymak koşulu ile iletmektedir. Bu şekilde, taban zeminine kadar aktarılan yük kısmen de olsa daha büyük bir alana yayılarak etkisini azaltmış olmaktadır. Esnek bir üstyapıda meydana gelen gerilmeler yolun en üst tabakasından alt tabakalara doğru inildikçe azaldığı için, böyle bir yapıda kullanılacak malzemelerin mekanik özelliklerinin de bu gerilme dağılımına uygun olması

gerekmektedir. Asfalt betonu ile inşa edilen bu tür kaplama tabakaları, trafiğin ve özellikle iklimin tahrip edici etkilerine direkt maruz kaldığından dolayı yüksek elastisite modülü ile kayma direncinin yanı sıra iyi bir geçirimsizlik özelliğine de sahip olması gerekmektedir. Bir esnek üstyapılar iyi bir şekilde projelendirilmediğinde, taban zemini veya yol üstyapısı kısımlarının bir tanesindeki yüksek basınç gerilmeleri ve rutubet değerindeki önemli değişimler malzemenin sınır gerilme değerini aşması ile üst yapıda birtakım bozulmalar meydana getirmektedir (Sezgin, 2003).

Esnek üstyapı tabakaları taban zemini, alt temel ve temel tabakası olmak üzere üç gruba ayrılmıştır.

3.2.2.1. Üstyapı Taban Zemini

Esnek bir üstyapı taban zemini üzerine inşa edilmektedir. Aynı zamanda altyapının sınırını oluşturan bu kısım yol güzergahında bulunan bir yerden kazılarak alınan ya da bir ocaktan alınarak uygun özellikteki malzeme ile inşa edilmektedir. Taban zemini, kompaksiyon deneyi sonuçlarına göre bulunan kuru birim hacim ağırlığını ve optimum su muhtevasını sağlayacak şekilde, bir mekanik enerji uygulanarak sıkıştırılmaktadır (Ahmedzade ve Yılmaz, 2007).

Esnek bir üstyapıdan beklenen davranış taban zemininin sahip olduğu taşıma gücü ile doğrudan ilgilidir, bundan dolayı taban zemininin üstyapıya istenilen desteği sağlayacak biçimde yapılması gerekmektedir. Taban zemininde, dolgu yapılacak olan kısımlarda zemin cinsi ve sıkıştırmayı yapacak araçların kapasitesine uygun bir şekilde seçilen kalınlıklarda serildikten sonra sıkıştırma işlemi yapılmalıdır. Bu işlem yarma kısımlarında ise tesviye yüzeyi altında kalan zemin kabartılıp optimum su muhtevasında maksimum yoğunluğa ulaşıncaya kadar devam etmektedir (Umar ve Açar, 1985); (Ahmedzade ve Yılmaz, 2007).

Dolgu altında kalan taban zemininin, dolguda kullanılan malzemenin ve yarmada kaplama altında kalan taban zemininin sıkıştırılması ile birtakım faydalar sağlanmaktadır. Bu faydalar; zeminin taşıma gücünün artması, zemin mukavemetinin artması, oturmaların azalması ve hacim değiştirme (don kabarması, şişme/büzülme) direncinin artması olarak sıralanabilir (Tunç, 2002).

3.2.2.2. Alt Temel Tabakası

Alt temel tabakası, taban zemini ile temel tabakası arasına yerleştirilen ve sıkıştırılan belirli bir granülometriye sahip malzeme ya da uygun bir bağlayıcı malzeme ile beraber stabilize edilen malzeme tabakasından oluşur. Alt temel tabakasının asıl görevi ise bitüm ile kaplı olan tabakaların yapımı için çalışma platformu oluşturabilmektir. Bu tabakada kullanılan malzeme kalitesi genel olarak temel tabakasında kullanılan malzeme kalitesine göre daha düşüktür. Kullanılan bu malzemeler granüler özelliktedir. Mümkün olduğu kadarıyla alt temel inşasında yerel malzemelere ve yol yapımı için kullanılmaya elverişli olan malzemelere (molozlar, cüruflar, inşaat atıkları gibi) yer verilmeye çalışılmalıdır (Umar ve Ağar, 1991).

Alt temel tabakası, kaplamadan gelen yükleri alttaki zemine dağıtmak, uygun drenajı sağlamak, aşınma ve deformasyon etkilerine karşı dayanım sağlamak, ince daneli yapıların temel tabakasına nüfuz etmelerini önlemek ve don etkilerinin önüne geçmek gibi görevleri üstlenir. Bu sebeple alt temel tabakalarının yüksek stabiliteye ve yüksek drenaj kabiliyetlerine sahip olması gerekmektedir. Alt temel tabakalarının bu görevleri yerine getirebilmesi için, kullanılan malzemelerin niteliklerinin bu görevlere uygun olması gerekmektedir. Ayrıca bu tabakaların, uygun drenaj için gerekli olan boşluklu granülometriye, yüksek CBR değerine ve içsel sürtünme açısına sahip olması gerekmektedir. Bu tabakalarda kullanılan malzemelerin, filler oranı düşük, kübik, açısız şekilli ve pürüzlü yüzeylere sahip olması gerekmektedir. Bunun yanında yassı ve ince uzun daneler içermeyen, dona karşı duyarlılığı düşük malzemelerden oluşturulması sağlanmalıdır. Alt temel ile temel tabakasının işlevleri açısından aralarında çok önemli bir fark yoktur. Daha düşük maliyetlerle daha kalın bir tabakanın yapımı alt temel tabakası ile temel tabakası arasındaki en önemli farkı oluşturmaktadır (Tunç, 2007).

Alt temel malzemesi, tesviyesi tamamlanmış taban zemini üzerine, sıkıştırılmış kalınlığı 20 cm'yi aşmayacak şekilde tabakalar halinde serilip sıkıştırılır. Ancak sıkıştırmayı yapacak makinelerinin performanslarının yüksek olması halinde tabaka kalınlığı 30 cm'ye kadar arttırılabilir. Alt temel tabaka kalınlığının fazla olması halinde birden fazla tabakalar halinde inşa edilmesi gerekir ve bu durumda tabaka kalınlıkları birbirine eşit alınmalıdır. Alt temel malzemesinin serildiği ve tesviye edildiği esnada malzemeye ilave edilecek olan su miktarı standart proktor deney metodu ile bulunan optimum su muhtevsından yüksek olmayacak ve bu değer altında %-2'den fazla sapma

göstermeyecektir. Modifiye Proktor ile bulunan su muhtevasında ise ± 2 'den fazla değişim olmayacaktır. Sıkıştırımda, 30 kg/cm^2 'den büyük statik çizgisel yüke sahip düz bandajlı vibrasyonlu silindirler ve lastik başına düşen yükü 3500 kg 'dan az olmayan lastik tekerlekli silindirler kullanılır (KTŞ, 2013).

Çizelge 3.1. Alt temel malzemesi gradasyon limitleri (KTŞ, 2013)

Elek Açıklığı		TİP-A	TİP-B
(mm)	(inç)	% Geçen	% Geçen
75	3	100	
50	2	-	100
37.5	1.1/2	85 - 100	80 - 100
25	1	-	60 - 90
19	3/4	70 - 100	45 - 80
9.5	3/8	45 - 80	30 - 70
4.75	No.4	30 - 75	25 - 55
2	No.10	-	15 - 40
0.425	No.40	10 - 25	10 - 20
0.075	No.200	0 - 12	0 - 12

KTŞ 2013'te yer alan alt temel tabakasında kullanılan malzeme, Çizelge 3.1.'de verilmiş olan gradasyon limitleri içerisinde ve iyi derecelendirilme değerlerine sahip olmalıdır. Alt temelin inşasında kullanılacak olan malzemenin diğer fiziksel özellikleri ise Çizelge 3.2.'de verilen limit değerleri arasında olmalıdır.

Çizelge 3.2. Alt temel malzemesi fiziksel özellikleri (KTŞ, 2013)

Deney Adı	Şartname Limitleri	Deney Standardı
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi MgSO ₄ ile kayıp, %	≤25	TS EN 1367-2
Parçalanma Direnci (Los Angeles), %	≤45	TS EN 1097-2
Yassılık İndeksi %	≤35	TS EN 933-3
Su Emme (Kaba ve İnce Agregada), %	≤3.5	TS EN 1097-6
Likit Limit, %	≤25	TS 1900-1 AASHTO T89
Plastisite İndeksi, %	≤6	TS 1900-1 AASHTO T90
Kil Topağı, Dağılabilen Tane Oranı, %	≤2	ASTM C-142
Organik Madde, (%3 NaOH ile)	Negatif	TS EN 1744-1
Metilen Mavisi, g/kg	≤5.5	TS EN 933-9

Şartnamelere uygun şekilde yapımı tamamlanan alt temel tabakası, üstyapıya ait yük taşıma kapasitesinin genel olarak esasını teşkil ettiği için üstyapıdaki deformasyonları ve oturmaları engelleyecektir. Alt temel tabakası, taban zemininin taşıma kapasitesini geçebilecek olan yüksek gerilmeleri düzgün bir şekilde yayarak taban zeminine gelecek olan zararları önlemektedir. Alt temel tabakası genelde dona duyarlı olan taban zeminlerinde, taban zemininde oluşan buz mercceklerinin üst tabakalara doğru ilerlemesi neticesinde oluşacak olan don kabarmasını engellemek için yapılmaktadır. Yol kaplamasında don kabarmasının meydana gelmesi durumunda, kaplama tamamen ayrışabilir (Fındık, 2005).

3.2.2.3. Temel Tabakası

Bir esnek üstyapıda temel tabakası, kaplama tabakasının hemen altına serilir. Bu tabaka daneli veya uygun bir bağlayıcı ile birleştirilmiş malzeme tabakasıdır. Temel tabakasının esas görevi kaplama tabakası için bir dayanak sağlamak ve üstyapının mevcut yük taşıma kapasitesini artırmaktır. Temel tabakası trafik yüklerinden meydana gelen yüksek kayma gerilmelerine karşı direnç gösterebilmeli, yüksek nem oranlarında dengede kalabilmeli ve drenaja yardımcı olarak don etkileri karşısında da bir koruma sağlamalıdır (Umar ve Ağar 1991).

Temel tabakası, alt temel üzerine belirli bir hesap ile bulunan kalınlıkta yapılan, belirli fiziksel özelliklerde olan bir malzeme ile oluşturulan, tabakadaki drenajı sağlamak

ve don etkisini minimuma indirmek gibi özelliklere sahip olan bir üstyapı tabakasıdır. Alt temel ve temelin başlıca görevi, yüzeyin maruz kaldığı yükleri kendi içerisinde eşit bir şekilde dağıtarak, tabanda meydana gelebilecek oturma ve kesme deformasyonlarının oluşmasını engellemektir (KTŞ, 2013).

Temel tabakasını meydana getiren ince ve kaba agrega ile ilgili özellikler,

Kaba agregalar

-Çakıl: Belirli bir şekli ve boyutu olmayan, su etkisi ile yuvarlanan ya da aşınmış halde bulunabilen doğal agregalara denilir.

-Teras çakılı: Doğal sebepler sonucunda oluşan, silt, kum ve kil ile karışık halde bulunan çakıldır. Çok düşük trafik hacminde ya da önem derecesi düşük olan yollarda fiziksel özelliklerinin şartnamede belirtilen değerlere aykırı olmaması şartı ile kırılmaksızın kullanılabilir (Çizelge 3.3.).

Çizelge 3.3. Kaba agregaların fiziksel özellikleri (KTŞ, 2013)

Deney Adı	Kriter	Deney Metodu
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi MgSO ₄ ile kayıp, %	≤20	TS EN 1367-2
Parçalanma Direnci (Los Angeles), %	≤35	TS EN 1097-2
Kil Topağı, Dağılabilen Tane Oranı, %	≤1.0	ASTM C-142
Yassılık İndeksi %	≤25	TS EN 933-3
Organik Madde, (%3 NaOH ile)	Negatif	TS EN 1744-1
Su Emme %	≤3.0	TS EN 1097-6

- Kırılmış çakıl: Kırılma işlemi sonucunda elde edilmesi planlanan en büyük tane boyutunun 1.5 katı boyutta olan çakılın kırılmasıyla elde edilen agregaya denilmektedir.

- Kırma taş: Bazalt, granit, kalker, dolomit, metamorfik kuvarsit ya da benzeri kayaların kırılması ile oluşan agregalara verilen addır.

- Kırılmış cüruf: Atmosfer şartlarında soğutulmuş olan yüksek fırın cürufunun kırılması sonucu oluşan agregadır. Bu agreganın AASHTO T-19 'a göre belirlenen gevşek birim ağırlığının 1100 kg/m³'den az olması istenmemektedir. Temel yapımı aşamasında kullanılacak malzemenin kaba agrega kısmında (2 mm elek üzerinde kalan malzeme) herhangi bir donmuş malzeme veya başka bir sebeple karışmış yabancı malzeme bulunmaması gerekmektedir (KTŞ, 2013).

Temel tabakası yapımı aşamasında kullanılacak malzemenin ince kısmı doğal kum ya da kırılmış çakıl, kırma kum, cüruf kumu veya bunlara benzer malzemeler ya da bu malzemelerin karıştırılmasından meydana gelmelidir.

İnce agregalar;

- Doğal kum: Göz açıklığı 0.075 mm ile 2.00 mm olan elek aralığında kalan ve taşların doğal nedenlerle ayrışmasından oluşan malzemedir.

- İnce çakıl: Elek göz açıklığı 2.00 mm ile 9.5 mm arasında kalan malzemeye ince çakıl denilmektedir.

- Taş tozu: Taş ocaklarında kırım esnasında meydana çıkan ince malzemedir.

- Cüruf kumu: Atmosfer koşullarında soğutulmuş yüksek fırın cürufunun elenmesi sonucu elde edilen malzemedir.

Temel tabakasının imalatında kullanılacak malzemenin ince kısmı için (2.00 mm elekten geçen), Çizelge 3.4.'de verilen limit uygunluklarını sağlamalıdır (KTŞ, 2013).

Çizelge 3.4. İnce agregaların fiziksel özellikleri (KTŞ, 2013)

Deney Adı	Kriter	Deney Metodu
Likit Limit, %	NP	TS 1900-1 AASHTO T89
Plastisite İndeksi, %	NP	TS 1900-1 AASHTO T90
Organik Madde, (%3 NaOH ile)	Negatif	TS EN 1744-1
Metilen Mavisini, g/kg	≤3.0	TS EN 933-9

Karayollarında temel tabakası,

-Granüler temel,

-Plent-miks temel ve

-Çimento bağlayıcılı granüler temel olmak üzere üç farklı temel çeşidi uygulanmaktadır. Bu üç çeşit temel tabakasının imalatında kullanılacak olan agregalar; kırmataş çakıl, çakıl, kırmataş, kum cüruf veya benzeri malzemelerden oluşmaktadır. Kullanılacak olan malzemenin bunlardan hangisinin olacağı veya karışım halinde bu karışımın hangi malzemelerden ne oranda olacağı hazırlanan proje karışım dizayn raporları ile belirlenmektedir (KTŞ, 2013).

Granüler Temel

Granüler temel tabakası çakıl, kırılmış çakıl, kırma taş, kırılmış cüruf ve ince malzeme kullanılarak Çizelge 3.5.'de verilen gradasyon limit değerleri içerisinde devamlı gradasyon verecek şekilde hazırlanmaktadır. Bu malzeme belirlenen optimum su muhtevsındaki su yardımı ile karıştırılıp ve şartnamelere uygun şekilde hazırlanmaktadır. Daha sonra bu malzeme taban veya alt temel tabakasının üstüne bir ya da birden fazla tabakalar halinde, uygulama projesinde belirtilen plan, profil ve enkesitlere uygun olacak şekilde serilip sıkıştırılmaktadır. Granüler temel malzemesinin ağırlıkça en az %50'si olacak şekilde 4.75 mm elek üzerinde kalan kısım için iki veya daha fazla yüzünün kırılmış olması gerekmektedir (KTŞ, 2013).

Çizelge 3.5. Granüler temel tabakasının gradasyon limitleri (KTŞ, 2013)

Elek Açıklığı		% Geçen		
(mm)	(inç)	A	B	C
50	2	100		
37.5	1.1/2	80 - 100	100	
25	1	60 - 90	70 - 100	100
19	3/4	45 - 80	60 - 92	75 - 100
9.5	3/8	30 - 70	40 - 75	50 - 85
4.75	No.4	25 - 55	30 - 60	35 - 65
2.00	No.10	15 - 40	20 - 45	25 - 50
0.425	No.40	8 - 20	10 - 25	12 - 30
0.075	Na.200	2 - 8	0 - 12	0 - 12

Plent-Miks Temel (PMT)

PMT tabakası kırılmış çakıl, kırma taş, kırılmış cüruf ve ince malzemelerin kullanılması ile beraber Çizelge 3.6.'da verilen gradasyon limit değerleri içerisinde kalacak ve devamlı gradasyon verecek şekilde ince ve kaba olmak üzere minimum üç ayrı dane boyutu grubunun, oranı belli olan su ile birlikte bir plentte karıştırılması ile hazırlanan malzemenin, yeterliliği bilinen alt temel tabakası üzerine bir veya birden fazla tabaka şeklinde serilmesi ve sıkıştırılması ile oluşturulan tabaka kısmıdır. PMT tabakasının imalatında kullanılacak olan malzemeler temel tabakasında kullanılacak kaba

ve ince agrega fiziksel özelliklerini sağlayan şartlarda ve Çizelge 3.6.'da belirtilen gradasyon limitlerinde olmalıdır (KTŞ, 2013).

Plentte hazırlanan temel tabakalarının yapımında uyulması gereken kurallar mevcuttur. Temel tabakalarının yapımına başlanırken bulunulan bölgedeki coğrafi koşullar dikkate alınmalıdır. Yapım süresi için genellikle mart ayı başı ile ekim ayının sonuna kadar olan zaman PMT imalatına uygun dönemdir. Bu süre miktarı mevsim şartlarına bağlı olarak kısaldı uzatılabilmektedir. Don, yağışlı ve karlı havalarda PMT serimi yapılması uygun değildir (KTŞ, 2013).

Çizelge 3.6. PMT tabakasının gradasyon limitleri (KTŞ, 2013).

Elek Açıklığı		% Geçen	
(mm)	(inç)	I	II
37.5	1.1/2	100	
25	1	72 - 100	100
19	3/4	60 - 92	80 - 100
9.5	3/8	40 - 75	50 - 82
4.75	No.4	30 - 60	35 - 65
2.00	No.10	20 - 45	23 - 50
0.425	No.40	8 - 25	12 - 30
0.075	Na.200	0 - 10	2 - 12

PMT imalatında havanın aşırı sıcak olduğu zamanlarda serilen malzemenin yüzeyinde bulunan suyun buharlaşması önlenmeli ve gerekli görüldüğünde yüzey sürekli nemlendirilmelidir. Serilen tabakalarda herhangi birinde bozulma olması durumunda bu kısım kısa bir sürede düzeltilerek bir üst tabakanın serilmesine elverişli hale getirilmesi gerekmektedir. PMT seriminin hemen ardından yolun trafiğe açılması gerektiği durumlarda temel yüzeyi astarlanmalıdır. Astar malzemesi TS 1083, MC-30, TS 1084, RT-1 veya RT-2, TS 1082 standartlarına uygun ve SS-1h, CSS-1 veya CSS-1h malzemelerinden herhangi birinin kullanılması ile yüzeye 0.5-2.5 litre/m² gelecek şekilde uygulanmaktadır. Plentte hazırlanmış olan temel tabakasının, üstyapı takviyesi olarak uygulanması düşünüldüğü durumlarda, özellikle alt geçitlerde ve köprü yaklaşımlarında yol üst kotunda meydana gelecek değişiklikler sebebiyle gabari daralmaları ve kot

farklılıklarının olmaması için gerekli düzenlemeler yapılmalı ve sonrasında PMT serimi yapılmalıdır (Yakşe, 2016).

Çimento Bağlayıcı Granüler Temel (ÇBGT)

ÇBGT tabakası kırılmış cüruf, kırılmış çakıl, çakıl, kırma tas ve ince malzeme kullanılmak şartı ile, Çizelge 3.7.'de verilen gradasyon limitleri içinde devamlı olarak gradasyon verecek şekilde hazırlanan malzemenin uygun miktarlarda su ve çimento ilavesi ile bir plentte karıştırılması sonucu hazırlanan ve yeterliliği bilinen bir alttemel tabakası üzerine, bir ya da birden fazla tabakalar şeklinde, projesinde belirtilen plan, profil, ve en kesitlere uygun olacak şekilde serilip sıkıştırılması ile oluşturulan tabakadır. ÇBGT tabakasının yapımında kullanılacak olan agreganın, temel malzemesi fiziksel şartlarını sağlaması gerekmektedir (KTŞ, 2013).

Çizelge 3.7. ÇBGT tabakasının gradasyonu (KTŞ, 2013)

Elek Açıklığı		% Geçen
(mm)	(inç)	
37.5	1.1/2	100
25	1	72 - 100
19	3/4	60 - 92
9.5	3/8	40 - 75
4.75	No.4	30 - 60
2.00	No.10	20 - 45
0.425	No.40	8 - 25
0.075	Na.200	0 - 10

ÇBGT malzemesinin nakli üzeri branda ile örtülü araçlarla ve en fazla 30 dakika içerisinde yapılmalıdır. Böylece karışım mevcut özelliğini kaybetmemiş olacak ve istenilen özelliklerde yerinde serimi gerçekleşecektir. Ayrıca karışım içerisinde kullanılacak olan çimentolar, TS-19, TS-20 ve TS-26 da belirtilen şartlara uygun olmalıdır. TS-24 standartına göre çimentonun teknik kontrolleri yapıldıktan sonra temel tabakası içerisine ilavesi yapılmalıdır. Karışım içerisinde kullanılacak su, alttemel malzemesi özelliklerinde belirtilen şartlara uygun olmalıdır. Eğer agrega içerisinde suda çözünen sülfat varsa bu sülfat miktarına bağlı olarak karışımda kullanılacak çimento cinsi değişebilmektedir (KTŞ, 2013).

Granülometrisi standarda uygun olmayan malzemeler elenip istenilen oranlarda karıştırılarak uygun granülometri değerlerine ulaşıldıktan sonra kullanılmalıdır. Serme işleminin homojen bir şekilde olması için düzgün kalınlıklarda ve miktarlarda serim işlemini sağlayabilecek ekipmanların kullanılması ile gerçekleşir. Serim işlemine malzemenin temin edildiği en uzak noktadan başlayarak malzeme alınan mevkiye doğru ilerler. Projede istenilen kalınlığın fazla olması durumunda, serim işleminin birden fazla tabakalar halinde yapılması gerektiğinde, tabaka kalınlıkları birbirine eşit alınmak koşuluyla ve her bir tabaka serimini takiben istenilen değerlerde sıkıştırma işlemi yapıldıktan sonra bir üst tabakanın serme işlemine geçilmektedir. Temel malzemesinin serilme işlemi esnasında en uygun su içeriği ayarlanmaktadır (Fındık, 2005).

ÇBGT de kullanılan malzemenin özelliğine ve tabaka kalınlığına uygun olmak şartı ile sıkıştırma tekniğinin belirlenmesi gerekmektedir. Sıkıştırma işlemi yolun en kesitine paralel olacak şekilde yapılır ve bu işlem kenarlardan başlamak şartı ile merkeze doğru ilerler. Sıkıştırma esnasında herhangi bir kesimde segregasyon oluşması halinde bu kısımlar kaldırılıp yerlerine uygun bir malzeme serilir ve sıkıştırma işlemine aynen devam edilir. Sıkıştırma işlemi sonucunda temel kalınlığının projede belirtilen değerlerin yaklaşık olarak %10'undan eksik veya fazla olması durumunda temel üzerinde gerekli düzeltmeler yapılır ve daha sonra tekrar sıkıştırma işlemine devam edilmelidir. Yapılan kontroller sırasında tabakanın standartlarda belirtilen oranlarda sıkışmadığı anlaşılırsa, yüzeyin tekrar nemlendirilmesi ve ilave sıkıştırma ile istenen yoğunluğa ulaşılması gerekmektedir (Fındık, 2005).

4. LİTERATÜR ÇALIŞMALARI

Atıkların değerlendirilmesi ve geri kazanımı ile alakalı olarak birçok çalışma yapılmasına karşılık, mermer ocaklarında oluşan atıklarının yol üst yapısı temel tabakasında değerlendirilmesiyle alakalı yapılmış çalışmalar çok az sayıdadır. Bu bölümde atık malzemelerin yol inşaatı yapımında değerlendirilmesi ve geri kazanılmış agregalar üzerinde yapılan çalışmaların özetleri verilmiştir.

Ural ve Yakşe (2016) yaptıkları deneysel çalışma ile mermer atıklarının yol temel malzemesi olarak değerlendirilmesini araştırmışlardır. Bu kapsamda hava tesirlerine ve donmaya karşı dayanıklılık deneyleri, Los Angeles deneyi, yassılık indeksi deneyi, NaOH ile yapılan organik madde tespiti deneyi, su emme deneyi, Atterberg kıvam limitleri deneyi ve metilen mavisi deneylerini 3 farklı bölgeden alınan numuneler üzerinde yapılmıştır. Sonuçta kullanılan mermer atıklarının alt temel/temel malzemesi fiziksel özelliklerini Türkiye standartları için sağladığı görülmüş ve yol temel malzemesi olarak kullanılabilceğini göstermiştir (Ural ve Yakşe, 2016).

Terzi ve Karaşahin (2003), düzgün bir geometrik şekil verilebilmesi amacı ile mermerlerin kesimi esnasında meydana gelen mermer toz atıklarının filler malzemesi olarak asfalt betonunda kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Bu çalışmada aynı granülometriye sahip olan mermer tozu ve taş tozu filler içeren numunelerin Marshall stabilite deneyi sonuçlarından yararlanılarak optimum bitüm yüzdesi belirlenmiştir. Belirlenen bu bitüm yüzdesinden faydalanılarak filler/bitüm oranına ve filler oranlarına bağlı kalınarak Marshall numuneleri hazırlanmıştır. Asfalt tester deney aleti kullanılarak bu numuneler üzerinde dinamik plastik deformasyon deneyi yapılmıştır. Deney sonucunda birim deformasyonlardaki değişimler saptanmıştır. Deformasyonlar ile filler/bitüm ve filler oranına göre optimum filler yüzdesi belirlenmiştir. Elde edilen bu deformasyon değerleri karşılaştırılmış ve içerisinde mermer atıklarının bulunduğu karışımlarda, öğütülmüş mermer parçalarıyla hazırlanan karışımlara göre birim deformasyonların alt ve üst sınırlar arasında olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, mermer tozunun yaygın olarak bulunduğu bölgelerde, kurutma ve taş tozu filler maliyetini geçmediği durumlarda asfalt betonu karışımlarında filler malzemesi olarak taş tozu yerine mermer tozunun kullanılabilceği sonucuna varılmıştır (Terzi ve Karaşahin, 2003).

Ahmed vd. (2010) mermer atıkları dâhil üç farklı atığın yol yapımında temel tabaka ve alt temelde kullanım imkânları üzerine bir araştırma gerçekleştirmişlerdir.

Çalışmada öğütülmüş olarak fosfat, mermer ve granit agregalar ele alınmıştır. Her bir numune 100 kg ağırlığında ve maksimum nominal çap 100 mm olacak şekilde temin edilmiştir. Her bir numune için 60 kg'lık kısım deneysel çalışmaya ait gereklilikler çerçevesinde 20 mm maksimum nominal çapa öğütülmüştür. Farklı büyüklükte olan agregalar 5 mm, 10 mm, ve 20 mm'lik eleklerden geçirilerek derecelendirilmiştir. Ele alınan yapıların fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerini tespit etmek üzere deneysel testler gerçekleştirilmiştir. Modifiye proktor testinin ve CBR testlerinin atık malzemenin uygunluğunu belirlemede en önemli iki test olduğu belirtilmiştir. Deneysel sonuçlar çalışmada ele alınan her üç atık malzemenin de lokal düşük hacimli yol yapımında agrega yerine güvenle kullanılabileceğini göstermiştir. Yapılan değerlendirmede fosfat ve mermer atıklarının yüksek CBR değerleri nedeniyle temel altındaki nitelikli malzeme yerine güvenle kullanılabilmesi ve düşük CBR değeri (%41) nedeniyle granit atıkların sulanarak sıkıştırılmış yollarda kullanılabilmesi belirtilmiştir. Çalışmada son olarak söz konusu atıkların uygun kullanımının yararlı olacağı ve böylece doğal kaynakların korunacağı ve çevre kirliliğinin azalacağı ifade edilmiştir (Ahmed vd., 2010).

Çetin (1997), yapmış olduğu çalışmada plastik (polietilen), otomobil lastiği, petrollü sondaj atığı, kül ve mermer tozu gibi endüstriyel atık maddelerin asfalt betonu karışımları üzerindeki etkilerini araştırmıştır. Çalışmada kullanılmış olan agrega ve asfalt çimentosu Türk Standartlarına uygun olarak seçilmiştir. Lastik parçaları, taşıt lastiklerinin dilimlenmesi sonucu elde edilmiştir. Lastik ve plastik parçaların miktarı %5, %10, ve %20 olarak seçilmiştir. Karışımlarda kullanılan kül, lastik tozları, mermer tozu, petrollü sondaj atığı, çimento ve kireç agrega filler malzemesi ile yer değiştirilmiştir. Karışımdaki filler malzemesinin miktarı agreganın %5'i olarak seçilmiştir. Çalışmada kömürle çalışan enerji santralinden elde edilen kül kullanılmıştır. Petrollü sondaj atığı petrol kuyularında elde edilmiştir. İçerisine lastik ve plastik ilave edilen asfalt beton kaplama karışımları ile lastik tozu, kül, mermer tozu, kireç, çimento ve petrollü sondaj atığı gibi malzemelerin filler olarak ilave edildiği asfalt beton karışımlarında serbest basınç deneyi, Marshall stabilite deneyi, akma deneyi ve su hasarı deneyleri yapılmıştır. Lastik parçalarının miktarı ve dane çapı artarken, hacim özgül ağırlık ve Marshall stabilite değerleri ise azalmıştır. Lastik parçalarını ilave edilmesi ile oluşan asfalt beton karışımlarının akma değerleri ve boşluk oranı ise artmıştır. 4 ve 200 nolu eleklerin arasında kalan lastik parçalarının %10 oranında ilave edildiği asfalt beton karışımlarından

en iyi indirekt çekme değerleri elde edilmiştir. Plastik ilavesi yapılan asfalt beton kaplama karışımlarında indirekt çekme mukavemeti ve Marshall stabilite değerlerinde önemli ölçüde artışlar gözlemlenmiştir. Filler malzemesi olarak külün kullanılması asfalt beton karışımlarının indirekt çekme mukavemeti, serbest basınç ve Marshall stabilite değerlerini etkilemediği gözlemlenmiştir. Bir diğer beton asfalt karışımında kullanılan petrol ihtiva eden sondaj çamuru indirekt çekme mukavemetini (konvansiyonel asfalt karışımlarının yaklaşık %25'i oranında) azaltmıştır. Yapılan bu çalışma sonucunda indirekt çekme gerilmesi, serbest basınç gerilmesi ve Marshall stabilitesi deneylerine bakılarak, filler olarak kullanılan bu malzemeler arasında en iyi sonuca kireç ilavesi ile birlikte yapılan karışımda gözlemlenmiştir. Plastik ve lastik ilavesi ile elde edilmiş olan asfalt betonu kaplama karışımlarının elastik ve tokluk kabiliyetlerinin iyileştiği ve çatlamların kısmen azaldığı anlaşılmıştır (Çetin, 1997).

Fırat vd. (2012) yol alt temelinde potansiyel bir alternatif dolgu malzemesi olarak mermer tozu dahil üç farklı atığın agrega yerine kullanımına yönelik bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. İki farklı agrega için %0, %5, %10, %15 ve %20 oranlarında atık malzeme kullanımı ele alınmıştır. Numune Bozüyük-Mekece yolunun inşası sırasında alandan alınmıştır. Mermer tozu Bilecik'te yer alan bir mermer işleme santralinden elde edilmiş ve kimyasal analizleri yapılmıştır. Çalışmada kullanılan diğer bir atık olan uçucu kül Çayırhan termal santralinden temin edilmiş ve kimyasal analizi gerçekleştirilmiştir. Kimyasal analiz sonuçlarına bağlı olarak uçucu kül ASTM C 618 (2005) standardına göre C tipi olarak sınıflandırılmıştır. Üçüncü atık olan malzeme Bilecik Camişi santralinin atık alanından elde edilmiş ve kimyasal analizi yapılmıştır. Daha sonra numuneler üzerinde XRD analizleri gerçekleştirilmiştir. SEM aracılığı ile ham halde ve karışım halde materyallerin morfolojileri incelenmiştir. Malzeme 4 nolu bir elekten geçirilerek kullanıma hazır hale getirilmiştir. Karışımda kullanılacak malzeme ve atıklar bir fırında $110\pm 5^{\circ}\text{C}$ sıcaklıkta en az 1 gün kurutulmuştur. Numunelerin optimum nem oranları ve maksimum kuru yoğunlukları TS 1900-1 (2006) standardında yer alan prosedüre uygun olarak gerçekleştirilen sıkılaştırma testleri ile belirlenmiş ve tüm test numuneleri bu optimum nem içeriğine göre hazırlanmıştır. Numune iki farklı malzeme ve ele alınan atıklar için 36 farklı karışım (%5-%20 arası atık) hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde standart sıkılaştırma, geçirgenlik, CBR testleri, X ışınları kırılımı ve elektron mikroskobu analizleri gerçekleştirilmiştir. Termal güç santrallerinden uçucu kül, mermer kesim

endüstrisinden mermer tozu, kireçtaşı öğütme santrallerinden atık malzemenin önemli çevre problemlerine neden olduğu ve bunların yol alt tabaka stabilizasyonu için kullanılabilmesi belirtilmiştir. Elde edilen sonuçlar katkı oranı arttıkça geçirgenlik katsayısının da arttığını göstermektedir. Sonuçlar, ayrıca doymuş CBR değerlerinde %250'ye varan artışlar olduğunu göstermektedir. Doymamış CBR'de %15 atığa kadar bir artış daha sonra azalma gözlemlenmiştir. Ayrıca mermerin yol alt temelinde uygun bir katkı maddesi olduğu ve optimum oranın %15 olduğu belirlenmiştir. Son olarak yapılan değerlendirmede uçucu kül, mermer tozu ve atık malzemenin yol alt temel dolgu malzemesi olarak ve stabilizasyon amaçlı kullanılabilmesi ifade edilmiştir (Fırat vd., 2012).

Mostafa (2016) mermer ve mermer tozu da dâhil bazı atıkların farklı yol katmanlarında kullanımını değerlendirmek üzere bir deneysel çalışma gerçekleştirmiştir. İlk aşamada agreganın asfalt tabaka karışımında kullanımını değerlendirilmiştir. Daha sonra mermer ve bazı diğer atıkların alt temelde ve temel tabakasında kullanımını değerlendirilmiştir. Bu aşamaya ait sonuçlar mermer dâhil ele alınan atıkların hem alt temelde hem de temel tabakasında kullanılabilmesini göstermiştir. Bu durumda ayrıca toplam maliyette %12.5 ile %53.5 arasında tasarruf mümkün olmuştur. Son aşama da asfalt karışımında kireç tozu yerine mermer tozunun kullanımını değerlendirilmiştir. Bu aşamaya ait sonuçlar mermer tozunun karışım stabilitesini 1680 lb den 1927 lb ye arttırdığını göstermiştir. Sonuçlar ayrıca temelde ve alt temelde öğütülmüş beton ve öğütülmüş taş karışımının kullanımının CBR'de düşüşe ve optimum nem oranında artışa neden olduğunu göstermektedir. Ayrıca temel ve alt temelde öğütülmüş beton ve öğütülmüş taş kullanımının CBR'de düşüşe optimum nem içeriğinde artışa neden olduğunu tespit edilmiştir. Öğütülmüş beton oranını %50'nin üzerinde arttırmanın temel tabakayı tanımlanan CBR değerinden uzaklaştırdığı gözlemlenmiştir. Sonuçlar ayrıca %75 alçıtışı agregası ve %25 geri dönüştürülmüş beton karışımını ile %25 alçıtışı agregası ve %75 geri dönüştürülmüş beton karışımına ait Los Angeles test sonuçlarının aynı olduğunu göstermektedir. CBR testinde sonuçların %75 alçıtışı agregası ve %25 geri dönüştürülmüş beton karışımını için %25 alçıtışı agregası ve %75 geri dönüştürülmüş beton karışımına kıyasla daha düşük olduğunu göstermiştir. Çalışmada gerçekleştirilen ekonomik analiz geri dönüşümlü malzeme (öğütülmüş beton) kullanımının ve temel ve alt temel tabaka ile karışımının kullanılmasının sadece öğütülmüş taş kullanımına göre

daha ekonomik olduğunu ve doğadaki atık malzeme miktarının düşüşüne yardımcı olduğu göstermiştir. Maliyetin böylece %12.5'den %53.8'e kadar düşürülebileceği tespit edilmiştir. Son olarak yapılan değerlendirmede mermer tozunun asfalt kaplama karışımında alçıtaşı tozu yerine kullanılabilmesi ifade edilmiştir (Mostafa, 2016).

Amerika 'da her yıl yaklaşık olarak 240 milyon adet araba lastiği ve 45 milyon kadar da kamyon lastiği birikmekte olup, stok edilen lastik sayısı 188 milyon civarındadır. Çevre Koruma Ajansı (EPA)'nın oluşturmuş olduğu stok alanları bu yüksek miktarlardaki atık talebini karşılayamamaktadır. Atık stoğunun önlenmesi için alternatif yöntemler araştırılmış ve bu araştırmalar sonucunda araba lastiklerinin yol dolgularında, dalgakıranlar, istinad duvarları, kaplama tabakası alt malzemesi olarak ve çarpma bariyerlerinde hafif agrega olarak ve sıcak karışım asfalt kaplamalarda ise modifiye malzeme olarak kullanılabilmesi belirtilmiştir. Avrupa geneline bakılacak olursa katı atıkların %5- %9'u plastik atıklardan oluşmaktadır. Kullanım sonrasında oluşan plastik atıklar, tüm plastik atıkların %92 'sini oluşturmaktadır. Bu kullanım sonrasında oluşan atıkların %8 'i geri dönüşümde kullanılırken %17 'si ise kontrollü bir şekilde yakılarak imha edilmektedir. Kömürle çalışan termik santrallerde, kömürün yanması sonucunda atık malzeme olarak meydana gelen kül, tuğla ve çimento imali ile birlikte zemin stabilizasyonu gibi birçok alanda kullanılabilir. Amerika'da termik santrallerden yılda yaklaşık olarak 82 milyon ton, Kanada'da ise 4 milyon tonun üzerinde kül ortaya çıkmaktadır. Ülkemizde son yıllarda petrol arama çalışmaları hız kazanmıştır. Bu çalışmalar sırasında ortaya çıkan petrolü sondaj atıkları da çevre kirliliğine sebep olmaktadır. Oluşan bu atık malzemenin yerinde stabilize edilmesi ve yol inşaatında stabilize malzeme olarak kullanılması için çalışmalar yapılmaktadır (Tuncan, vd. 1998).

Misra vd. (2010) mermer tozunun yol yapımında kullanımı üzerine bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla bir inşa sahasından toplanan atık numunesi testler için hazırlanmıştır. Numuneler için dane boyutu analizi gerçekleştirilmiştir. Boyut analizi sonuçları temin edilen malzemenin kaba daneli olduğunu göstermiştir. Numune üzerinde ayrıca likit limit testi ve plastik limit testi gerçekleştirilmiştir. Daha sonra numune agrega ile mermer tozu 5'e 1 oranında homojen bir karışım elde edilinceye kadar karıştırılmış, sıkılaştırma işlemine tabi tutulmuş ve bu karışım ile hazırlanan temel için sürüş kalitesi, çökme ve nem ölçümleri gibi farklı ölçümler gerçekleştirilmiştir. Sürüş kalitesinin dolgu yüzeyinin pürüzlülüğüne direkt bağlı olduğu belirtilmiştir. Çökme miktarının zamana

bağlı olarak bir miktar değişiklik sergilediği gözlemlenmiştir. Plastisite testi malzemenin düşük sıkıştırılabilirlik tabakasına sahip olduğunu göstermiştir. Agreganın mermer tozu ile %40' a kadar oranlarda karıştırılmasının plastisitede yalnızca düşük değişikliklere neden olduğu gözlemlenmiştir. Agreganın yük taşıma kapasitesinin %20'ye kadar mermer tozu ilavesi ile iyileştiği saptanmıştır. Sonuçlar ayrıca atıkların dolgu olarak kullanılabilmesinin yanında alt temelde agrega yerine %20-30 oranda kullanılabileceğini göstermiştir (Misra vd., 2010).

Drew vd. (2002) yapmış olduğu çalışmada, ülkelerdeki ekonominin gelişmesini devam ettirmesi ekonomik büyümenin önemli ölçülerde doğal agrega kullanım ihtiyacı doğuracağı yargısına değinmişlerdir. İnsan aktiviteleri genel olarak, doğal agrega kullanılarak inşa edilmiş olan disiplinler üzerine kuruludur. Günlük yaşantımızı kolaylaştırmak için inşa edilen birçok yapı da doğal agregalar kullanılmıştır. Ancak yaşantımızda büyük öneme sahip bu doğal agrega kaynaklarının kullanılması ile, yaşantımız için oluşturulan yararlar ile agreganın çıkarılmasının çevresel etkisi çok karşılaştırılmamıştır. Maden ocaklarının ve boş taş ocaklarının önemli negatif çevresel etkilere sebep oldukları bilinmektedir. Araştırmacılar bu çalışma çerçevesinde, insan merkezilik ve çevre merkezilik fikirlerine değinmişlerdir. Çevre merkeziliği fikrine göre düşünülürse, doğal dünyanın bir organizma olduğu varsayımıyla, nehirler bu organizmanın damarlarını oluşturmaktadırlar. Bunun yanında zemin ise diğer bir hayati organı temsil etmektedir. Dolayısıyla bu hayati öneme sahip bir yapıyı asfalt veya betonla örtmek doğru olmayacaktır. Madencilik yapılırken ortaya çıkan gürültü kirliliği ve maden ocakları çalışmaları sınırlandırılmalıdır. Günümüz koşullarında doğal agreganın üretilmesi sırasında, yer yüzeyinde oluşan kazı çukurları gibi çevresel problemler, taş ocağı ve maden işleri ile ortaya çıkan ağır taşıt trafiği toplumda oldukça zor ve sosyal problemlere sebep olmaktadır. Bu problemler, yaşam alanlarının üretim alanlarına dönüştürülmesi ile birlikte son yıllarda giderek artmıştır. Bu çevresel problemlerin çoğu, taş ocağı ve maden ocaklarında meydana gelen gürültü, patlama ve toz gelişen teknolojinin etkin bir şekilde kullanılmasıyla azalan bir eğilim göstermiştir. Ayrıca bu çalışmada yollarda, binalarda ve asfalt kaplamalarda geri dönüştürülmüş agreganın kullanılması ile gelecekte doğacak olan yeni doğal agrega talebinin azalacağı belirtilmiştir (Drew vd., 2002).

Gurbuz (2015) mermer tozunun donma-çözünme etkileri altındaki yol için killi malzemenin stabilizasyonu amacıyla kullanımının etkinliği üzerine bir araştırma gerçekleştirmiştir. Mermer tozu Afyon da bulunan mermer taşı işleme tesisinden temin edilmiştir. Mermer tozunun ve kilin mineralojik karakteristikleri X-ışını kırınımı sonuçlarına bağlı olarak belirlenmiştir. Kil hava ile kurutulmuş ve testler öncesi plastik konteynerlerde saklanmıştır. Testlere başlamadan doğal kil mermer tozu ile farklı yüzdelerde karıştırılmıştır. Karşılaştırma amacıyla iki farklı test gurubu hazırlanmıştır. Bir grup donma-çözünme çevrimlerine maruz bırakılırken diğeri bu çevrimlere maruz bırakılmamıştır. Çalışmada ele alınan malzemenin kuru ağırlığı başına toz oranları %2.5, %5, %10, %15, %20 ve %25 seçilmiştir. Kil için optimum su içeriğine karşılık gelen su miktarı karışıma eklenmiştir. Numuneleri sıkıştırmak için minyatür bir sıkıştırma aparatı kullanılmıştır. Sıkılaştırma işleminden sonra donma-erime çevrimi için numuneler 21°C sıcaklığa ve %95'ten fazla bağıl neme sahip bir odada 7 gün tutulmuş daha sonra da -23°C sabit sıcaklıktaki bir dondurucuda 24 saat bekletilmiştir. Son olarak numuneler tekrar 21°C sıcaklığa ve %95 bağıl neme sahip odada 24 saat bekletilmiştir. Bu proses 1 çevrim olarak ele alınmıştır. Bu çevrim 12 kez tekrarlanmıştır. Testlerden önce numuneler son olarak (110±5)°C sıcaklıkta bir oda da 12 saat bekletilmiştir. Donma-çözünme çevrimine maruz bırakılmayan ikinci grup numuneler de 21°C sıcaklığa ve %95'ten fazla bağıl neme sahip bir odada 7 gün tutulmuş ve sonrasında (110±5)°C sıcaklıkta bir oda da 12 saat bekletilmiştir. Söz konusu işlemler sonrasında numuneler için serbest basınç ve dayanım testleri gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, killi malzemede mermer tozunun %10'a ulaşmasıyla serbest basınç dayanımının pik noktaya ulaştığını göstermiştir. Bu arada karışımın plastisitesinde düşüş gözlemlenmiştir. Mermer tozu ile stabilize edilmiş malzemede donma-çözünme çevrimleri sonrası kütle kaybının %5 olduğu görülmüştür. Deneysel sonuçlar ayrıca numunelerin serbest basınç mukavemetinde 12 donma-çözünme çevrimine maruz durumda herhangi bir donma-çözünme çevrimine maruz kalmama durumuna göre %22 düşüş olduğunu göstermiştir. Ayrıca herhangi bir donma-çözünme çevrimine maruz kalmama durumuna göre bu çevrimlere maruz kalan numunelerin daha yüksek bir deformasyonda en yüksek dayanıma ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca 12 donma-çözünme çevrimi sonrasında kütle kaybının %5 civarında olduğunu göstermektedir. Aynı zamanda numunelerin sünekliğinin %10 toz oranına kadar artış daha sonra ise bir düşüş sergilediğini

görülmüştür. Çalışmada elde edilen sonuçlar kapsamında yapılan değerlendirmede donma-çözünme etkisi altında mermer tozunun otoyol yapımında alt temelde killi malzemenin stabilizasyonu amacıyla kullanılabileceği ifade edilmiştir (Gurbuz, 2015).

Hınıslioğlu ve Ağar (2003) yaptıkları çalışmada yüksek yoğunluklu polietilen (HDPE) içeren farklı plastik atıklarının asfalt betonu içerisinde polimer katkısı olarak kullanılabilirliğini incelemişlerdir. HDPE'nin etkisi bağlayıcı modifiye olarak etkisi, karışım ısıları, farklı karıştırma süreleri ve HDPE içeriklerinde Marshall stabilite, stabilite akma ve akma oranı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Sıcak karışım asfaltta bağlayıcı olarak kullanılan madde, HDPE ile sırasıyla %4, %6 ve %8 oranlarında karıştırılarak (optimum bitüm içeriğinde) ve AC 20 çimentosu ile 145, 155 ve 165 °C sıcaklıklarında 5, 15, 30 dk'lik karıştırma süreleri içerisinde hazırlanmıştır. HDPE ile modifiye edilmiş olan asfalt betonunda Marshall stabilite değeri ve deformasyon direncinde önemli miktarlarda artış gözlemlenmiştir. %4 oranında HDPE, 165 °C karıştırma sıcaklığı ve 30 dk. karıştırma süresi ile birlikte akma, Marshall stabilite, ve Marshall oranları için en uygun şartlar olarak saptanmıştır. Marshall oranlarında oluşan %50'lik artış kontrol karışımlarıyla karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucunda, HDPE ile modifiye edilen bitümlü bağlayıcı maddelerin, yüksek stabilitelerinden ve Marshall oranlarından dolayı kalıcı deformasyonlara karşı daha iyi bir dirence sahip olduğu ve bu şekilde plastik malzemelerin geri kazanımı sağlandığı takdirde, çevrenin korunmasına yarar sağladığı kanısına varılmıştır (Hınıslioğlu ve Ağar, 2003).

De Rezende ve De Carvalho (2003) yapmış oldukları çalışmada Pedreira Contagem Bölgesindeki taş ocakları atıklarının esnek yol üst yapılarının temel tabakaları için değerlendirilmesini araştırmışlardır. Oluşan atık malzemenin laboratuvar deney çalışmaları ile özellikleri tespit edilerek, kullanılabilir olup olmadığına yer verilmiştir. Araştırılan malzemenin uygulamadaki davranışını belirlemek için, 20 cm kalınlığında ve 80 m uzunluğunda temel tabakası oluşturularak bir deneme yolu yapılmıştır. Çalışma kapsamında CBR, Dinamik Koni Penetrasyon, Tabaka Yükleme, Kalem Basınç Ölçme, Benkelman Kirişi ve Düşen Ağırlık Ölçer deneyleri yapılmıştır. Yapılan bu deneylerin sonucunda performans indislerinin azaldığı kanısına varılmış ve 1998 yılında yapılan bu yolda etkili yapısal bir hasara rastlanmamıştır. Özellikle yağmurlu mevsimlerde malzeme içerisinde bulunan kusurlu malzeme miktarı artacağından yapısal bozulmalar oluşur. Yapılan bu çalışma sonucunda, Pedreira Contagem Bölgesindeki taş ocağı atıklarının

esnek kaplama temel tabakaları içinde potansiyel bir kullanıma sahip olduğu ve bu malzemenin düşük trafik hacimine sahip yollarda temel malzemesi olarak kullanılabileceği görülmüştür (De Rezende ve De Carvalho, 2003).

Chakraborty ve Nagar (2016) beton yapımında doğal agrega yerine kül, bakır cürufu ve mermer tozu karışımının kullanımını ve bu betonun düşük trafik hacimli yollarda rijit kaplama malzemesi olarak kullanımını deneysel olarak araştırmışlardır. Çalışmada rijit kaplama yapımında en çok kullanılan M-25 ve M-30 beton karışımları kullanılmıştır. Numunelerin 7. ve 28. günde sıkışma mukavemetleri ölçülmüştür. Çalışmada yer alan bakır cürufu Birla Copper işletmesinden temin edilmiştir. Uçucu kül Kota termal santralinden alınmıştır. Mermer tozu Makrana'dan temin edilmiştir. 10 mm ve 20 mm ölçekli kaba agregalar lokal bir öğütücü aracılığı ile üretilmiştir. İnce agregalar (nehir kumu) Banas nehrinden temin edilmiştir. Kullanılan çimento 43 derece Portland çimentosudur. Kimyasal katkı maddesi olarak ta Naftalin Formaldehid ve PCE karışımı kullanılmıştır. Arzu edilen derece kaba ve ince agregalar belirli oranlarda karıştırılarak elde edilmiştir. Karışım %36 20 mm'lik kaba agregadan, %24 10 mm'lik kaba agregadan ve %40 ince agregadan oluşturulmuştur. Bu karışım çimento ve su kullanılarak birleştirilmiştir. Daha sonra numuneler üzerinde bir kısım testler gerçekleştirilmiştir. Çökme testine ait sonuçlar çökme miktarında artan bakır cürufu oranı ile artış, artan uçucu kül + mermer tozu oranı ile de azalma olacağını göstermiştir. Sıkılaştırma test sonuçlarından mukavemette artan bakır cürufu oranı ile önce bir artış sonra azalma olacağı, artan uçucu kül + mermer tozu oranı ile de bir artış sonrasında hemen hemen sabit bir değere yakınsama gözlemlenmiştir. Eğilme mukavemeti test sonuçları dayanımda artan bakır cüruf oranı ile önce bir artış sonra bir azalma, artan uçucu kül + mermer tozu oranı ile de bir artış sonrasında hemen hemen sabit bir değere yakınsama olacağını göstermektedir. Sonuçlara dayalı olarak yapılan değerlendirmede önerilen karışımın düşük trafik hacmine sahip yollarda kullanılabileceği belirtilmiştir (Chakraborty ve Nagar, 2016).

Nejad vd. (2013) mermer agregasının sıcak asfaltta kullanımına yönelik bir araştırma gerçekleştirmişlerdir. Bu amaçla işlem görmemiş ve geri dönüşümlü agregalar kullanılmıştır. Yerel işletmelerden elde edilen agregalar 19mm den daha küçük boyutlarda olacak şekilde öğütülmüş ve kimyasal analizleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra numuneler üzerinde esneklik modülü testi, indirekt çekme yorulma testi, dinamik

sürtünme testi gibi bir kısım test gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar asfalt kaplamada geri dönüştürülmüş mermer agregası kullanımının optimum bağlayıcı içeriğini arttıracaklarını göstermiştir. Bu duruma agreganın gözenekli yapısının ve artmış bağlayıcı absorpsiyonunun neden olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca esneklik modülünün mermer agrega miktarından daha çok sıcaklığa bağlı olduğu görülmüştür. Geri dönüşümlü mermer agregasının yorulma zamanının işlem görmemiş mermere göre daha kısa olduğu belirlenmiştir. Çalışmada orta bir trafik yoğunluğunda %60'a kadar geri dönüşümlü mermer agrega kullanımının yoldaki kalıcı deformasyonunun düşük olduğu saptanmıştır. İşlem görmemiş mermerin %60'ın ötesinde geri dönüşümlü mermer agrega ile değişiminin spesifikasyon kriterinde başarısızlığa neden olduğu belirlenmiştir. Geri dönüşümlü mermer agregalı karışımlar için buzlanma, kar ve diğer yağışlarda çökme mukavemeti özelliklerinde kabul edilebilir bir maksimum limit olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma sonunda, mermer içeren karışımın direnç modülü ve yorulma ömrünün bir miktar düştüğü görülmüştür. Bununla birlikte mermerde düşük SiO₂ yüzdesi nedeniyle çekme dayanımı artan mermer oranı ile artış göstermiştir. Yapılan değerlendirmede sonuçlara dayalı olarak karışımda bir miktar mermer kullanımının orta yoğunlukta trafiğe sahip yollarda kabul edilebilir olduğu belirtilmiştir (Nejad vd., 2013).

Zoorob ve Suparma (2000) yapmış oldukları bu çalışmada geri dönüştürülmüş plastik agrega ile yer değiştirerek sürekli derecelenmiş asfalt beton olarak adlandırılan '(AC)'nin laboratuvar dizaynını gerçekleştirmişlerdir. Araştırmacılar atık malzemelerin yeniden kullanılarak değerlendirilmesinin, atıkların yok edilmesi için iyi bir çevresel çözüm alternatifi olacağını söylemişlerdir. UK'da 1995 yılında plastik tüketimi yaklaşık olarak 3.302.000 ton olarak gerçekleşmiştir (Batı Avrupa ülkelerinde ise bu değer 24.350.000 ton civarındadır). Plastik en çok kullanıldığı sektör paket endüstrisidir. Bu sektörde tüketim oranı yaklaşık olarak %41'dir. Bunu takiben %20'si inşaat ve yapıda, geniş hacimli endüstride %15'i, elektrik ve elektronik endüstrisinde yaklaşık %9 kadarı, %7'si otomotiv sektöründe, %2'si ziraat sektöründe ve kalan %6'sı ise diğer sektörlerde kullanılmaktadır. Geri dönüştürülmüş atık plastik, genellikle düşük yoğunluklu polietilen denilen LDPE topaklarından meydana gelmektedir. Yoğun olarak derecelendirilmiş bitümlü karışımlarda aynı oranda 5-2,36 mm'lik değerlere sahip mineral agregayla yer değiştirilmiştir. Araştırmaların sonucunda, aynı hava içeriğine sahip olan ve sıkıştırılmış plastifalt karışımları geleneksel kontrol karışımlarından daha düşük hacim yoğunluğuna

sahip olduğu görülmüştür. Hacimce %30 oranında agrega LDPE ile sıkıştırılmış ve yer değiştirilmiş olan karışımın hacim yoğunluğunda yaklaşık olarak %16 bir azalma saptanmıştır. Yoğunluktaki görülen bu azalma, taşıma maliyetlerinde avantaj olarak değerlendirilmiştir. LDPE parçacıklarını agregayla yer değiştirdikten sonra oluşan yeni karışımın Marshall Stabilite değerinde %250'lik bir artış gözlemlenmiş ve Marshall katsayısı (deformasyon direnci) ise gelişmiştir. Bu mukavemet değerine ulaşmada, en etkili unsur sıkıştırma öncesinde doğru sıcaklığın seçilmiş olmasıdır. Karışımın esnek plastik içeriğinden dolayı sahip olduğu plastifalt karışımının akma değeri kontrol karışımından daha yüksek olduğu bilinmektedir. 60°C'de 1 saat yüklemeye sonra plastifalt karışımında oluşan geri dönüşümsüz deformasyon, kontrol karışımına nazaran daha düşük bulunmuştur. Plastifalt karışımında yapılan 1 saatlik yükleme sonucunda deformasyonun %14'ü geri dönmüş ve bu değer kontrol karışımında ise %0,6 olarak bulunmuştur. Numuneler sırasıyla 20°C, 40°C ve 60°C'de indirekt çekme deneylerine tabi tutulmuş ve sonuçlar dikkate alındığında özellikle 20°C'deki indirekt çekme elastisite modülü değerinin kontrol karışımında plastifalta nazaran daha yüksek değerde olduğunu göstermiştir. Fakat bu değer sıcaklığın yükselmesiyle, birbirine daha yakın hale gelmiştir. Buna ek olarak, plastifalt numunelerinde oluşan indirekt çekme değerlerinin kontrol karışımından daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu deney plastifalt karışımları kırılmadan önce daha yüksek çekme-şekil değiştirme dayanımını sergilediğini göstermiştir. Soyulma performansının su etkisiyle ölçülmesi amacıyla dayanarak, 60°C'de 24 saat süre ile suya bırakılan plastifalt numuneler, kontrol karışımlarına nispeten çok daha iyi performans göstermişlerdir. Sonuçlara bakıldığında suya bırakılmış olan plastifalt karışımların, suya bırakılmadan önce sahip olduğu stabilite değerini tam olarak (yani %100) koruduğu gözlemlenmiştir. Yapılan indirekt çekme deneyine ait yorulma verileri, yorulma kırılmasına neden olan yükleme sayısı ile beraber başlangıç çekme-şekil değiştirmesini göstermiştir. Plastifalt numuneler yorulma ömürleri boyunca yaklaşık olarak %50 gelişme sergilemişlerdir. Ayrıca LDPE geri dönüştürülmüş plastik ile oluşturulan plastifalt karışımların üretimi, mevcutta bulunan asfalt şantiyelerinin tekniklerinde hiçbir modifiye gerektirmemektedir. Bu çalışmada plastifalt karışımların geri kazanımlarının alternatifleri de araştırılmıştır. Sonuçta, geri kazanılmış olan karışımın mekanik özellikleri, kontrol karışımlarından daha iyi olduğu görülmüş ve orijinal plastifalta eşit olarak bulunmuştur (Zoorob ve Suparma, 2000).

Okagbue, ve Onyeobi'nın (1999) Nijerya Üniversitesinde yaptıkları çalışmada, yol yapımında kırmızı tropik zeminin mermer tozu ile stabilize edilebilme imkanını araştırmışlardır. Çalışma farklı üç kırmızı tropik toprağın doğal yapısını muhafaza edecek şekilde geoteknik özelliklerinin, değişik oranlarda mermer tozu ile birlikte karıştırılmış durumlarını içermektedir. Çalışma kapsamında CBR, spesifik gravite, standart sıkışma karakteristikleri, Atterberg limitleri, elek analizi ve basınç dayanımları gibi parametreler elde edilmiştir. 28 gün süre ile küre tabii tutulan numunelere dayanım testleri uygulandıktan sonra 24 saat süre ile sırasıyla 40, 60 ve 80 °C'de küre bırakılmış olan numunelere de uygulanmıştır. Elde edilen veriler mermer tozu katkısıyla kırmızı tropik toprağın geoteknik parametrelerinin pozitif yönde gelişme gösterdiği gözlemlenmiştir. Plastisite %20-33 oranları arasında azalmış, CBR ise %30'dan %46'ya yükselmiştir. %8 mermer tozu ilavesi sonucunda en yüksek mukavemet ve CBR değerine ulaşılmıştır. Sonuçlara bakıldığında, mermer tozu ilavesi yapılmış zeminlerde normal kürün 7. ve 10. günlerine ulaşıldığında dayanım %80'nin üzerine çıkmıştır. Yüksek dayanım değerine ise 60 °C'de 24 saat, hızlandırılmış kür sonucunda ulaşılmıştır. Kırmızı tropik toprağın geoteknik parametrelerindeki bu gelişmelere karşılık ulaşılan bu yüksek dayanım değeri, ağır trafik yükü altında kalan esnek kaplamaların temel tabakalarında kullanılması için uygun olmadığı fakat bununla yanında, geliştirilen malzemenin hafif trafik yüküne maruz kalan yollarda temel malzemesi olarak ve ağır trafik yükü altında kalan yollarda alt temel malzemesi olarak kullanılabilmesi sonuçlarına ulaşılmıştır (Okagbue ve Onyeobi,1999).

Yılmaz, vd.'nin 2003 yılında yaptıkları çalışmada Karadeniz Bölgesi İyidere-Çayeli yol hattı boyunca üstyapı malzemesi olarak, Seslidere taş ocağında üretimi gerçekleştirilen malzemenin kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmalar sonucunda taşocağı malzemesinin standartlarda belirtilen özelliklerde bir malzeme olduğu saptanmış ve hali hazırda kullanılmaya başlanmıştır. Yapılan deneylerle ilgili olarak ulaşılan sonuçlar şu şekildedir; Los Angeles aşınma kaybı %11.5, soyulma mukavemeti %55, kırılgenlik %85, hava tesirine karşı dayanıklılık (Na₂SO₄ donma kaybı) %1.95, cilalanma değeri %0,1, özgül ağırlık 2.8 gr/cm³, yassılık indeksi %16.5 ve absorpsiyon yüzdesi %1.05 olarak tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda, Seslidere taşocağından üretilen malzemelerin standartlara uygun iyi derecede üst yapı malzemesi olduğu anlaşılmıştır (Yılmaz vd., 2003).

Ilıcalı (1998) karayolu üstyapısı için Erdemir cüruf maddesinin kullanılabilirliğini araştırmıştır. Erdemir cürufunda bulunan kimyasal ve fiziksel özelliklere bakılarak bu malzemenin agrega olarak kullanılabilirliği araştırılıp incelenmiştir. Bir konkasörde kırılarak elenmek suretiyle elde edilen granüler cürufa filler olarak portland çimentosu ve bağlayıcı olarak asfalt çimentosu gibi ek malzemelerin ilave edilmesiyle alt temel ve temel tabakalarında göstermiş oldukları performanslar irdelenmiştir. Erdemir cürufunun kimyasal ve fiziksel özellikleri bakımından üstyapı tabakalarında kullanılacak olan agregalarda aranan şartlara uyduğu saptanmıştır. Kırılmış ve elenmiş olan hava soğutmalı cürufa belirli miktarlarda granüler cüruf katılması ile elde edilen ve bağlayıcısı olmayan karışımın mekanik direnci karayolu temel ve alt temel tabakalarında istenilen değerlerin üzerinde bulunmuştur. Belirlenen granülometriyi bozmayacak biçimde optimum oranda granüler cüruf ve eser miktarda bağlayıcı malzeme olarak çimento ve kireç katılarak oluşturulan karışımın mekanik direnci ise yüksek trafik hacmine sahip yolların temel tabakasında aranan mekanik şartları sağladığı görülmüştür. Filler olarak portland çimentosunun bağlayıcı madde olarak da asfalt çimentosunun ilavesiyle meydana getirilen bitümlü karışımın çok yüksek trafik yükü altında kalan yolların aşınma tabakasında kullanılabileceği belirlenmiştir. Cüruf ilavesiyle oluşturulan bitümlü karışımların su etkisini azaltması ve dona karşı mukavemetinin yüksek değerde olması yollarda bakım onarım masraflarını azaltabileceği söylenmiştir. Buna ek olarak ekonomik boyutu incelendiğinde ise fabrikalara belirli uzaklıktaki şantiyelerde, karayolu üstyapısında Erdemir cürufunun kullanımı ekonomik olarak da uygun görülmüştür (Ilıcalı M., 1998).

Deniz vd. 2005 yılında yaptıkları çalışmada kullanılmış olan otomobil lastiklerinin bitümlü sıcak karışımların performansı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Farklı oranlardaki lastik parçalarını (%1, %2, %5 ve %7) bitümlü sıcak karışıma ekleyerek, değişik sıcaklıklarda dolaylı çekme, statik sünme, tekrarlı sünme ve Marshall stabilite deneylerini yapmışlardır. Deneysel çalışmalar sonucunda otomobil lastiklerinin belirli oranlarda bitümlü karışımlara katılması ile birlikte soğuk iklim şartlarına maruz kalan bölgelerde kalıcı deformasyonlar karşısında olumlu etki yaptığı görülmüştür (Deniz, vd 2005).

5. MATERYAL VE YÖNTEM

5.1. Materyal

Mermer atıklarının yol yapımında değerlendirilebilmesi için yapılan bu çalışmada deney numunelerinin hazırlanması için agrega ve mermer atığı olmak üzere iki çeşit malzeme kullanılmıştır. Agrega Karayolları 14. Bölge Müdürlüğü tarafından onaylı olarak kullanılan yol temel malzemesi “(Bursa-İnegöl) Ayr.-Yenişehir (Bilecik-Osmaneli) Ayr. Yolu KM:25+000-314+50 ile Yenişehir Güney Geçişi KM: 0+000-7+419,06 Kesimlerin Yapım İşi” İncirli taş ocağından agrega (kireç taşı cinsi kırmataş) olarak temin edilmiştir. Malzeme Şekil 5.1.’de görüldüğü üzere bir konkasör yardımı ile kırılarak ocakta 0-5 mm, 5-12 mm, 12-19 mm ve 19-38 mm boyutlarında stoklanmıştır. Deneylerde kullanılacak malzeme stoktan uygun numune alma yöntemleri ile alınmış ve laboratuvar ortamına götürülmüştür.



Şekil 5.1. Agrega stok sahası

Mermer atığı olarak kullanılan malzeme ise Bilecik ili Yenipazar ilçesindeki bir mermer ocağı işletmesinden temin edilmiştir. Bilecik ili maden haritasından da görüldüğü üzere (Bkz. Şekil 2.4.) il içerisindeki mermer rezervleri Merkez ilçe, Gölpazarı ilçesi ve Yenipazar İlçelerinin oluşturduğu bir hat boyunca yoğunluk göstermektedir. Bu hat içerisindeki bölgeden mermer atıklarından numune alınarak (Şekil 5.2.a) yol üst yapısı temel malzemesi yerine ikame edilerek kullanılabilirliği konusunda KTŞ’de belirtilen deneyler yapılarak değerlendirme yapılmıştır.



Şekil 5.2. a: Mermer ocağından mermer atığı temini, b: Mini konkasör yardımı ile malzeme kırımı

Mermer ocağından çapları ortalama 75 mm ila 150 mm arasında değişen moloz olarak alınan mermer atıkları laboratuvar ortamında bir mini konkasör yardımı ile kırılarak 0-38 mm çapları aralığında numune elde edilmiştir (Şekil 5.2.b). Elde edilen bu numune uygun elek aralıklarında elenerek İncirli taş ocağından alınan agrega boyutlarında sınıflandırılmıştır.

Karayolları 14. Bölge Müdürlüğü Tarafından (Bursa-İnegöl) Ayrımı-Yenişehir (Bilecik-Osmaneli) Ayrım Yolu KM:25+000-314+50 ile Yenişehir Güney Geçişi KM: 0+000-7+419,06 Kesimlerin Yapım İşi'nde kullanılmak üzere deneyler sonucunda dizaynı yapılan TİP-1 PM temel tabakası karışım oranlarına (Çizelge 5.1.) göre ve Çizelge 5.2.'de verilen 5 değişik şekilde homojen karışımlar hazırlanmıştır.

Çizelge 5.1. TİP-1 PM temel tabakası karışım oranları

Elek Açıklıkları		0-5 (mm)	5-12 (mm)	12-19 (mm)	19-38 (mm)	Karışım	KTŞ 402. Kısım PMT TİP-1		Dizayn Tolerans Limitleri	
(İnch)	(mm)	%44	%16	%10	%30	%100				
1-1/2"	37,5				100	100	100		100	
1"	25,4				54	86	72	100	79	93
¾"	19		100	100	15	75	60	92	68	82
3/8"	9,5		82	1		57	40	75	50	64
No 4	4,75	100	6			45	30	60	38	52
No10	2,00	70	1			31	20	45	26	36
No 40	0,425	33				15	8	25	10	20
No 200	0,075	14				6	0	10	4	8

Çizelge 5.2. Oluşturulan karışım tipleri

Karışım No	0-5 mm	5-12 mm	12-19 mm	19-38 mm
Karışım-1	Agrega	Agrega	Agrega	Agrega
Karışım-2	Atık	Agrega	Agrega	Agrega
Karışım-3	Agrega	Atık	Agrega	Agrega
Karışım-4	Agrega	Agrega	Atık	Agrega
Karışım-5	Agrega	Agrega	Agrega	Atık

Çizelge 5.2.'de verilen Karışım-1'de karışım içerisine giren bütün malzemeler normal şartlarda yol inşaatlarında kullanılan ocaklardan temin edilen agregadan oluşmaktadır. Karışım-2'de ise 0-5 mm aralığındaki malzeme mermer atığı ve diğer aralıklar agregaya, Karışım-3'de 5-12 mm aralığı dışında kalan aralıklar agregaya, 5-12 mm aralığı ise mermer atığı, Karışım-4'de 12-19 mm aralığı mermer atığı ve diğer aralıklar agregaya. Son olarak Karışım-5'de ise 19-38 mm aralığı mermer atığı olacak şekilde hazırlanmıştır.

5.2. Yöntem

Esnek bir karayolu üstyapısının davranışı taban zeminin taşıma gücü ile doğrudan doğruya ilgilidir ve dolayısıyla taban zemininin üstyapı üzerinde istenen desteği sağlayacak biçimde hazırlanması gerekmektedir. Taban zemini üzerine oturan alt temel, temel ve bitümlü kaplama tabakalarından oluşan bir esnek yol üstyapısının başarısı, belirtilen

tabakaların ve taban zeminin şartnamelerde belirtilen şekilde projelendirilip uygulanmasına bağlıdır (Umar ve Ağar, 1991).

Bir yol inşaatında üstyapının oturacağı taban zemininin karakteristiklerinin bilinmesi, o yolun projelendirilebilmesi için gereklidir. Bu bölümde malzemelerin fiziksel özelliklerini belirlemek için kullanılan deney yöntemleri hakkında detaylı bilgi verilmektedir.

KTŞ granüler temel malzemesi TİP-1 PM temel gradasyonuna göre hazırlanan karışımlara elek analizi deneyi, parçalanma direncinin tayini (Los Angeles aşınma deneyi), kaba agregalarda $MgSO_4$ ile dona karşı dayanıklılık deneyi, özgül ağırlık ve su emme (absorbsiyon) deneyi, yassılık indeksi deneyi, NaOH ile organik madde tespit deneyini kapsamaktadır. İnce agregalarda ise likit limit, plastik limit, NaOH ile organik madde tespiti ve metilen mavisi deneyleri yapılmıştır. Ayrıca granülometrisi dizayn değerlerine göre ayarlanmış numuneler üzerinde modifiye proktor deneyi, CBR deneyi, donma-çözülme deneyi, X-ışınları difraktogram analizi (XRD), X-ışını floresans spektrometre (XRF) analizi, SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Bu sebeple İncirli taş ocağından agrega ve Yenipazar İlçesi Kuşça Köyü mevkiinde bulunan bir mermer ocağından da mermer atıkları alınmıştır. Bu malzemeler ile temel malzemesi gradasyonuna uygun bir şekilde numuneler hazırlanmış ve bu numuneler üzerinde KTŞ yol üst yapısı temel malzemesi için istenen kalite kontrol deneyleri yapılmıştır. Deneylerde kullanılan standartlar ve yapılan deney sayıları Çizelge 5.3.'te verilmiştir.

Çizelge 5.3. Deney sayıları ve kullanılan standartlar

Deneyin Adı	Yapılan Deney Sayısı	Faydalanılan Standart
Elek analizi	5	TS 1900-1
Parçalanma direncinin tayini (Los Angeles metodu)	2	TS EN 1097-2, AASHTO T 96
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi MgSO ₄	4	TS EN 1367-2
Özgül ağırlık ve su emme (absorbsiyon)	4	TS EN 1097-6
Yassılık indeksi	2	TS EN 933-3
NaOH ile organik madde tespiti	2	TS EN 1744-1
Kil Topağı	2	ASTM C-142
Likit limit	2	TS 1900-1
Plastik limit	2	TS 1900-1
Metilen mavisi	2	TS EN 933-9
Modifiye proktor	20	TS 1900-1
CBR	20	TS 1900-2
Donma-çözünme	30	ASTM D6035
XRD	2	
XRF	2	
SEM-EDS	2	
TOPLAM	103	

5.2.1. Elek Analizi

Temel tabakasının stabilitesi ve yoğunluğu üzerine etki eden en önemli özelliklerden birisi de agrega gradasyonudur. Dolayısıyla, farklı boyutlardaki agrega danelerinin karışımda hangi oranlarda bulunması gerektiği şartnamelerde alt ve üst limitlerle belirtilmiştir. Temel tabakasında kullanılacak malzeme özelliklerinin şartnamelerde verilen sınırlar içinde olup olmadığının araştırılması amacı ile elek analizi deneyi yapılmıştır. Agregalar konkasörlerde 0-5 mm, 5-12 mm, 12-19 mm ve 19-38 mm olmak üzere değişik boyut aralıklarında üretilir. Bu agrega gruplarından her birinde ayrı ayrı ve standartlarda belirtilen sayılarda elek analizi yapılmak ve belirli oranlarda karıştırılmak suretiyle nihai gradasyon elde edilmektedir.

Çalışmada iki farklı numune kullanılmıştır. Numunelerin ilki halihazırda bir devlet yolunda kullanılmakta olan agrega ocak malzemesi ve diğer malzeme de mermer atığının mini çeneli bir kırıcı yardımı ile elde edilen malzemedir. Her iki numunede 0-5

mm, 5-12 mm, 12-19 mm ve 19-38 mm boyutlarında ayrılarak belirlenen dizayn değerlerinde homojen karışımlar oluşturulmuştur.

Elek analizi deneyinde, numune $(110\pm 5)^{\circ}\text{C}$ ' deki standart etüvde 24 saat kurutulup elek serisinde elenmiştir. Elek serisi olarak; 1 1/2", 1", 3/4", 3/8", No.4, No.10, No.40 ve No.200 göz açıklıklarına sahip elekler kullanılmıştır (Şekil 5.4.). Eleme işlemi elek üzerindeki malzemeye sürekli olarak yatay ve düşey hareketler uygulanarak yapılmıştır. Eleme işleminin tamamlanmasından sonra elekler bir tel fırçayla temizlenerek her elek üzerinde kalan malzeme tartılır ve kalan miktarlar % olarak hesaplanır. % kalan miktar (5.1) nolu eşitlikten faydalanılarak hesaplanır. Yapılan bu çalışmalarda Amerikan Elek sistemi kullanılmıştır. Çizelge 5.4.'te bu elek sistemi verilmiştir.

$$\%Kalan = \frac{\text{Elekte Kalan}}{\text{Toplam Numune Miktarı}} \times 100 \quad (5.1)$$



Şekil 5.3. Elek analizi deneyinden bir görünüm

Çizelge 5.4. Amerikan elek sistemi

Amerikan Eleklere (ASTM)	
Elek No	Boyut
(11/2'')	37.5 mm
(1'')	25 mm
(3/4'')	19 mm
(1/2'')	12.5 mm
(3/8'')	9.5 mm
(No:4)	4.75 mm
(No:8)	2.38 mm
(No:10)	2.00 mm
(No:16)	1.19 mm
(No:20)	0,84 mm
(No:30)	0.59 mm
(No:40)	0.425 mm
(No:50)	0.297 mm
(No:80)	0.180 mm
(No:100)	0,149mm
(No:200)	0.075 mm

5.2.2. Parçalanma Direncinin Tayini Los Angeles Metodu

Bu deney mineral agreganın aşınma ve darbelenme etkileri sonucu standart gradasyonda meydana gelen bozulmanın belirlenmesi için yapılan bir deneydir. Los Angeles (aşınma) deneyi iki tarafı kapalı, kendi ekseni etrafında dönebilen, içi boş çelik tamburdan oluşan bir cihaz yardımı ile yapılmaktadır. Tambur içerisinde belirli ağırlıkta ve sayıda çelik bilyeler mevcuttur. Deney, 14 mm ve 10 mm elek arasında kalan agregalara uygulanır. Deneye girecek olan malzemenin kütlesi (5000±5) gr'dır. Bu malzeme yıkanarak (110±5)°C deki etüvde sabit ağırlığa ulaşınca kadar kurutulur ve tartılır (M₁). Cihaza ilk olarak 11 adet çelik bilyeler koyulur. Daha sonra sabit ağırlığa getirilmiş numune ilave edilir. Kapak kapatılır ve cihaz çalıştırılır. Cihaz 31 devir/dakika ile 33 devir/dakika arasında sabit bir hızda 500 devir döndürülür. 500 devirlik dönme işleminden sonra, tamburun kapak kısmı tepsinin tam ortasına gelecek şekilde açılır ve agregalar tepsiye dökülür. Daha sonra tambur temizliği yapılır, ince tanelerin raf etrafında kalmamasına dikkat edilir. Bilyeler tepside çıkarıldıktan sonra malzeme 1,6 mm'lik elek kullanılarak yıkanmak sureti ile ıslak eleme yapılır. 1,6 mm elek üzerinde kalan kısım

(110±5)°C'deki etüvde sabit ağırlığa ulaşıncaya kadar kurutulur ve tartılır (M₂). Burada, elek üzerinde kalan numune ağırlığının daha önceki numune ağırlığına oranı, % olarak agregada oluşan aşınmayı göstermektedir.

Beton ve karayolu imalatında kullanılan agregalar mekanik ve atmosferik etkilerden dolayı aşınma, parçalanma, kırılma ve ufalanmaya maruz kalmaktadırlar. Bu sebeple agregalar kullanım yerlerine göre belirli aralıklardaki sınır değerlerinde aşınmaya karşı dayanıklı olması istenmektedir.

Şekil 5.4.'te tipik bir Los Angeles Aşınma test cihazı, bir numunenin deneyden önceki ve deneyden sonraki halleri görülmektedir. Los Angeles katsayısı aşağıdaki (5.2) nolu eşitlikten hesaplanmaktadır.

$$LA (\%) = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (5.2)$$

KTŞ'ye göre yol kaplamalarında kullanılacak malzemelerde aşınma %35 değerinden küçük olmalıdır.



Şekil 5.4. a: Los Angeles aşınma cihazı, b: Deney öncesi numune, c: Deney sonrası numune, d: Deney sonrası yıkanmış numune

5.2.3. Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi

Agregalar dış ortam şartlarına maruz kaldıkları durumlarda boşlukları kısmen suya doygun hale gelerek sık sık donma-çözünme olayı etkisi altında kalmaktadırlar. Bu etki altında agreganın bünyesinde kılcal çatlaklar ve kırılmalar meydana gelir. Bu deneyde, agregaların hava etkisine maruz kaldıklarında donarak ufalanmaya karşı gösterdikleri direnç, laboratuvar ortamında kısa süre içerisinde karar verebilmek amacıyla yapılan hızlandırılmış bir deneydir. Bu deneyde doygun magnezyum sülfat ($MgSO_4$) ya da sodyum sülfat (Na_2SO_4) çözeltisi kullanılmaktadır (TS EN 1367-2).

İlk olarak Na_2SO_4 veya $MgSO_4$ çözeltisi hazırlanır. Çözeltinin hazırlanması için saf ve susuz Na_2SO_4 tuzu 25-30 °C sıcaklıktaki su içinde iyice karıştırılarak yavaş yavaş çözülür. Her litre su için en az 250 gr Na_2SO_4 tuzu veya en az 750 gr kristalize Na_2SO_4 tuzu katılır. Çözelti ayrıca, saf ve susuz $MgSO_4$ tuzu ve kristalize $MgSO_4$ tuzu ile de hazırlanabilir. Bu durumda her litre su için 350 gr susuz $MgSO_4$ tuzu veya 1400 gr kristalize $MgSO_4$ tuzu eklenir. Bu deney için Na_2SO_4 çözeltisi kullanılmıştır. Agregalar ise standartta belirtildiği üzere 19.00 mm, 12.50 mm, 4.75 mm ve 2,00 mm göz açıklıklı eleklerden elenmiştir. Her elek üzerinde kalan numuneler yıkanmış ve $(110\pm 5)^\circ C$ 'deki fırında kurutulmuştur. Kurutma işlemi sonrasında numuneler tekrar hassas olarak eleklerden elenmiştir. Eleklerin üzerinde kalan numuneler tartılarak ayrı kaplara alınmıştır.

Deney iki farklı malzeme (agrega ve mermer atığı) için yapılmıştır. Standartta belirtildiği gibi hazırlanan ve tartılan numuneler özel kaplar içerisine konulmuş ve üstü en az 20 mm kaplanacak şekilde sodyum sülfat çözeltisi kap içerisine boşaltılır ve $(17\pm 0,5)$ saat boyunca beklenir. Buharlaştırma ve kirlenme olayları ile karşılaşmamak için kapların kapağı kapatılmalıdır. $(17\pm 0,5)$ saat sonra çözelti içerisindeki malzeme başka bir yere alınır ve $(2\pm 0,25)$ saat suyu süzülür. Daha sonra $(110\pm 5)^\circ C$ 'lik etüvde (24 ± 1) saat kurutulur ve $(5\pm 0,25)$ saat laboratuvar sıcaklığına erişmesi için soğutulur. Çalışma periyodu (48 ± 2) saat süre ile 5 defa uygulanmıştır. İşlemler 5 defa tekrar edildikten sonra agrega soğutulmuştur, her bir kaptaki agrega $MgSO_4$ 'tan temizlenene kadar musluk suyuyla yıkanmıştır. Her kurutma safhasından sonra danelerde çatlama, dağılma, ufalanma, parçalanma ya da ayrılma olup olmadığı kontrol edilerek veriler kaydedilmiştir.

Na_2SO_4 çözeltisinden tamamen temizlenen numuneler tekrar $(110\pm 5)^\circ C$ 'lik fırında sabit ağırlığa ulaşınca kadar kurutulup ve daha sonra soğumaya bırakılmıştır.

Soğuma işlemi tamamlandıktan sonra malzeme eleklerden dane iriliklerine göre elenip, eleme sonucunda elekler üzerinde kalan miktarlar tartılmıştır. Eleklerden geçen kısımlar don kaybı olarak kabul edilmiş ve (5.3) nolu eşitlik yardımıyla hesaplanmıştır. Deney süreci Şekil 5.5.'de verilmiştir.

$$\text{Donma Kaybı Yüzdesi} = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 100 \quad (5.3)$$

M_1 : Deneyden önceki ağırlık(gr)

M_2 : Deneyden sonraki ağırlık (gr)



Şekil 5.5. a: Deney öncesi numune, b: Çözelti içerisindeki numune, c: 1.deney sonucu numune, d: 5.deney sonucu numune

5.2.4. Özgül Ağırlık ve Su Emme (Absorbsiyon) Deneyi

Bu deney agrega numunesinin özgül ağırlığını ve su emme (absorbsiyon) oranını belirleyebilmek için yapılan deney yöntemlerini kapsar (TS EN 1097-6). Özgül ağırlık, belirli bir hacim ve sıcaklıktaki malzemenin havadaki ağırlığının aynı hacim ve sıcaklıktaki damıtık suyun havadaki ağırlığına oranı olarak tanımlanır. Doymun kuru yüzey, agreganın yapısındaki boşlukların su ile dolu, yüzeyinin ise kuru olduğu durum olarak tanımlanır. Su emme deneyi, yüzey kuru suya doymun (YKSD) agreganın, kuru agregaya göre içerdiği su oranını tespit etmek için yapılmaktadır. Deneye tabi tutulacak malzeme miktarı Çizelge 5.5.'te verilmiştir.

Çizelge 5.5. Su emme deneyi numune miktarları (TS EN 1097-6)

En Büyük Tane Büyüklüğü (mm)	4	8	16	32	63
Deney Numunesi Miktarı (Kg)	0,8	1,5	2	3	3

Kaba agrega özgül ağırlığı ve su emme oranı belirlenirken deneyde kullanılan malzemenin karışım gradasyonunu temsil etmesine dikkat edilmiştir. TS EN 1097-6 standardına göre yapılan deneyde 4-37.5 mm elekleri arasında kalan malzeme kullanılmıştır. 4-37.5 mm elek arasında kalan malzemelerle hazırlanan numuneler ilk olarak yabancı maddelerden arındırmak için iyice temizlenir ve ardından tam doymun hale gelinceye kadar (en az 24 saat) suda bekletilir. Suyu doymun hale gelen numune ince daneleri kaybolmayacak şekilde süzülür ve geniş bir tavanın içerisine alınır. Tava içerisindeki numunelerin yüzeyleri kuru bir bez yardımı ile kurutularak YKSD hale getirilip tartılır ve kütlesi (M_2) olarak kaydedilir. Bu aşamadan sonra numune kafes örgülü bir tel sepete koyularak su dolu bir kovanın içine daldırılır. Sepet su yüzeyinden en az 5 cm aşağıda olmalıdır. Numune su yüzeyine çıkarılmadan kovanın içerisinde en az 10 defa serbestçe kaldırılıp indirilir. Sepet sağa sola sallanmak koşulu ile daneler arasında kalabilecek hava kabarcıklarının çıkması sağlanır. Numune dolu sepetin kovanın kenarlarına temas etmemesine dikkat edilir. Bu şekilde doymun malzemenin sudaki ağırlığı (M_3) olarak kaydedilir. Daha sonra numune sudan çıkartılır, süzülür ve etüv kurusu haline getirilir. Etüvden çıkarılan numune oda sıcaklığına ulaşınca kadar soğutulur ve tartılır (M_1) (Şekil 5.6.). Daha sonra aşağıdaki eşitlikler yardımı ile iri

agreganın kuru birim hacim ağırlığı (5.3), doymun yüzey kuru birim hacim ağırlığı (5.4), görünen birim hacim ağırlığı (5.5) ve su emme oranı (5.6) hesaplanır.

$$M_k = \frac{M_1}{M_2 - M_3} \quad (5.3)$$

$$M_d = \frac{M_2}{M_2 - M_3} \quad (5.4)$$

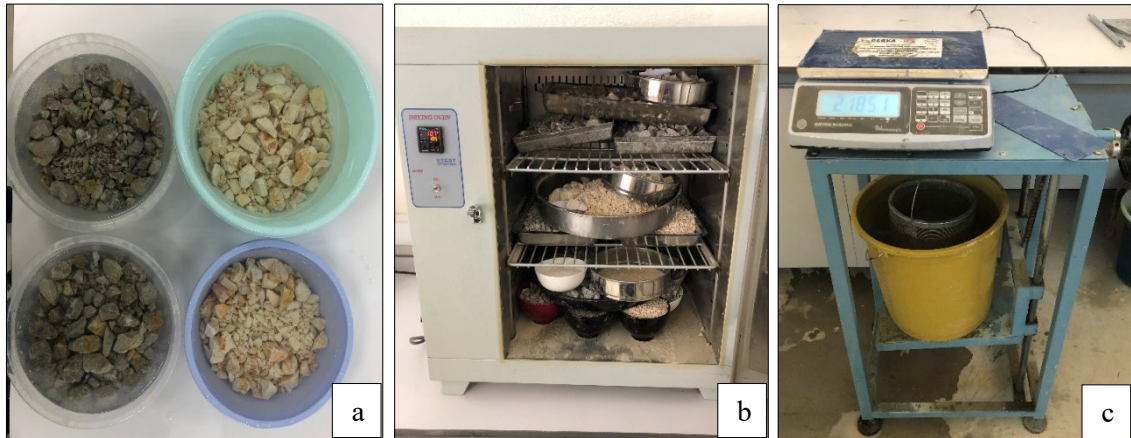
$$M_g = \frac{M_1}{M_1 - M_3} \quad (5.5)$$

$$M_s = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (5.6)$$

M_1 = Numunenin etöv kuru su ağırlığı, (gr)

M_2 = Numunenin doymun yüzey kuru durumdaki ağırlığı, (gr)

M_3 = Numunenin sudaki ağırlığı, (gr)



Şekil 5.6. a: Su emme deneyi, b: Numunenin etövde kurutulması, c: Özgöl ağırlık deneyi

Agregaların su emme kapasitesi sahip oldukları boşluk hacimlerinin oranı ile ilgilidir. Boşluklu bir yapıya sahip olan agregalarda beklenildiği üzere su emme oranı fazla olmaktadır. Dolayısıyla yüksek su emme oranına sahip agregaların dona karşı dayanımı düşük olacaktır. Dayanım düşüklüğü yaşanmaması için karayolu yapımında kullanılacak olan agregaların düşük su emme oranına sahip olması istenmektedir.

5.2.5. Yassılık İndeksi Deneyi

Yassılık indeksi deneyi TS EN 933-3 standardı kullanılarak agregalardaki yassı madde oranını belirlemek için yapılmıştır. Bu deney metodu kalınlığı nominal boyutunun %60'ından daha küçük boyuttan olan agrega danelerinin, yassı olarak sınıflandırılması esasına dayanmaktadır. İki elek arasında kalan danelerin nominal boyutu, bu iki elek açıklığının aritmetik ortalaması kadardır. Yassılık indeksi, yassı danelerin dışındaki malzemenin ağırlığının deneye alınan toplam malzeme ağırlığına göre yüzdesi olarak ifade edilmektedir. Deneye 6.3 mm'den büyük ve 63 mm'den küçük malzemeler girmektedir. Deneye girecek olan malzeme miktarları Çizelge 5.6.'da verilmiştir.

Çizelge 5.6. Yassılık indeksi deneyi gerekli malzeme miktarları (TS-EN 933-3)

Elek Açıklığı (mm)	Deneye Alınacak Minimum Malzeme Miktarı (kg)
63 - 50	25
50 - 37,5	18
37,5 - 25	8
25 - 19	2.5
19 - 12.5	1
12.5 - 9.5	0.5
9.5 - 6.3	0.250



Şekil 5.7. Yassılık indeksi deneyi

Standartta verilen elek aralıklarına göre numuneler ayrılmıştır. Her elek üzerinde kalan malzeme ilk olarak yıkanmış ve etüve kurutulmuştur. Daha sonra bu numuneler ayrı ayrı tartılmıştır (M_1). Numuneler bulunduğu elek aralığına göre silindirik çubuklu

eleklerden elenmiştir (Şekil 5.7.). Eleklerden geçen malzemelerin ağırlıkları ayrı ayrı tartılmış ve deney föyüne yazılmıştır (M_2). Deney sonunda yassı danelerin oranının %25'i geçmesi istenmemektedir. Yassılık indeksi (5.7) nolu eşitlik yardımı ile hesaplanır.

$$\text{Yassı İndeksi (\%)} = \frac{M_2}{M_1} \times 100 \quad (5.7)$$

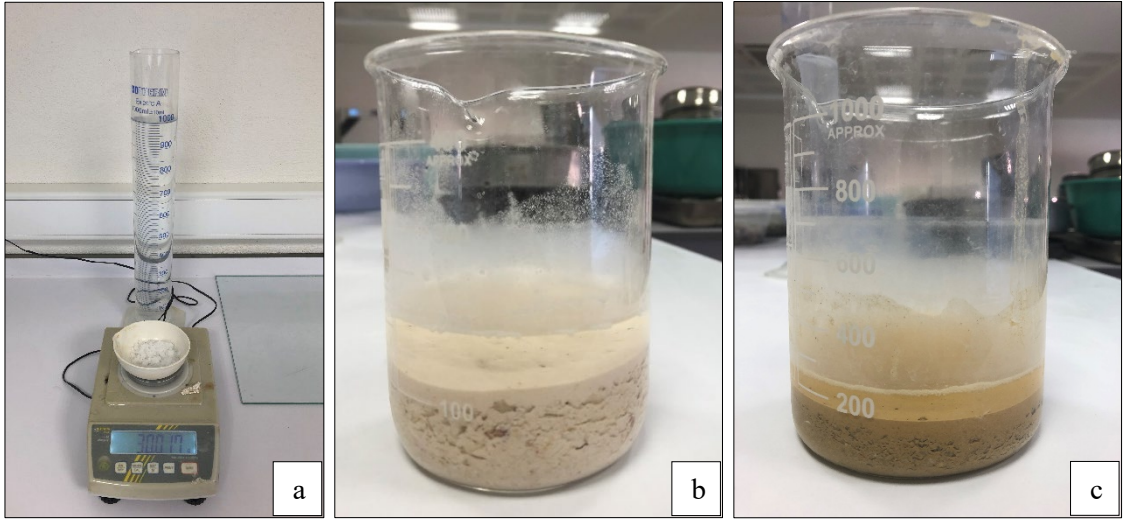
M_1 =Deneye alınan malzeme ağırlığı, (gr)

M_2 =Deneyde bulunan yassı malzeme ağırlığıdır, (gr)

5.2.6. NaOH İle Organik Madde Tespiti Deneyi

Agrega içerisinde mevcut olan hayvansal ve bitkisel atıkların çürümesi sonucunda oluşan maddeler organik madde olarak tanımlanmaktadır. TS EN 1744-1 standardına göre yapılan bu deneyde kullanılan malzeme içerisinde organik madde bulunup bulunmadığı belirlenmiştir. Deney nicel bir sonuç vermeyip karar gözlem ile verilmektedir. Bu deney için 1000 mL su içerisine 30 gr NaOH eklenerek çözelti hazırlanmıştır. Çözelti içerisinde NaOH danelerinin tamamen erimiş olmasına dikkat edilmelidir. Bu şekilde elde edilen %3 NaOH içeriğindeki çözelti hazır bekletilirken, numune (55 ± 5)°C'lik etüvde kurutulmuştur. Daha sonra etüvden çıkarılan malzemeler 4 mm elekten elenir. Elekten geçen malzemedan bir beher içerisine 130 mL çizgisine kadar koyulur. Daha sonra agrega üzerine %3 lük NaOH çözeltisinden 200 mL yüksekliğine kadar ilave edilir. Beherin kapağı kapatıldıktan sonra hava kabarcıklarının tamamen çıkması için tüp 1 dakika süre ile güçlü bir şekilde çalkalanır. Bu işlemden sonra beher 24 saat boyunca hareket etmeyecek şekilde dinlenmeye bırakılmıştır. Şekil 5.8'de organik madde içeriği deneyinde kullanılan NaOH çözeltisi ve tüpü gösterilmiştir.

24 saat sonunda organik maddenin NaOH ile reaksiyona girmesiyle oluşan renk esas alınarak yorumlama yapılır. Rengin yoğunluğu organik madde muhtevasına bağlıdır. Çözeltide çok hafif renklenme ya da hiçbir renk değişimi olmaması halinde agrega kayda değer organik madde ihtiva etmiyordur ve sonuç negatif olarak kaydedilir. Güçlü bir renk değişiminin olması, genellikle organik madde muhtevasının yüksek olmasından kaynaklanır.



Şekil 5.8. a: Çözelti hazırlığı, b: Mermer atığı numunesi, c: Agrega numunesi

5.2.7. Kil Topağı Deneyi

ASTM C-142 standardına göre yapılan kil topağı deneyi ile agregalar üzerinde bir film tabakası oluşturularak biriken kil miktarının tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu deneyde elek aralıkları ince ve kaba agrega olmak üzere iki gruba ayrılmıştır. Çizelge 5.7.'de belirtildiği üzere ince agrega 1.18 ile 4.75 mm elekler arasında alınırken kaba agrega 4.75-9.5 mm, 9.5-19 mm ve 19-37.5 mm elek aralıklarında alınarak üç farklı grup olarak belirlenmiştir. Bu elek aralıklarında hazırlanan agrega ve mermer atıklarından oluşan numuneler $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ etüvde sabit ağırlığa ulaşincaya kadar kurutulduktan sonra tartılmış ve ilk kuru ağırlık olarak kaydedilmiştir (A). Her bir elek aralığındaki numuneler ayrı ayrı kaplarda su içerisinde 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra bu numuneler Çizelge 5.7.'de verilen eleklerle alınarak su altında yıkanmış ve elenmiştir. Böylece kil topları danelerden arındırılmıştır. Şekil 5.9.'da deney için alınan numune miktarları ve suda bekletilen numuneler gösterilmiştir. Eleme ve yıkama işlemi tamamlandıktan sonra elek üstünde kalan malzeme tekrar $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ 'lik sabit ağırlığa ulaşincaya kadar etüvde kurularak tartılmış ve son kuru ağırlık olarak kaydedilmiştir (B).

Çizelge 5.7. Numune dane boyutlarına karşılık gelen elek boyutları

Agrega	Numune Dane Boyutları, (mm)	Kullanılan Elekler
İnce agrega	1,18-4,75	0,85 mm (No. 20)
Kaba Agregası	4,75-9,5	2,36 mm (No. 8)
Kaba Agregası	9,5-19	4,75 mm (No. 4)
Kaba Agregası	19-37,5	4,75 mm (No. 4)

**Şekil 5.9.** Numune hazırlanması ve deney aşaması

Aşağıdaki eşitlik (5.8) kullanılarak kil topağı oranı hesaplanmıştır.

$$\text{Kil Topağı Oranı (\%)} = \frac{A-B}{A} \times 100 \quad (5.8)$$

A: İlk kuru ağırlık

B: Son kuru ağırlık

5.2.8. Likit Limit Deneyi

TS 1900-1 standardına göre Casagrande cihazı kullanılarak yapılan bu deney, zeminlerin likit limitlerinin belirlenmesinde kullanılır. Bu deney açıkta kurutulan zeminin likit limitinin belirlenmesi ile ilgili olup aynı zamanda doğal durumlardaki numunelere de uygulanabilmektedir.

Deneye girecek olan malzeme ilk olarak 40 No'lu elekten elenir ve yaklaşık olarak 200 gr kadar numune alınır. Numune bir porselen potaya koyulur ve bir miktar damıtık su katıldıktan sonra homojen bir hamur haline gelinceye kadar, palet bıçağı yardımıyla karıştırılır. Daha sonra bu karışım, numune içerisinde bulunan suyun karışımın her yanına

eşit şekilde yayılmasını sağlamak amacıyla, hava geçirmez bir kaptan 24 saat boyunca oda sıcaklığında bir desikatörde bekletilir. Başlangıçtaki su miktarının likit limitten düşük olması gerekmektedir. Numune kaptan çıkartılarak minimum 10 dakika süreyle yeniden karıştırılır. Sonuç olarak oluşturulan karışımdan bir miktar alınarak likit limit cihazının çanağı içerisine koyulur (Şekil 5.10.). Numunenin yüzeyi tabana paralel olacak şekilde düzeltilir ve oluk açma bıçağı ile, menteşenin tam ortasından geçen çap boyunca, mümkün olduğunca simetrik bir şekilde hareket ettirilerek numunenin ikiye ayrılması sağlanmaktadır. Böylece numunenin tam ortasında “V” kesitli bir oluk oluşmuş olur. Cihazın krank kolu saniyede 2 devir yapacak şekilde çevrilerek, iki tarafta kalan zemin, oluğun dip kısmında 13 mm boyunca birbirine yaklaştırılmasıyla kaldırılıp düşürülür. Numunenin yaklaşan kesimin uzunluğu bir cetvel yardımı ile ölçülmelidir. Olukta oluşan bu birleşme sonucunda deney durdurulur ve düşüş sayısı kaydedilir. Oluktan yaklaşık olarak 30 gr numune alınır ve gerekli işlemler yapılarak su muhtevası belirlenip, kaydedilir.



Şekil 5.10. Likit limit deney hazırlığı

Aynı numune kullanılarak su muhtevası her tekrarda arttırılarak yukarıda yapılan işlemler en az beş defa olmak şartı ile tekrarlanmaktadır. Başlangıçta belirlenen ve deney sırasında malzemeye eklenen su miktarları, düşüş sayılarının 10 ile 50 arasında eşit aralıklarda dağılması sağlanacak şekilde ayarlanmalıdır. Deney yapılırken kullanılan oluk açma bıçağı ile kap her tekrarda yıkanıp kurulandıktan sonra deneylere devam edilmelidir. Bazı zemin cinslerinde oluk, zemindeki akma yoluyla kapanacağı yerde kap

yüzeyi boyunca kayması yolu ile kapanma eğilimindedir. Böyle durumlarda deney sonucuna güvenilmemeli ve zeminde akma oluncaya kadar deney tekrarlanmalıdır. Birkaç kez su eklenerek tekrarlanan deneylerde yine kayma ile karşılaşılırsa bu zeminde likit limit uygulanamayacağı sonucuna varılır ve deney raporuna kaydedilir.

Deneyden elde edilen düşüş sayısı ve buna karşılık hesaplanan su muhtevaları, yarı logaritmik bir grafik kâğıdı üzerinde işaretlenir. Bu işlem için su muhtevası değerleri aritmetik düşey ekseninde, düşüş sayısı ise logaritmik olarak yatay eksene işaretlenmelidir. Oluşan noktalara yakın geçecek şekilde bir çizgi çizilir. Elde edilen “akış doğrusu” üzerinde 25 düşüşe karşılık gelen su muhtevası zeminin likit limitini verir.

5.2.9. Plastik Limit Deneyi

Bu deney, TS 1900-1 standardına göre zeminin plastik kıvamda olduğu durumdaki en düşük su içeriğini belirleme amacı ile yapılmaktadır. Likit limit deneyi ile plastik limit deneyleri paralel olarak yürütülmesi gerekmektedir.

Bu deneyde kullanılacak olan malzeme likit limit deneyi için hazırlanan numuneden yaklaşık olarak 20 gr alınarak hazırlanır. Numune homojen bir hal alınca ve küçük bir top şeklini alabilecek kadar plastik oluncaya kadar, bir cam plaka üzerinde, saf su ile iyice karıştırılıp yoğrulur. Bu şekilde hazırlanan numune göz kararı iki eşit parçaya bölünür. Daha sonra bunlara yeniden top biçimi verilir ve bir tanesi aşağıdaki işlemlere tabi tutulur. Diğer parça ise daha sonra kullanılmak üzere paslanmaz ve hava geçirmez bir kap içerisine alınır. Küre haline getirilen numune cam plaka üzerine koyulur ve 3 mm çapında silindirik bir çubuk şeklini alınca kadar el ayası ile plaka arasında yuvarlanır. Numunenin çapı göz kararı yaklaşık olarak 3 mm olduğu anda çatlama ve kopma belirmemişse zemin yeniden toprak haline getirilerek yoğrulur. Çap tam 3 mm'ye ulaştığı anda, yuvarlanan zeminde çatlama ve dağılmalar görülinceye kadar bu işlem tekrarlanır. Çapın doğru belirlenebilmesi için karşılaştırma ölçeği olarak bir metal çubuktan yararlanılır. Numunenin dağılan parçaları bir numune kabına konulmakta ve su muhtevası tayin edilmektedir. Bu işlem için alınan malzemenin yaş haldeki kütlelerinin 10 gr'dan az olmamasına dikkat edilmelidir. Yukarıda anlatılan işlemler, numunenin ikinci yarısı içinde aynı şekilde tekrarlanır. Böylece aynı zemin numunesine ait iki adet plastik limit deneyi uygulanmış olmaktadır.

Hesaplamaları yapabilmek için plastik limit deneyi en az iki kere tekrar edilmelidir. Uygulanan deney sonucunda elde edilen su muhtevalarının ortalaması,

zeminin plastik limiti (w_p) olarak kabul edilir ve % olarak en yakın 0.1 hanesine yuvarlatılarak hesaplanır. Numunenin deneyden önceki ilk durumu için, kurutma metodu bilinmiyor, açıkta kurutulmuş, etüvde kurutulmuş veya doğal su muhtevası, biçiminde belirtilmelidir.

Zeminin plastisite indisi, likit limit ve plastik limit kullanılarak (5.9) nolu eşitlik ile bulunabilir.

$$I_p = wL - w_p \quad (5.9)$$

5.2.10. Metilen Mavisi Deneyi

Metilen mavisi deneyi TS EN 933-9 standardına göre agregalardaki kirlilik oranını tespit etmek için yapılmaktadır. Deney, ince agregalara uygulanmaktadır. Deneyde kullanılan numune 0-2 mm arasındaki çaplarda ve en az 200 gr ağırlığında olmalıdır. Numune, ilk olarak $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ 'de sabit kütleye ulaşınca kadar kurutulur ve soğumaya bırakılır. Daha sonra deney numunesi tartılır ve kütle, 1 gr yaklaşımla M_1 olarak kaydedilir.

Deneye başlarken ilk olarak deneyde kullanılacak olan 500 ml su 40°C 'yi aşmayacak şekilde ısıtılır. Isıtılan bu su bir beher içerisine koyulur ve buna 200 gr 0-2 mm çaplarında hazırlanmış olan agrega ilave edilir. Bir taraftan da bir süzgeç kâğıdı, yüzeyinin büyük kısmı herhangi bir sıvı veya katı ile temas etmeyecek şekilde boş bir beher üzerine veya başka uygun bir destek üzerine yerleştirilir. Oluşturulan karışım (600 ± 60) devir/dakika hızında 5 dakika boyunca karıştırılır ve bu işlemden sonra behere 5 mL metilen mavisi boya çözeltisi ilâve edilir; beherdeki malzeme, bu sefer (400 ± 40) devir/dakika hızda en az 1 dakika süreyle karıştırılır ve bir baget yardımıyla bir miktar sıvı karışım içerisinden alınır ve beyaz süzgeç kâğıda damlatılmaktadır. 5 mL'lik bu ilk boya çözeltisi ilâvesinden sonra hâle belirmezse, karışıma 5 mL daha boya çözeltisi ilâve edilir, 1 dakika süreyle (400 ± 40) devir/dakika hızda karıştırmaya devam edilir. Bir leke deneyi daha yapılır. Halenin yine görülememesi durumunda, hale görülünceye kadar karıştırmaya, boya ilâvesine ve aynı şekilde leke deneylerine yapılmasına devam edilir. Hâle belirmesi durumunda, daha fazla miktarda boya çözeltisi ilâvesi yapılmadan karıştırmaya devam edilir ve 1 dakika aralıklarla leke deneyleri yapılır. Hâlenin ilk 4 dakika içerisinde kaybolması durumunda, 5 mL daha boya çözeltisi ilâve edilir. Hâlenin beş dakikada kaybolması durumunda, karışıma sadece 2 mL boya çözeltisi ilâve edilir.

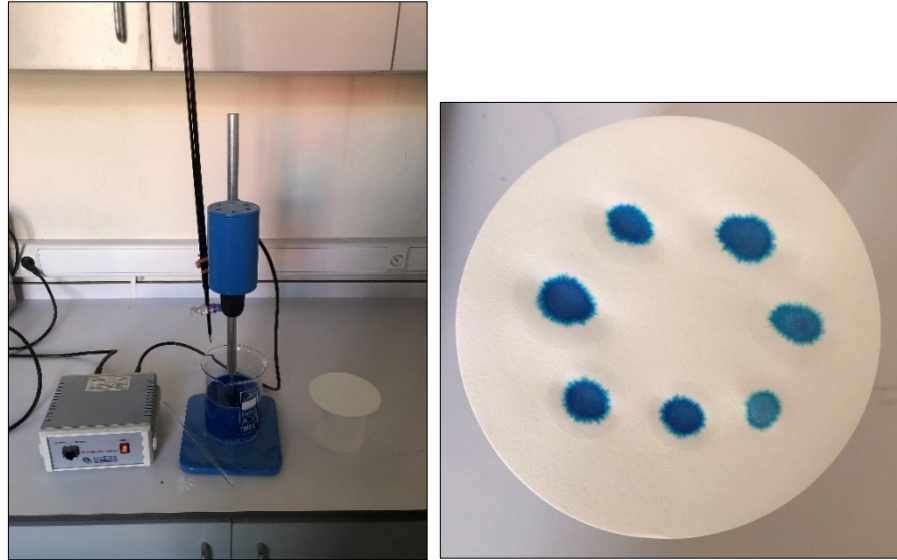
Her iki durumda da hâle, 5 dakika süreyle varlığını devam ettirinceye kadar karıştırmaya ve leke deneyleri yapılmasına devam edilir (Şekil 5.11.). 5 dakika süreyle varlığını koruyan bir hâle meydana getirmek için ilâve edilen boya çözeltisinin toplam hacmi (V_1), 1 mL yaklaşımla kaydedilir. Deney sonucu (5.5) nolu eşitlik yardımı ile hesaplanmaktadır.

$$(MM) = \frac{V_1}{M_1} \times 10 \quad (5.10)$$

MM: Metilen mavisi değeri

V_1 : Deneyde ilave edilen metilen mavisi toplam miktarı, (m)

M_1 : Deneyde kullanılan agrega miktarı, (gr)



Şekil 5.11. Metilen mavisi deneyi

5.2.11. Modifiye Proktor Deneyi

TS 1900-1 standardına göre yapılan bu deneyde belirli bir metot yardımıyla sıkıştırılan bir zeminde, en büyük kuru birim hacim ağırlığı veren su muhtevasının tayini amaçlanmıştır. Deneyde sıkıştırma işleminde 458 mm'den serbestçe düşen 4.5 kg'lık tokmağa sahip otomatik kompaktör cihazı kullanılmıştır.

Deneyin yapılışı, ilk olarak 152.4 mm çapında ve 115.5 mm yüksekliğindeki kalıp, taban plakası takılı olarak tartılır ve ağırlığı M_1 olarak kaydedilir. İstenilen gradasyonda hazırlanan numune 19 mm'lik elekten elenir. Elek altında kalan

malzemeden 5 kg alınarak (105 ±5) °C’de kurutulur ve laboratuvar ortamında soğumaya bırakılır. Numune içeriğinin kumlu ve çakıllı olması durumunda %3 ile %5 arasında değişen miktarlarda su, kohezyonlu zeminlerde ise, plastik limitin %12 ile %16 arasındaki miktarda su muhtevası ile deneye başlanabilir. İlk karışımındaki su miktarı %3 olarak seçilmiştir. Su ilavesi yapıldıktan sonra iyice karıştırılan numune ile kalıp 5 eşit parçada dolacak şekilde ilk kısım doldurulur. Kalıp üst kısmına yakası takılarak her bir tabaka üzerine, 458 mm serbest düşüş yapan tokmakla 56 darbe uygulanmak suretiyle otomatik kompaktöre yerleştirilir. İlk tabakanın sıkışması tamamlandıktan sonra ikinci tabaka malzeme ilave edilir ve bu şekilde 5 tabakanın sıkıştırılması tamamlanır. Sıkıştırma işlemi cihaz yardımı ile yapıldığı için tabaka üzerine uygulanan darbeler eşit bir şekilde uygulanmıştır (Şekil 5.12.). Son tabakada zemin miktarının kalıbı dolduracak şekilde olması gerekir. Ancak sıkıştırma işleminin tamamlanması ile yaka çıkarıldıktan sonra düzeltilip atılacak fazla malzeme kısmının yüksekliğinin 6 mm’yi geçmemesine dikkat edilmelidir. Yaka çıkarıldıktan sonra sıkıştırılmış zeminin yüzeyi çelik bir cetvel yardımı düzeltilir. Zemin ve kalıp, 1 gr duyarlıkları terazide hassas olarak tartılır ve ağırlığı M_2 olarak kaydedilir. Sıkıştırılan numune kalıptan çıkarıldıktan sonra bir miktar malzeme alınarak su muhtevası ölçülür. Numunenin geriye kalan kısmı, ufalanıp tekrar ilgili elekten geçirilir. Malzemeye %1-2 oranında su ilave edilerek iyice karıştırılmak suretiyle yukarıdaki işlemler aynen tekrarlanır. Deney, en az beş değer alınacak şekilde tekrarlanmalıdır.



Şekil 5.12. Modifiye proktor deneyi yapılışı

Hesaplamalar; sıkıştırılmış zeminin yaş birim hacim ağırlığı (ρ_n) olarak alınacak olursa, değerler her numune için (5.11) nolu eşitlikten hesaplanır;

$$\rho_n = \frac{M_2 - M_1}{V} \times 9.81 \quad (5.11)$$

M_1 , Kalıp ve tabanın kütlesi, (gr)

M_2 , Kalıp, tabanı ve tabanı sıkıştırılmış zemin kütlesi, (gr)

V , Kalıbın iç hacmi, (cm^3)

Zeminin kuru birim hacim ağırlığı (ρ_k) ise (5.12) nolu eşitlik ile hesaplanır;

$$\rho_k = \frac{100\rho_n}{100 + V} \times 100 \quad (5.12)$$

Bir seri deney sonucunda elde edilen kuru birim hacim ağırlık (ρ_k) ve bunlara karşılık gelen su muhtevası değerleri, bir grafik kâğıdı üzerinde işaretlenir. Elde edilen bu noktalar arasından düzgün bir eğri geçirilir ve bu eğri üzerindeki en büyük değer bulunarak optimum su muhtevası belirlenir.

5.2.12. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi

CBR deneyi TS 1900-2 standardına göre yapılmıştır. Deneyler anlık ve 7 günlük kür süresi ile kuru ve yaş olarak uygulanmıştır. Deney, alanı 1935 mm^2 olan bir pistonun optimum su muhtevasında sıkıştırılarak hazırlanmış olan bir numuneye, belirli bir hızda ve belirli bir derinliğe kadar itilmesi ile uygulanır. CBR değeri bu itme işlemi için gerekli basıncın, aynı pistonun düzgün bir gradasyona sahip kırmataştan hazırlanan bir numunede aynı miktarda batmayı sağlayan basınca oranının yüzde olarak belirlendiği sayıdır.

CBR numunesi modifiye proktor deneyindeki gibi otomatik kompaktör kullanılarak optimum su muhtevasında sıkıştırılmıştır. Boşlukların tamamen su ile dolu olduğu en düşük taşıma gücünü bir başka deyişle arazideki doğa koşullarının birebir deney numunesinde belirlenebilmesi amacı ile kuru CBR metoduna ilaveten yaş CBR metodu da kullanılmıştır. Bu metot da sıkıştırma işlemi yapılan numune 4 gün boyunca suda bekletilmiştir. Normal koşullarda zeminin üzerine gelecek olan tahmini yükü temsil etmek amacı ile numune üzerine ağırlık ilave edilmiştir. Bu malzemelerin su içerisinde kabarma yapıp yapmadığı da kalıp üzerine yerleştirilen mekanizma yardımı ile kontrol edilmiştir. Agregalarda su altında şişme görülmemiştir. Üç günün sonunda su numune

üzerine çıkmamışsa bir miktar su kalıp üzerini geçecek şekilde ilave edilir ve 24 saat bu şekilde beklenir. Bu işlem sonunda numune su içerisinde çıkarılarak normal şartlar altına bünyesindeki fazla suyun drene edilmesi için yaklaşık 15 dakika bekletilip CBR cihazına yerleştirilir ve itme işlemine başlanır (Şekil 5.13.). Bu işlem numunenin hem üst yüzeyine hem de alt yüzeyine uygulanır. Daha sonra standartta belirtilen basınçlarda (kg/cm²) gerekli batma değerlerine (mm) karşılık gelen yük değerleri (kg) kaydedilir. Bu değerler; yatay eksenle penetrasyon, düşey eksenle ise basınç değerleri yazılarak basınç-penetrasyon eğrisi çizilir.

Gerekli olması durumunda düzeltmeler yapılarak, 2.54 mm (0.1 inch) ve 5.08 mm (0.2 inch)'lik penetrasyonlara karşı gelen düzeltilmiş basınç değeriyle, CBR bulunur. 2.54 mm (0.1 inch)'lik penetrasyondaki düzeltilmiş basınç değeri, 70.31 kg/cm²'ye, 5.08 mm (0.2 inch)'lik penetrasyondaki düzeltilmiş basınç değeri ise 105.46 kg/cm²'lik standart basınç değerine bölünüp 100 ile çarpılarak CBR değerleri % olarak (5.13) eşitliği yardımı ile bulunur. Taşıma oranı değeri elde edilen bu iki değerden yüksek olanı olarak kabul edilir. Deney sonuçları numunenin alt ve üst yüzeyi için ilgili su muhtevaları ile birlikte, ayrı ayrı verilir. Sonuç KTŞ'deki değer ile karşılaştırılır.

$$\text{CBR} = \frac{\text{Düzeltilmiş Basınç}}{\text{Standart Basınç}} \times 100 \quad (5.13)$$



Şekil 5.13. Yaş CBR deney aşamaları

sistem donma çözünme cihazına yerleştirilir ve (24±2) saat (-19)°C’de ve ardından (24±2) saat (+21)°C’de sıcaklıklara maruz bırakılır. 24 saat donma ve 24 saat çözünme işlemi 1 donma çözünme çevrimine karşılık gelmektedir. Çevirim süresini tamamlayan numuneler CBR test cihazında basınç uygulanır ve sonuçlar kaydedilir. Deneylerden elde edilen sonuçlar, donma-çözünme çevrimine maruz kalmamış numunelerin CBR değerleriyle karşılaştırılıp yorumlanmıştır.



Şekil 5.15. Kapalı sistem donma-çözünme cihazı

5.2.14. X-Işınları Difraktogramı (XRD) Analizi

1895 yılında Conrad Röntgen tarafından keşfedilen X-ışınından (röntgen ışını) bir maddenin kristal yapısını araştırarak mineralojik bileşimini bulmakta faydalanılmaktadır. O zamanlarda fiziksel özellikleri bilinmediğinden “X” ismi verilmiş ve günümüzde de halen aynı isimle anılmaktadır. Ayrıca, bu ışını keşfeden bilim adamının ismine ithafen Röntgen ışınları da denilmektedir. XRD yönteminde dalga boyu 0.5 Å ile 2 Å aralığında olan X-ışınları örnek üzerine gönderilir, ışın örnek üzerinden Bragg kanununa göre kırılarak dönerek özel bir kırınma yapısı oluşturur. Bu kırınma (difraksiyon) yapısı sayesinde malzemenin fazları, yapısal özellikleri ve konsantrasyonları belirlenebilir.

XRD çekimi yapılacak olan örneklerin özel olarak hazırlanması gerekir. Bunun için ilk olarak açıkta kurutulmuş malzeme örnekleri 200 numaralı elekten elenir. Elde edilen 3-5 gr ince malzeme XRD analizlerinde kullanılmak için ayrılır. Ayrılan bu

malzeme öğütülerek dane boyutu 10 μm 'nin altına düşürülür. Daha sonra öğütülmüş ve adeta toz haline gelmiş örnekten bir miktarı alınarak, 100-150 mikron derinliğinde, 1 cm genişliğinde olukları olan, 2.5-3.5 cm boyutlarındaki lam şekilli özel numune tutucu üzerine yerleştirilir ve analiz sonucunda X-ışını difraktogramı olarak isimlendirilen bir grafik elde edilir. Bu grafikteki x eksenini Bragg kanunundaki θ açısını, y eksenini ise kırınım şiddetini göstermektedir.

5.2.15. X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF) Analizi

X-ışını spektroskopisi deneyi ile malzemelerin yarı kantitatif analiz ile içeriğinin belirlenmesi ve kantitatif analiz ile karşılaştırılması amaçlanmıştır. XRF spektrometresi bir program vasıtasıyla çalıştırılarak, cihazın mevcut detektörlerinin (Sintilasyon sayacı, PC, SC ve orantılı sayaç), PHA (Atım yükselti ayarı) parametrelerinin ölçümü için uygun olan ayarlar gerçekleştirilir. Analizi yapılacak olan numuneler katı halde oldukları için, ölçüm yapılacak ortam vakum ile izole edilir. Numuneler cihazın numune koyucu haznesine yerleştirilebilen 40 mm çapa sahip, metal numune tutuculara yerleştirilir. Daha sonra analizi yapılacak malzeme için işlem parametreleri ayarlanır. Ardından, analiz işlemi başlatılır ve elde edilen ölçüm sonuçları yorumlanır.

5.2.16. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM-EDS) Analizleri

SEM çalışmaları kapsamında, örneklerde bulunan bileşenlerin tanımlanmasına, mineral ilişkilerine, morfolojik özelliklerine ve oluşum tür ile kökenlerine yönelik yorumlar için gözlemler yapılmaktadır. Ayrıca, gerekli noktalardan yarı kantitatif EDS (*Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy*) kimyasal analizlerde yapılabilmektedir.

Taramalı elektron mikroskobu (Scanning Electron Microscope; SEM) çalışmaları Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde JEOL JSM 7000F marka alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (Field Emission-Scanning Electron Microscope, FE-SEM) kullanılarak; agrega ve mermer atığı olmak üzere 2 adet örnek üzerinde gerçekleştirilmiştir. Örneklerin düzgün yüzeye sahip kısımları alüminyum tutuculara yerleştirilmiştir. İletkenliğin sağlanabilmesi için 15 mA, 2 mbar ve 50 sn şartlarında SPI-MODULE marka püskürtmeli kaplayıcıda, yaklaşık olarak 150 Å kaplama kalınlığını sağlayacak şekilde Pt-Pd alaşımı ile kaplanmıştır. Kaplanan örnekler taramalı elektron mikroskobuna yerleştirilerek 5-15 mA akım ve 10 kV voltaj şartları altında görüntüler elde edilmiştir. Bazı örneklerden yarı-

kantitatif kimyasal analiz değerleri Oxford/Inca marka enerji dağılım spektrometresi (EDS) yardımıyla elde edilmiştir.

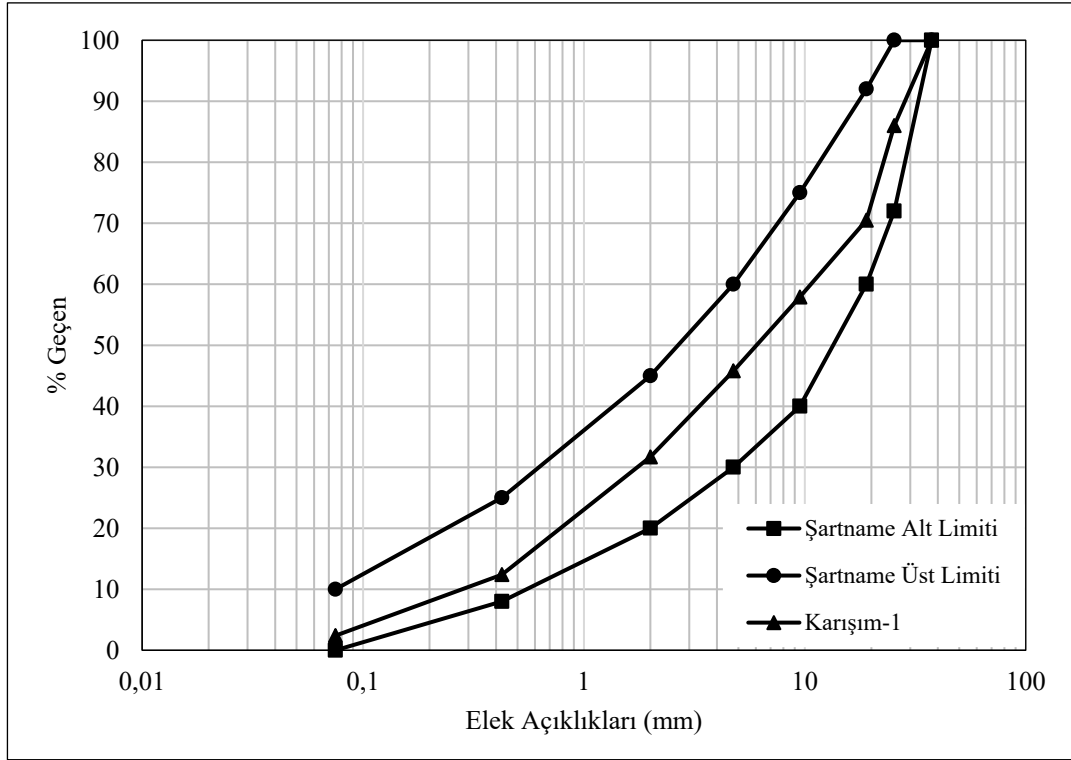
6. DENEY SONUÇLARI

KTŞ'de yol üst yapısı temel malzemelerinin standartlarını belirleyen deneyler (Bursa-İnegöl) Ayr.-Yenişehir (Bilecik-Osmaneli) Ayr. Yolu KM:25+000-314+50 ile Yenişehir Güney Geçişi KM: 0+000-7+419,06 Kesimlerin Yapım İşi'nde kullanılan İncirli taş ocağından temin edilen agrega ve Yenipazar İlçesinde bulunan mermer ocaklarından temin edilen atık mermer numunelere uygulanmıştır.

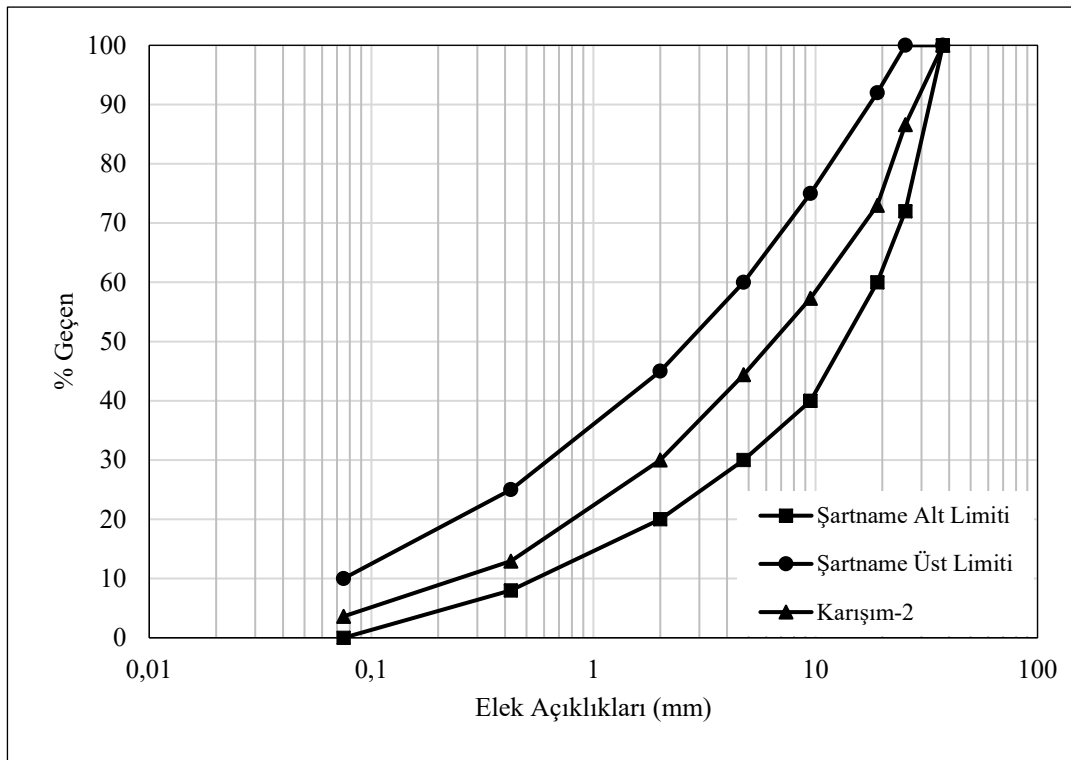
6.1. Elek Analizi Deneyi

Elek analizi deneyi ile yol temel malzemesi olarak kullanılacak malzeme gradasyonlarının Karayolları Teknik Şartnamesinde istenilen aralıklarda olması hedeflenmektedir. Karayolları Teknik Şartnamesinde farklı temel türleri için farklı temel gradasyonları öngörülmektedir. Bu çalışmada (Bursa-İnegöl) Ayr.-Yenişehir (Bilecik-Osmaneli) Ayr. Yolu KM:25+000-314+50 ile Yenişehir Güney Geçişi KM: 0+000-7+419,06 Kesimlerin Yapım İşi için Karayolları Bölge Müdürlüğü laboratuvarlarında yapılan deneyler sonucunda belirlenen dizayn değerleri kullanılmıştır (Bkz. Çizelge 5.1.). Bu dizaynda deneye tabi tutulan gradasyon aralığı, granüler temeller için 0-38 mm dane çapında agrega içeren temel çeşidine göre yapılmıştır.

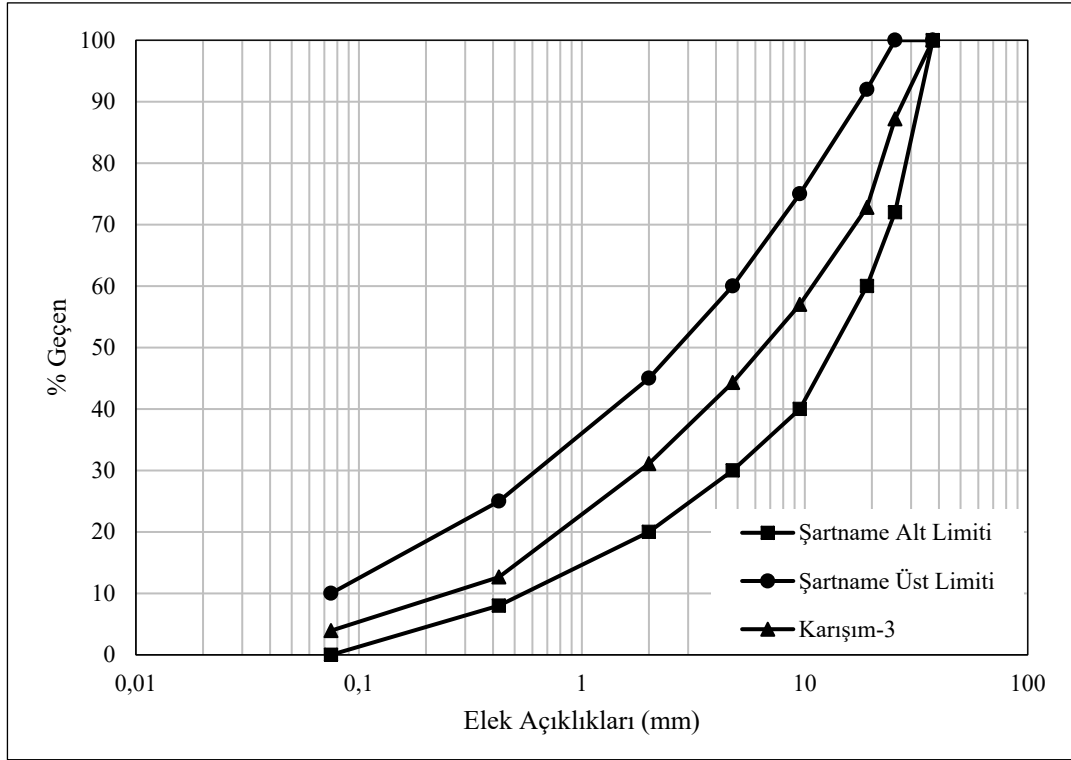
Yapılan çalışmada İncirli taşocağından kırılmış halde olan agregadan yeteri kadar alınarak laboratuvar ortamına götürülmüştür. Daha sonra mermer ocağından temin edilen mermer atıkları laboratuvarda mini konkasör yardımı ile kırılmıştır. Bu malzeme dizaynda belirtilen elek aralıklarında elenerek malzeme grupları (0-5 mm, 5-12 mm, 12-19 mm, 19-38 mm) oluşturulmuştur. Daha sonrasında çizelgede belirtilen 5 farklı karışım türü oluşturulmuş ve her biri elek analizi deneyine tabi tutulmuştur. Karışım-1, Karışım-2, Karışım-3, Karışım-4 ve Karışım-5 üzerinde yapılan elek analizi deneyleri sırası ile Şekil 6.1., Şekil 6.2., Şekil 6.3. Şekil 6.4., Şekil 6.5.' de verilmiştir. Deneylere ait sayısal veriler ise Ek-1'de verilmiştir.



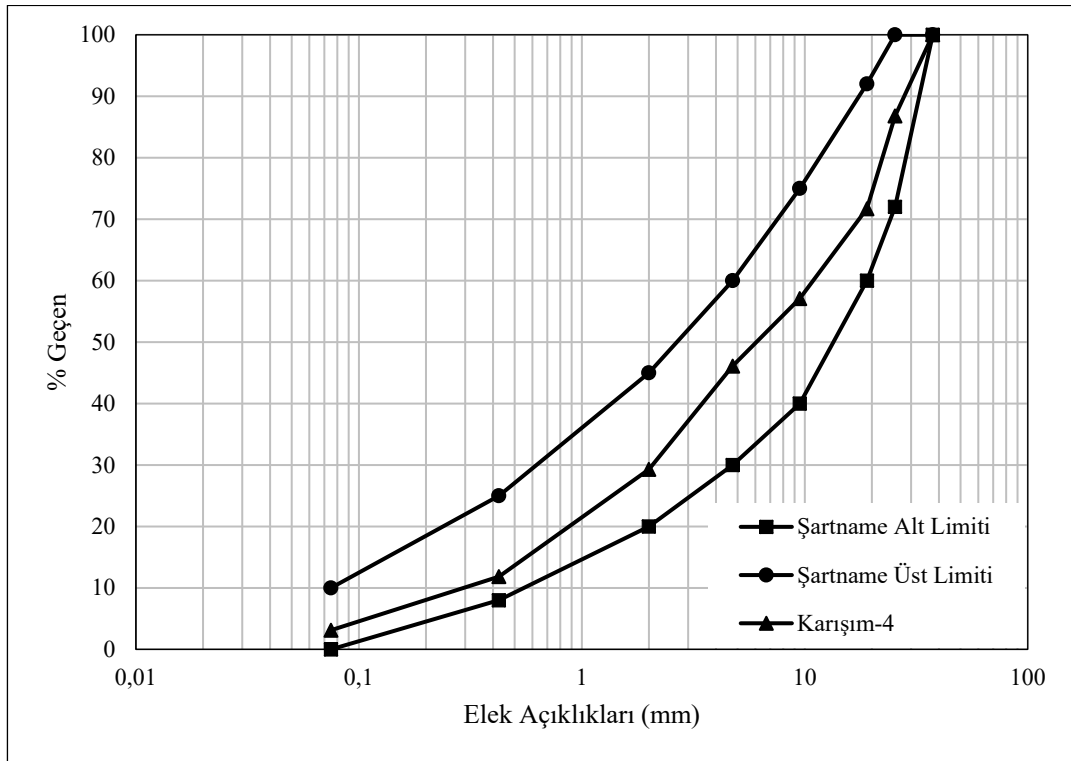
Şekil 6.1. Karışım-1 elek analizi grafiği



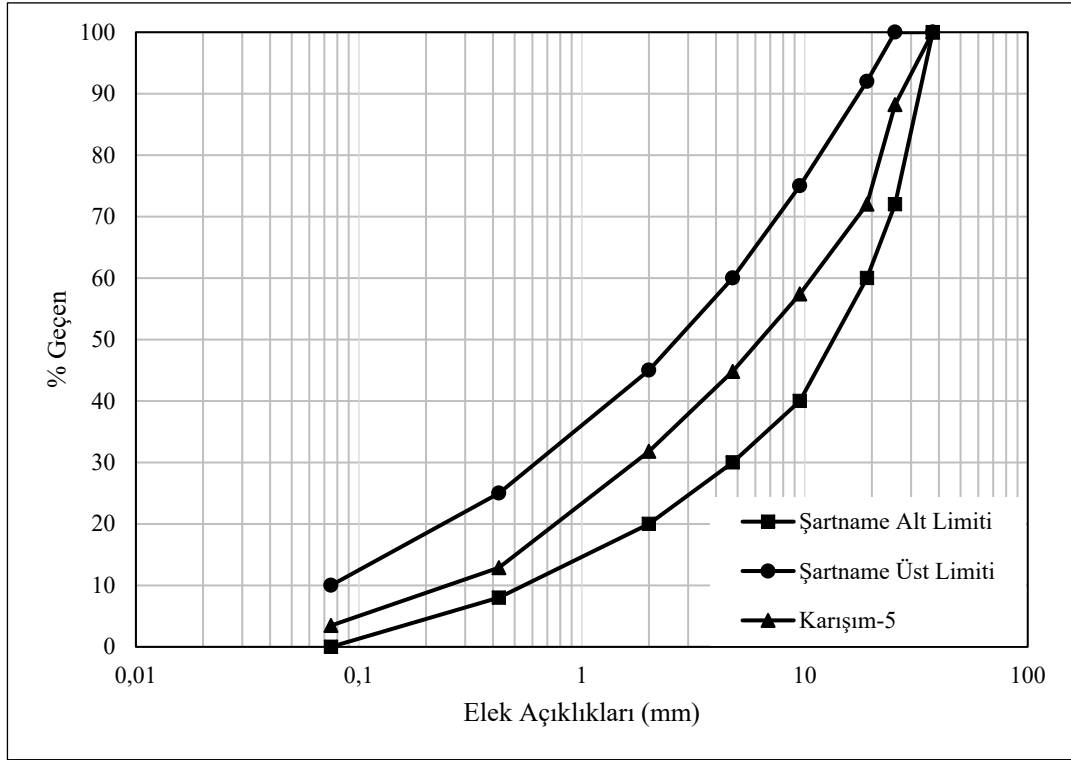
Şekil 6.2. Karışım-2 elek analizi grafiği



Şekil 6.3. Karışım-3 elek analizi grafiği



Şekil 6.4. Karışım-4 elek analizi grafiği



Şekil 6.5. Karışım-5 elek analizi grafiği

Grafiklerden görüleceği üzere mermer atıklarının içeriğinde bulunduğu tüm karışım tipleri şartname alt ve üst limitlerini sağlamıştır. Dolayısıyla karışım oranlarında herhangi bir düzeltme yapmaya gerek yoktur.

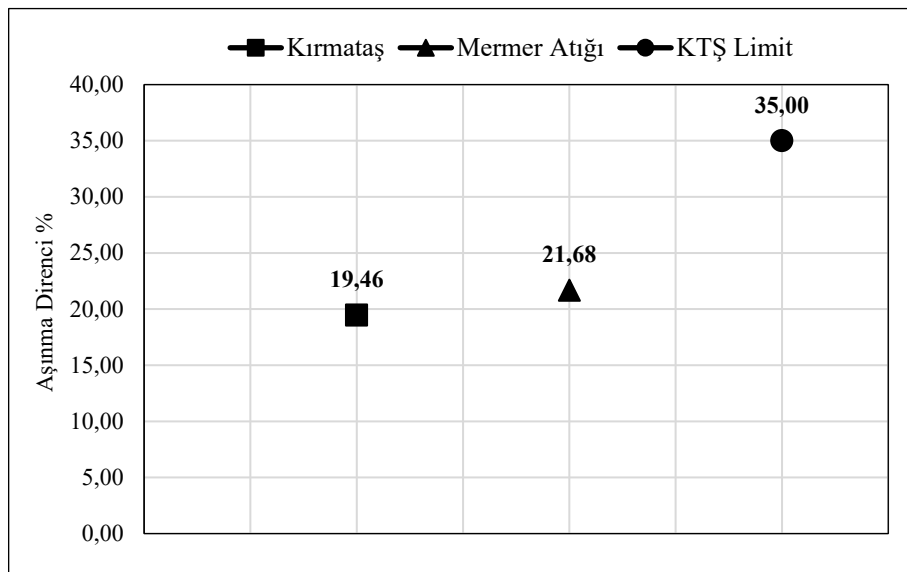
Çizelge 6.1. Zemin sınıflandırılması

Karışım No	Karışım-1	Karışım-2	Karışım-3	Karışım-4	Karışım-5
Dmax (mm)	38,00	38,00	38,00	38,00	38,00
D10	0,28	0,24	0,24	0,28	0,24
D30	1,80	2,00	1,80	2,01	1,80
D60	10,02	10,02	10,02	10,02	10,02
Cu=D60/D10	35,79	41,75	41,75	35,79	41,75
Cr=(D30²/D60)xD10	0,09	0,10	0,08	0,11	0,08
TS1500'e Göre Sınıflandırma	GW	GW	GW	GW	GW
AASHTO'ya Göre Sınıflandırma	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a	A-1-a

Elek analizinden elde edilen sonuçlarla TS 1500 ve AASHTO standartlarına göre sınıflandırma yapılmıştır (Çizelge 6.1.). TS 1500 standardına göre tüm karışım tipleri için zemin sınıfı düzgün dane dağılımlı çakıl ve az kum (GW) olarak bulunmuştur. ASSHTO standardına göre ise tüm karışım tiplerinde zemin sınıfı taş parçalar çakıl ve kum, iyi mükemmel (A-1-a) olarak bulunmuştur.

6.2. Parçalanma Direncinin Tayini Los Angeles Metodu

Karayolu inşaatlarında kullanılan malzemeler, trafik yükleri, atmosferik ve mekanik etkiler sebebiyle ufalanmaya, aşınmaya, parçalanmaya ve kırılmalara uğramaktadır. Bu deformasyonlar yol tabakasının standart granülometrisini bozmakta, kaba agrega oranı azalırken ince agrega oranı artmakta ve yol tabakasının taşıma gücüne olumsuz etki yaparak bu tabakalarının bozulmalarına sebep olmaktadır. Temel ve alt temel tabakalarındaki bu bozulmalar kaplama tabakalarına da zarar vereceği için bu tabakaların aşınmaya karşı dayanıklılığı oldukça önem kazanmaktadır. Parçalanma direnci tayinindeki amaç, kullanılan agregaların darbelere ve kırılmalara karşı gösterdiği mukavemeti belirlemek ve malzemenin şartname değerlerine uygunluğunu kontrol ederek, malzemenin yol temel malzemesi olarak kullanılabilirliğine karar vermektir. Bu çalışmada, Los Angeles aşınma deneyi TS EN 1097-2 ve AASHTO T96'dan faydalanılarak yapılmış ve elde edilen sonuçlar KTŞ limitleri ile birlikte Şekil 6.6.'da gösterilmiştir. Deney sonuçlarına ait sayısal veriler EK-2'de verilmiştir.

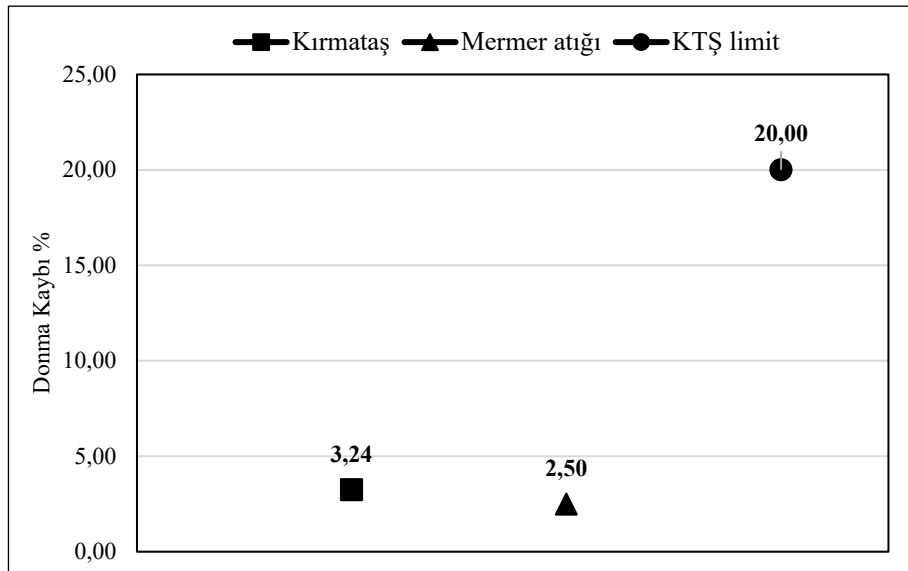


Şekil 6.6. Los Angeles aşınma deneyi sonuçları

Numunelerin aşınma kayıpları İncirli taş ocağı agregasında %19.46 ve Yenipazar İlçesi mermer atığında %21.68 olarak hesaplanmıştır. Karayolları Teknik Şartnamesinde aşınma kayıpları en fazla %35 olması gerekmektedir. Bu kapsamda analizi yapılan numuneler KTŞ limit değerinin altında sonuç vererek aşınmaya karşı dayanıklı oldukları belirlenmiştir.

6.3. Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık Deneyi

Agregaların hava tesirlerine karşı dayanıklılığı özellikle uzun süre atmosferik hava tesirleri altında, gece ve gündüz ısı farklarının fazla olduğu karasal iklim bölgelerinde ve don olaylarının yaşandığı bölgelerde önemli bir etkidir. Bu bölgelerde agregalar tarafından emilen su zamanla donacak ve hacim genişlemesine uğrayacaktır. Hacim genişlemesinin oluşturacağı ilave gerilmeler ve donma çözünme olaylarının sıklığı agregalarda kısmi parçalanmalara neden olacaktır. Bunun sonucunda da agrega granülometrisinde değişimler olacak ve mukavemet değerlerinin düşmesine neden olacaktır. İstenmeyen bu durumlara karşın agregaların dona karşı dayanıklı olması istenmektedir. Sonuçlar Şekil 6.7.'de gösterilmiştir. Deneye ait sayısal veriler EK-3'te verilmiştir.



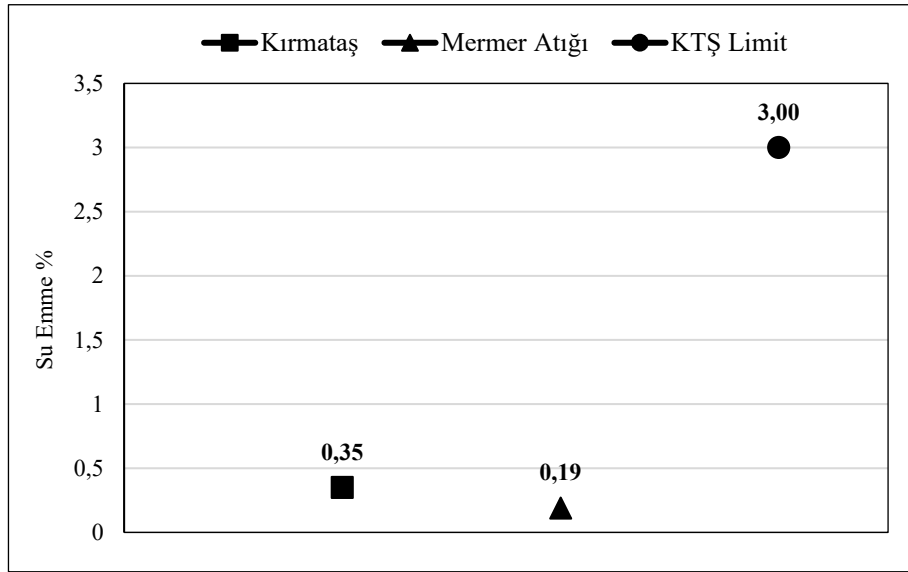
Şekil 6.7. Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deney sonuçları

TS EN 1367-2 standardına göre yapılan deneyde numunelerin donma-çözünme sonrası kütle kayıpları için KTŞ'de belirtilen limit değer %20'dir. Donma-çözünme

etkilerine karşı kayıp miktarları, İncirli taş ocağı agregası için %3.24 ve Yenipazar mermer ocağı mermer atığı için %2.50 olarak hesaplanmıştır. Numunelerdeki bu değerler şartname limit değerinin altında kalarak, don etkisine karşı dayanıklı oldukları belirlenmiştir.

6.4. Özgül Ağırlık ve Su Emme (Absorbsiyon) Deneyi

Özgül Ağırlık ve su emme deneyinde agrega danelerinin yüzeylerinde su biriktirme kapasiteleri ve özgül ağırlık tayin edilmektedir. Yüksek su emme kapasitesine sahip olan agregalar buldukları temel zemini içerisinde suyun varlığına imkân sağlayarak zeminin bozulmasına neden olmaktadır. Bu sebeple yol temel inşaatlarında kullanılan agregaların düşük su emme kapasitelerinin olması istenmektedir. Agregası ve mermer atık numunelerine özgül ağırlık ve su emme deneyi TS EN 1097-6 kriterlerine göre yapılarak Şekil 6.8.'deki sonuçlar elde edilmiştir. Deneye ait sayısal veriler EK-4'te verilmiştir.



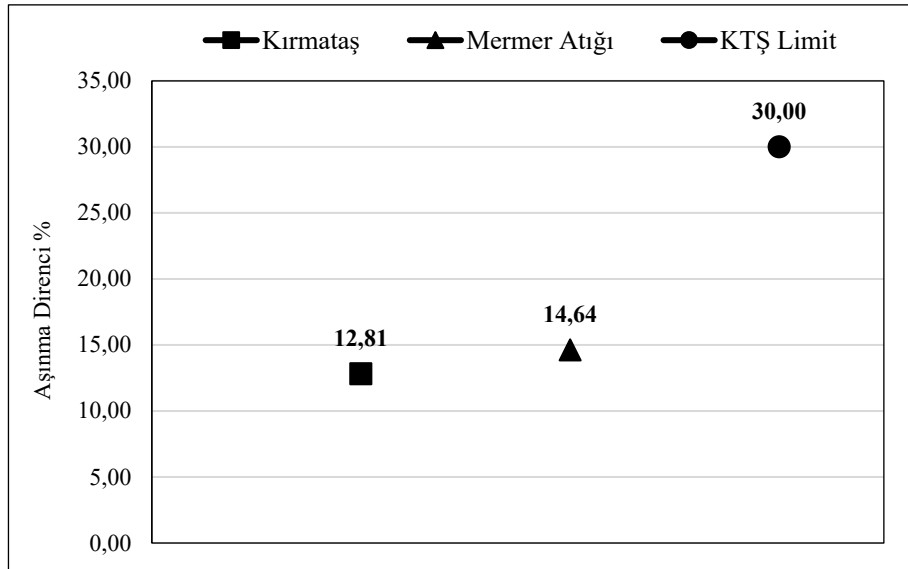
Şekil 6.8. Su emme deneyi sonuçları

Numunelerin su emme yüzdeleri, İncirli taş ocağı agregası için %0.35 ve Yenipazar mermer ocağı mermer atığı için %0.19 olarak hesaplanmıştır. KTŞ'de limit değer olarak %3 verilmiştir. Analizini yaptığımız iki numunede de bu değerlerin çok altında bir sonuca ulaşılmıştır. Bu sonuçlardan anlaşılacağı üzere agrega ve mermerin yapısal

olarak suyu yüzeyinde tutma yüzdesi düşük bir malzeme olduğu anlaşılmaktadır. Özgül ağırlık sonuçları ise her iki numune içinde 2.64 gr/cm^3 olarak bulunmuştur.

6.5. Yassılık İndeksi Deneyi

Yassılık indeksi deneyi agrega, kalınlığının nominal boyutuna oranının 0.6'dan daha küçük olduğu durumlarda agrega danelerinin yassı olarak tanımlanmasını esas alan metottur. Yassı ve silindirik yapıya sahip danelerin çekme dayanımları düşük olduğu için çevre ve trafik etkisi altında kolayca aşınıp kırılabilirler. Bu sebeple yol inşaatlarında kullanılacak agregaların kırma taş olması istenirken yassı olması istenmemektedir. Trafik yüküne maruz kalan kaplamaları oluşturan agregalar dört bir taraftan gelen basınçlara maruz kalacaktır ve bu basınca karşı yassı daneler istenilen mukavemeti sağlayamayacaktır. Ayrıca yassı daneler sıkıştırılma esnasında da bir miktar kırılmalara maruz kalacak ve mukavemet değeri istenilen düzeylerde olmayacaktır. Agregada ve mermer atık numunelerine yassılık indeksi deneyi TS EN 933-3 standardı kriterlerine göre yapılarak Şekil 6.9.'daki sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlara göre agreganın yassılık indeksi %12.81, atık mermerin yassılık indeksi ise %14.64 değeri ile KTŞ'de belirtilen maksimum değerin yani %30'un altında kalarak şartname değerini sağlamışlardır. Bu deneye ait sayısal veriler EK-5'te verilmiştir.



Şekil 6.9. Yassılık indeksi deney sonuçları

6.6. NaOH İle Organik Madde Tespiti Deneyi

KTŞ’de alt temel ve temel tabakalarında kullanılacak olan malzeme içeriğinde organik madde bulunmaması istenmektedir. Şartname gereğince bu tabakalarda kullanılacak malzemelerin, TS EN 1744-1 standardına göre %3 NaOH çözeltisi ile yapılan organik madde tespiti deney sonucunun negatif olması beklenmektedir. Organik madde tespitinin pozitif olması durumunda agregalar bulunduğu yapı içerisinde kimyasal tepkimeler vererek deformasyonlara sebep olabilmektedir. Kaba agregalar üzerinde yapılan bu deney nicel bir sonuç vermeyip gözlemsel bir sonuç vermektedir. Bu kapsamda numuneler çözelti içerisinde 24 saat bekletildikten sonra meydana gelen renk değişimlerine bakılmıştır. Sonuçlar ve KTŞ değeri Çizelge 6.2.’de verilmiştir. Deney sonucunda agrega ve mermer atığı numunesinde herhangi bir renk değişimi yaşanmayarak şartnamede de istenildiği gibi negatif bir sonuç vermiştir.

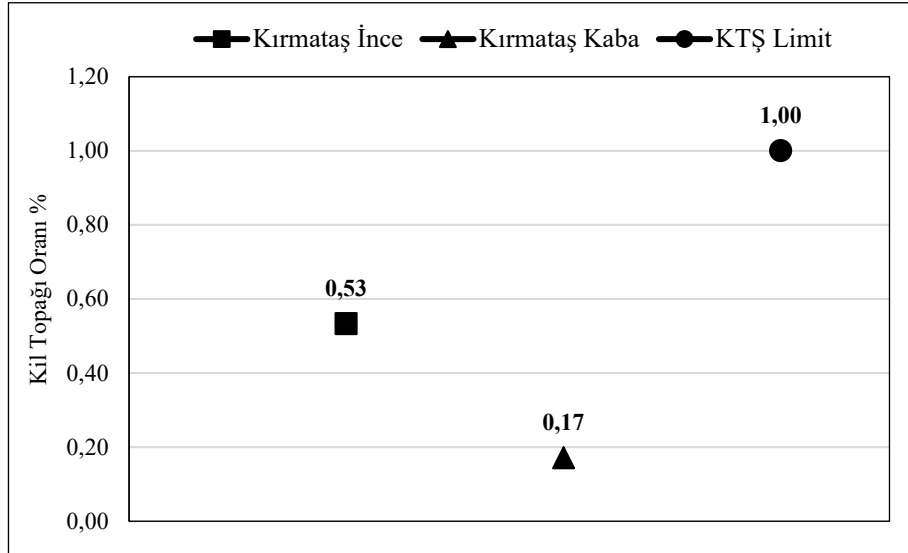
Çizelge 6.2. NaOH ile organik madde tespit deneyi sonuçları

Agrega	NaOH Çözeltisi İçerisindeki Renk Değişimi	Organik Madde İçeriği	KTŞ
Agrega (İncirli taş ocağı)	Yok	Negatif	Negatif
Mermer atığı (Yenipazar mermer ocağı)	Yok	Negatif	Negatif

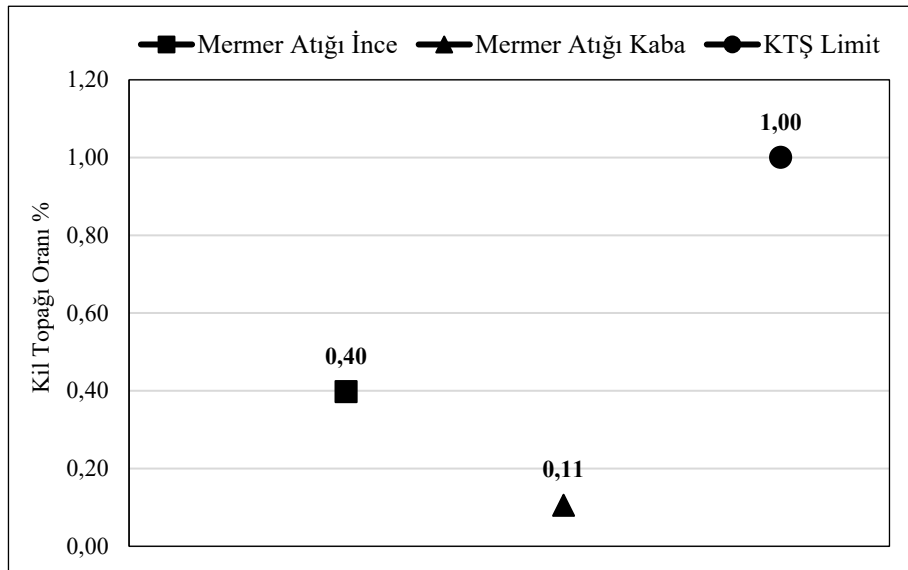
6.7. Kil Topağı Deneyi

Yol yapımında, alt temel ve temel tabakalarında, şartnameye göre istenilen maksimum orandan daha fazla kil topağı bulunması durumunda yol tabakalarının stabilitesi olumsuz yönde etkilenir. KTŞ’de yol temel tabakalarında kullanılacak malzemelerin kil topağı oranı limit değerinin %1 olması istenmektedir. Bu oranların tespit edilmesi için ASTM C-142 standardına göre İncirli taş ocağı agregası ve Yenipazar ilçesi mermer atığı üzerinde yapılan deney sonuçları Şekil 6.10. ve Şekil 6.11.’de gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre kil topağı oranı İncirli taş ocağı agregasında ince agreganın %0.53, kaba agreganın ise %0.17 olarak bulunmuştur. Bu oranlar mermer atığı ince agregada %0.40, kaba agregada ise %0.11 olarak bulunmuştur. İki farklı numune üzerinde yapılan deney sonuçlarının, KTŞ’de verilen maksimum değerinin altında kaldığı görülmüş ve bu

açından malzemelerin temel ve alt temel tabakalarında kullanımının uygun koşulları sağladığı sonucuna varılmıştır. Deneye ait sayısal veriler EK-6'da verilmiştir.



Şekil 6.10. Kil topağı deney sonuçları (agrega)

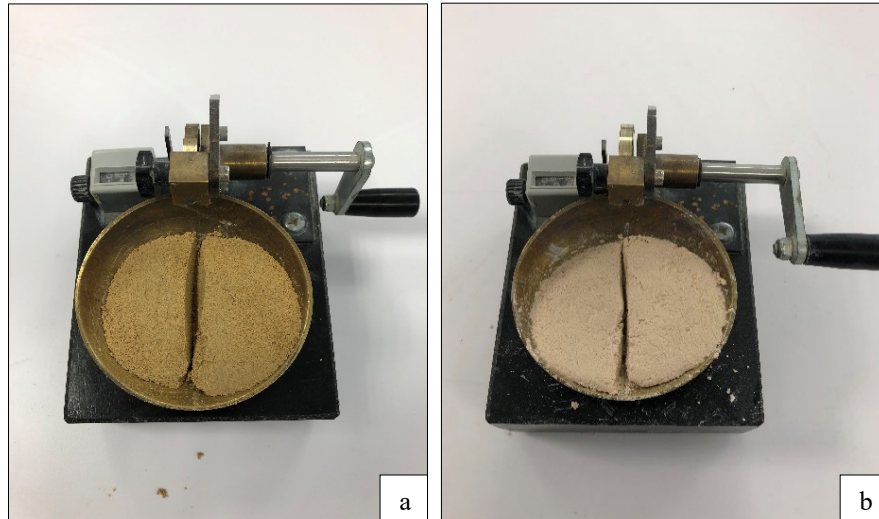


Şekil 6.11. Kil topağı deney sonuçları (mermer atığı)

6.8. Likit Limit Deneyi

TS 1900-1 standardına göre yapılan bu deney sonucunda standartta belirtildiği üzere bazı zeminlerde oluk, zemindeki akma yoluyla kapanacağı yerde kap yüzeyi boyunca kayması yolu ile kapanma eğilimi göstermiştir (Şekil 6.12.). Bu durum

karşısında deney sonucuna güvenilmemiş ve zeminde akma oluncaya kadar her iki numune üzerinde de deney tekrarlanmıştır. Ancak birkaç kez su eklenerek tekrarlanan deneylerde yine kayma olduğundan bu malzemeler üzerinde likit limit uygulanamayacağı ve dolayısıyla agrega ve mermer atığı numunelerinin non-plastik (NP) bir malzeme olduğu sonucuna varılmıştır.



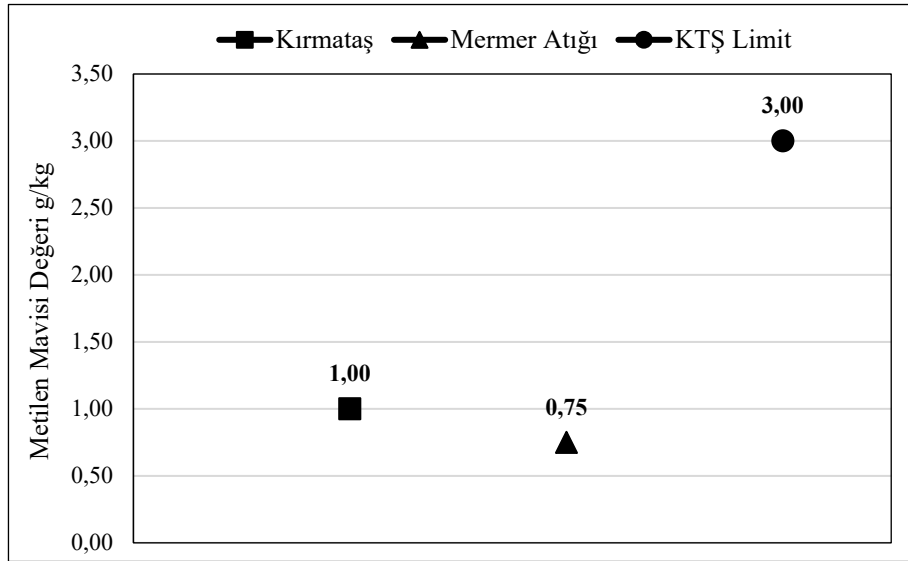
Şekil 6.12. Likit limit deney sonuçları (a: agrega, b: mermer atığı)

6.9. Plastik Limit Deneyi

Likit limit deneyinde olduğu gibi plastik limit deneyi de her iki numune için sonuç vermemiştir. Numuneler plastik özellik göstermediğinden yani NP özellikte malzeme oldukları için plastik limit değeri tespit edilememiştir. Likit limit ve plastik limitin belirlenememesi sonucunda plastisite indisi de hesaplanamamıştır.

6.10. Metilen Mavisi Deneyi

TS EN 933-9 standardına göre yapılan metilen mavisi deneyi agregaların kirlilik oranını belirlemek için yapılır. Bu deney standart gereği 2 mm'lik elekten geçen agregalar üzerine uygulanmaktadır. KTŞ'de yol inşaatlarının temel tabakasında kullanılacak olan agregaların kirlilik oranı limit değerini 3 olarak belirtilmektedir. Yol temel tabakasının bu limit üzerinde kirli agrega barındırması durumunda temel tabakasının trafik yükleri karşısındaki dayanımını azaltmaktadır. Metilen mavisi deneyi İncirli taş ocağı ve Yenipazar İlçesinden alınan numunelere uygulanmıştır. Deneyin sonucunda Şekil 6.13.'deki sonuçlar elde edilmiştir. Deneye ait sayısal veriler EK-7'de verilmiştir.

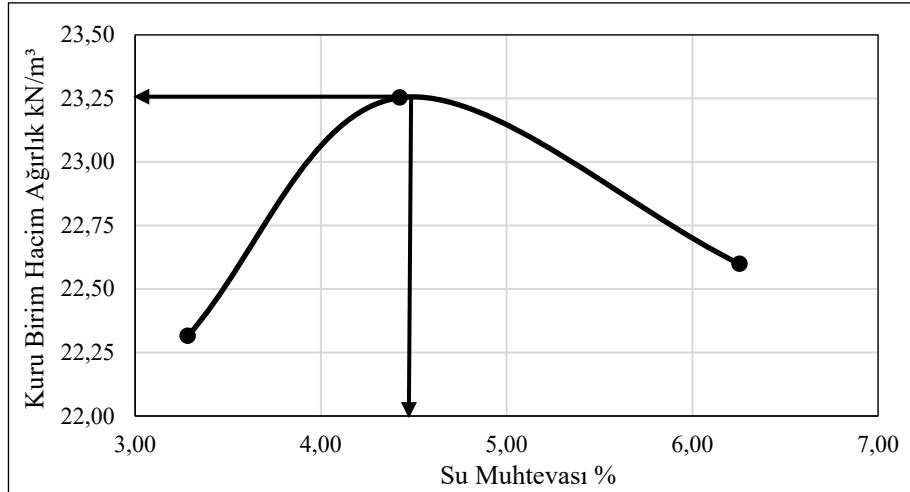


Şekil 6.13. Metilen mavisi deney sonuçları

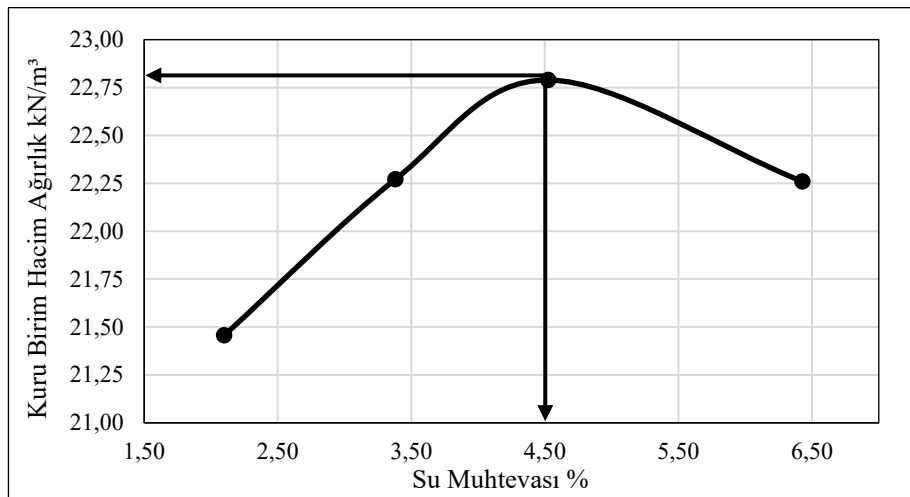
Metilen mavisi deneyi sonuçları İncirli taş ocağı agrega numunesinde 1.00 ve Yenipazar ilçesi mermer ocağı mermer atığında 0.75 olarak elde edilmiştir. KTŞ limit değeri 3.00 olarak belirlemiştir. Analizini yaptığımız iki numunede bu değerin altında kalarak şartname değerini sağlamıştır ve bu kirlilik değerleri ile yol temel malzemesi olarak kullanılmasında bir engel bulunmamaktadır.

6.11. Modifiye Proktor Deneyi

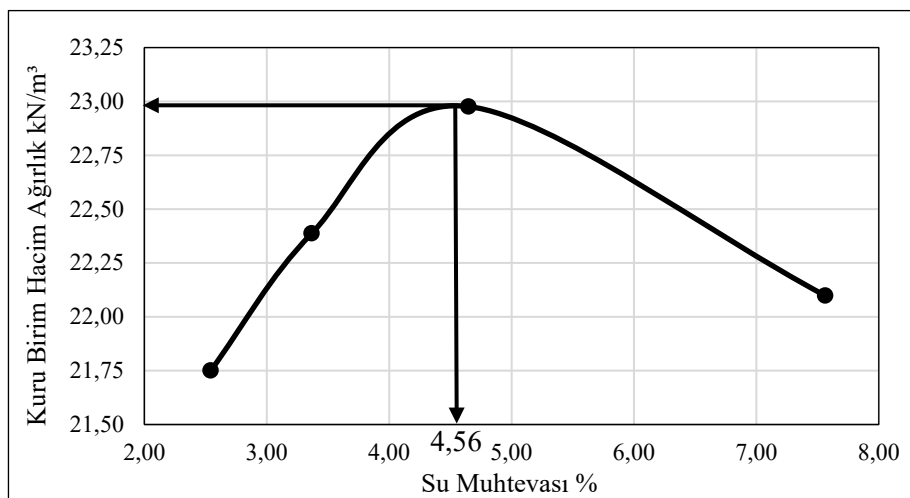
Zeminlerin farklı oranlardaki su içerikleri ile sıkıştırılması sonucunda yapılan bu deneyde zeminlerin kuru birim hacim ağırlığı ve su muhtevaları hesaplanmaktadır. Bu hesaplamalar sonucunda elde edilen değerlerin bir grafik üzerinde kesiştirilmesi ile maksimum kuru birim hacim ağırlık ve optimum su muhtevaları hesaplanmaktadır. İncirli taş ocağı ve Yenipazar İlçesi numuneleri KTŞ yol üst yapısı granüler temel tabakası standartlarına göre 0-38 mm gradasyonlarında hazırlanarak TS-1900-1 standardında anlatıldığı gibi deneye tabi tutulmuş olup sonuçlar Şekil 6.14., Şekil 6.15., Şekil 6.16., Şekil 6.17., Şekil 6.18. ve Çizelge 6.3.'te verilmiştir. Deneylere ait sayısal veriler EK-8'de verilmiştir.



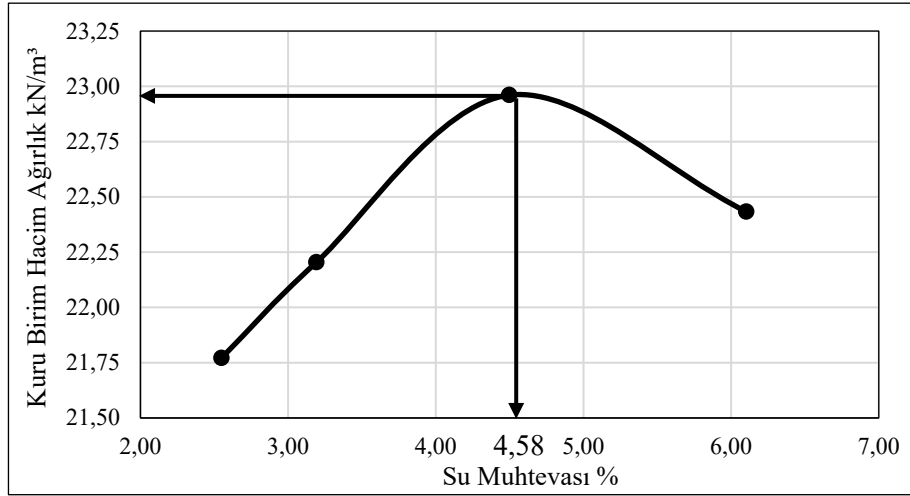
Şekil 6.14. Karışım-1 modifiye proktor deneyi grafiği



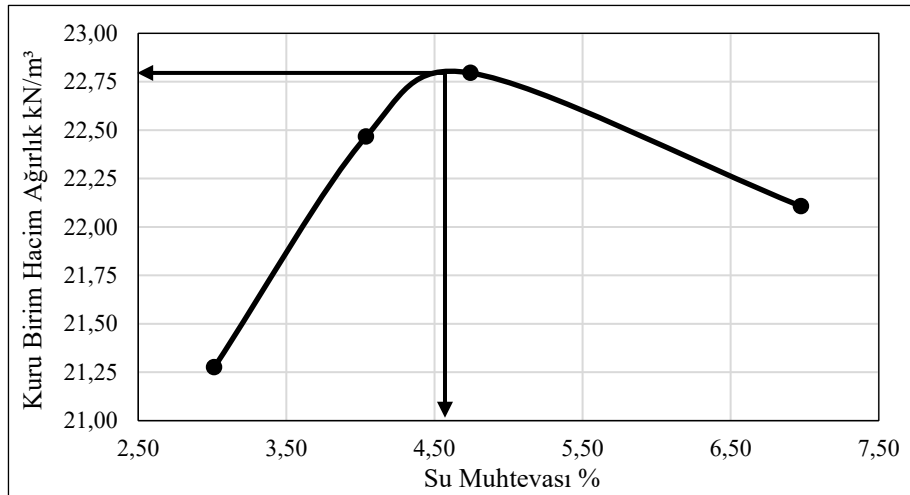
Şekil 6.15. Karışım-2 modifiye proktor deneyi grafiği



Şekil 6.16. Karışım-3 modifiye proktor deneyi grafiği



Şekil 6.17. Karışım-4 modifiye proktor deneyi grafiği



Şekil 6.18. Karışım-5 modifiye proktor deneyi grafiği

Çizelge 6.3. Modifiye proktor deney sonuçları

Karışım	γ_{kmax} (kN/m ³)	w_{opt} (%)
Karışım-1	23.25	4.50
Karışım-2	22.80	4.50
Karışım-3	22.99	4.56
Karışım-4	22.97	4.58
Karışım-5	22.80	4.55

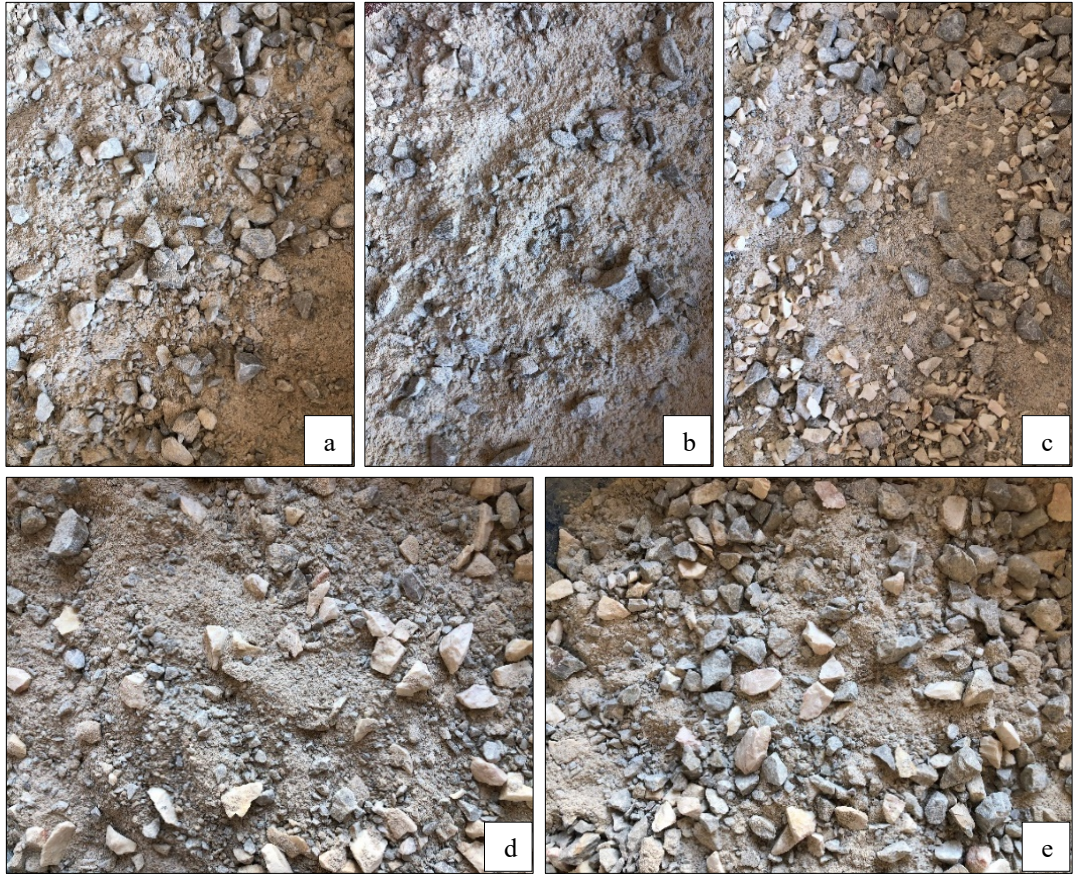
Modifiye proktor deneyi yapılırken malzemeye uygulanan enerjinin danelerde oluşturacağı ufalanma ve parçalanmalar sonucunda malzemede meydana gelebilecek gradasyon değişikliklerini belirleyebilmek için deney öncesinde ve sonrasında elek analizleri yapılmıştır. Bu elek analizi sonucunda elek aralıklarındaki malzeme kayıpları hesaplanmıştır. Daha sonra bu elek aralıklarındaki kayıplar, elek aralıklarının toplam malzeme içindeki oranları ile çarpılarak karışımdaki toplam kayıp hesaplanmıştır (Çizelge 6.4.).

Çizelge 6.4. Modifiye proktor sonrası karışımlarda oluşan kayıplar

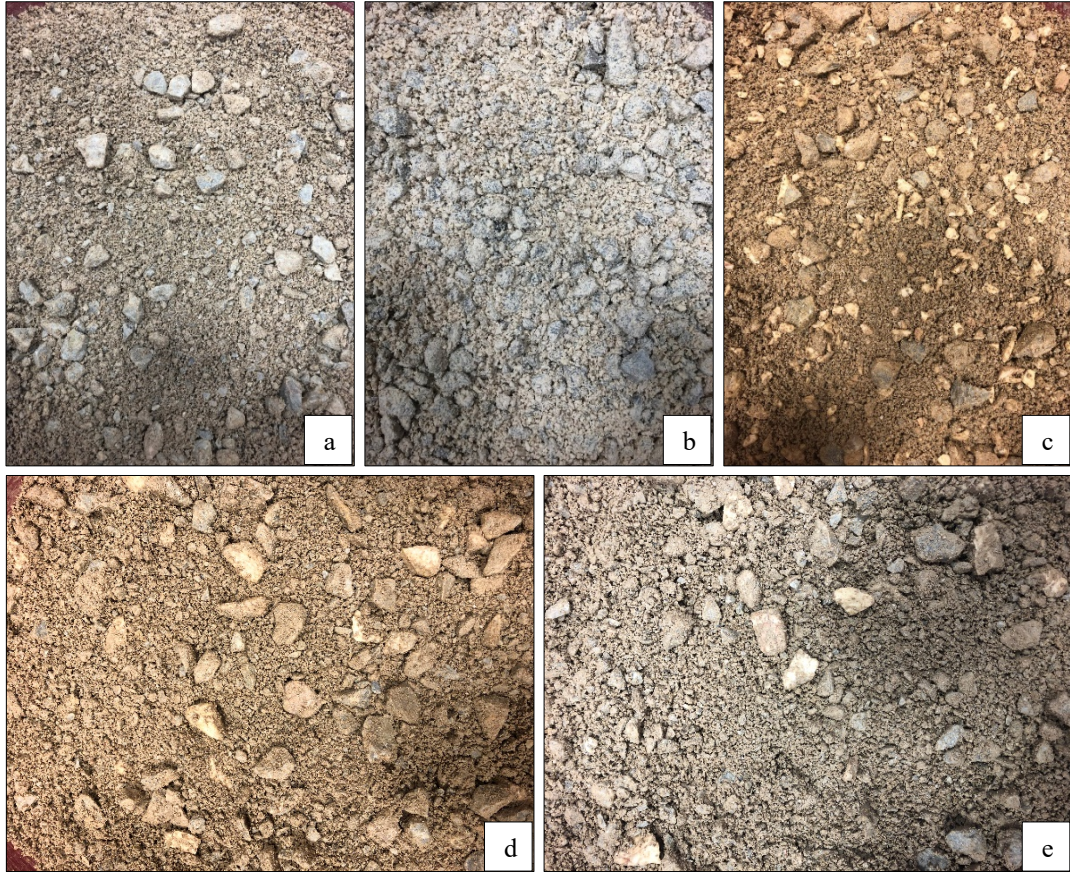
Karışım-1	Karışım-2	Karışım-3	Karışım-4	Karışım-5
11,23	10,14	11,95	10,73	11,43

Tüm karışım tipleri için gerçekleşen kayıplar %10-%12 aralığında gerçekleşmiştir. Bu değerler KTŞ limit değeri olan %20'nin altında kalarak şartname değerini sağlamıştır.

KTŞ yol üst yapısı granüler temel tabakası standartlarına göre 0-38 mm gradasyonlarında hazırlanan kuru karışımlar Şekil 6.19.'da, deney sonucunda bulunan optimum su muhtevaları ile hazırlanan karışımlar ise Şekil 6.20.'de verilmiştir.



Şekil 6.19. Hazırlanan kuru karışımlar (a: Karışım-1, b: Karışım-2, c: Karışım-3, d: Karışım-4, e: Karışım-5)

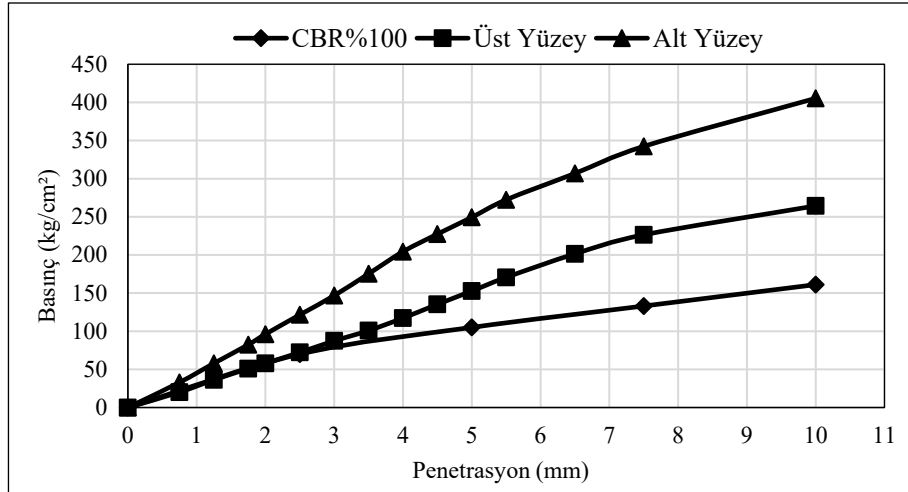


Şekil 6.20. Optimum su muhtevsındaki karışımlar (a: Karışım-1, b: Karışım-2, c:Karışım-3, d: Karışım-4, e: Karışım-5)

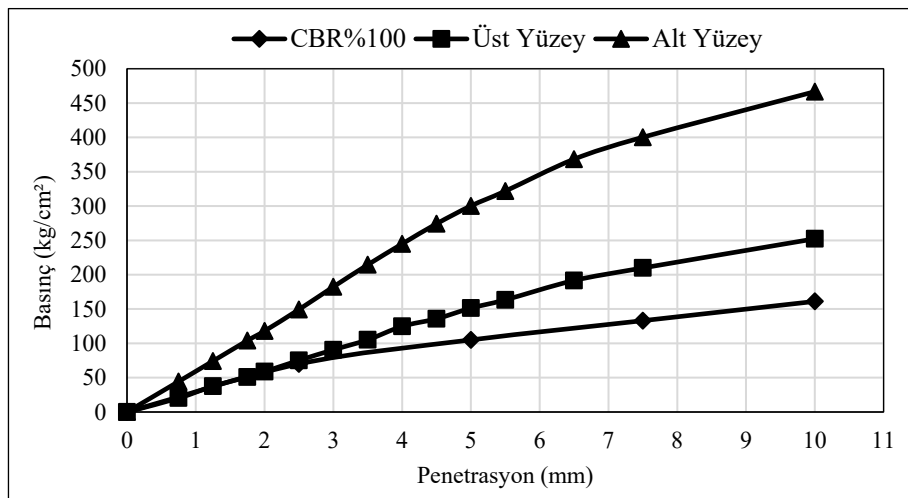
6.12. Kaliforniya Taşıma Oranı (CBR) Deneyi

CBR deneyi zeminlerin üzerine uygulanan yük miktarı ile zeminde meydana getirdiği penetrasyon değeri arasındaki bağıntı kullanarak zeminlerin taşıma oranının bulunmasını sağlamaktadır. KTŞ’de temel malzemesinin modifiye proktor deneyi ile bulunan maksimum kuru birim hacim ağırlığının %98 seviyesinde sıkıştırılan numunelerin yaş CBR değerinin %120’den aşağı olması istenmemektedir. Bunun için ilk olarak numuneler modifiye proktor deneyi sonucunda tespit edilen maksimum kuru birim hacim ağırlığında ve optimum su muhtevsında karışım yapılarak modifiye proktor metodu uygulanarak sıkıştırma işlemi tamamlanmıştır. Sıkıştırılan numuneler üzerinde anlık ve 7 günlük kür sonucunda kuru ve yaş CBR deneyleri uygulanmıştır. 7 günlük kür 21°C’de kapalı ortamda yapılmıştır. Yaş CBR deneyleri 4 gün boyunca su içerisinde bekletilerek suya doygun hale getirilmiştir. Ayrıca bu işlem sırasında malzemelerin suyun etkisi altında şişme yapıp yapmayacağını kontrolü de yapılmıştır ve herhangi bir şişme gözlemlenmemiştir. Suda bekletme işlemi sonrasında numuneler üzerinde CBR deneyi

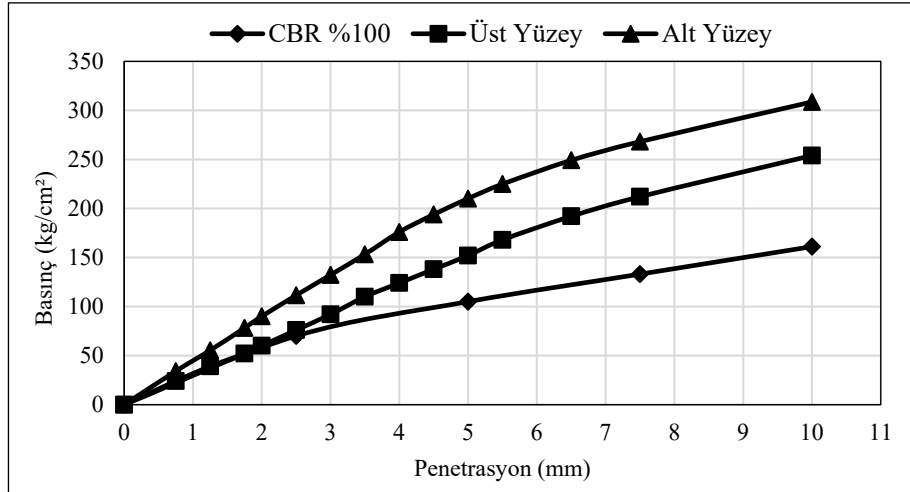
yapılarak şartnamede istenilen %120 değerine ulaşip ulaşmadıkları kontrol edilmiştir. Denede anlık CBR sonuçlarına göre oluşturulan grafikler Şekil 6.21., Şekil 6.22., Şekil 6.23., Şekil 6.24., Şekil 6.25., Şekil 6.26., Şekil 6.27., Şekil 6.28., Şekil 6.29. ve Şekil 6.30'da verilmiştir. Denede sonuçlarına ait sayısal değerler EK-9'da verilmiştir.



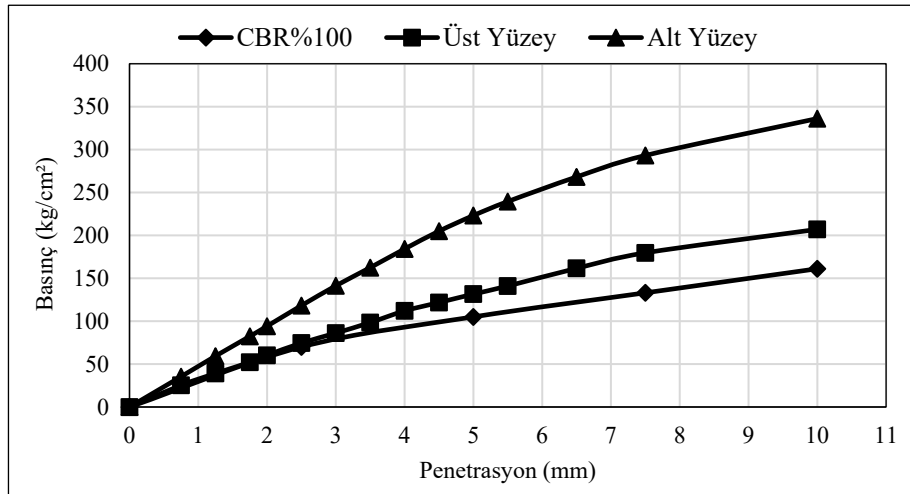
Şekil 6.21. Karışım-1 kuru CBR grafiği (anlık)



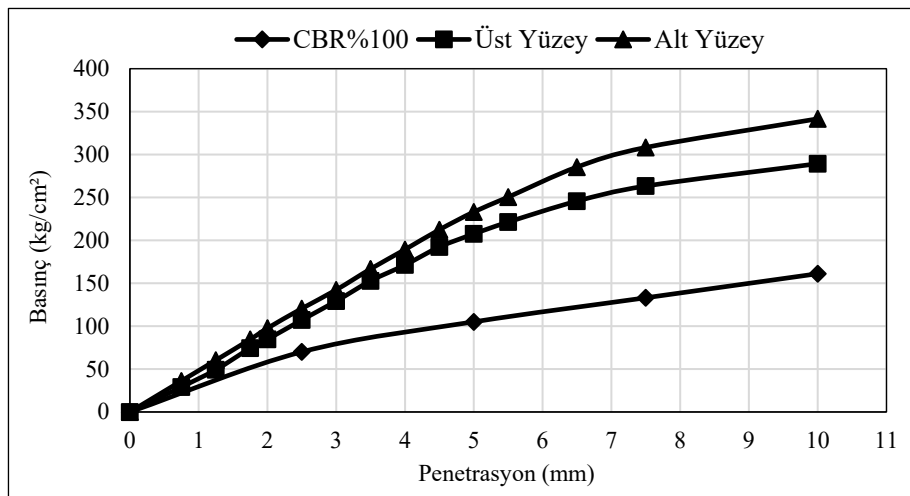
Şekil 6.22. Karışım-1 yaş CBR grafiği (anlık)



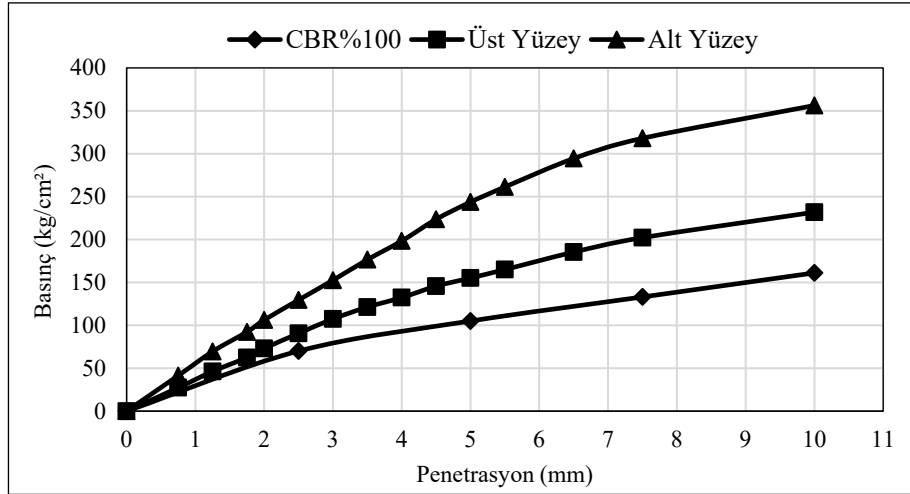
Şekil 6.23. Karışım-2 kuru CBR grafiği (anlık)



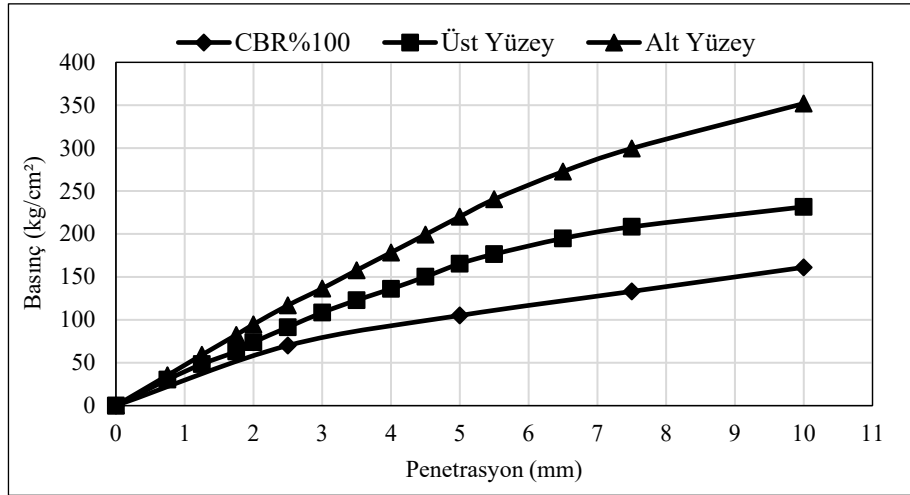
Şekil 6.24. Karışım-2 yaş CBR grafiği (anlık)



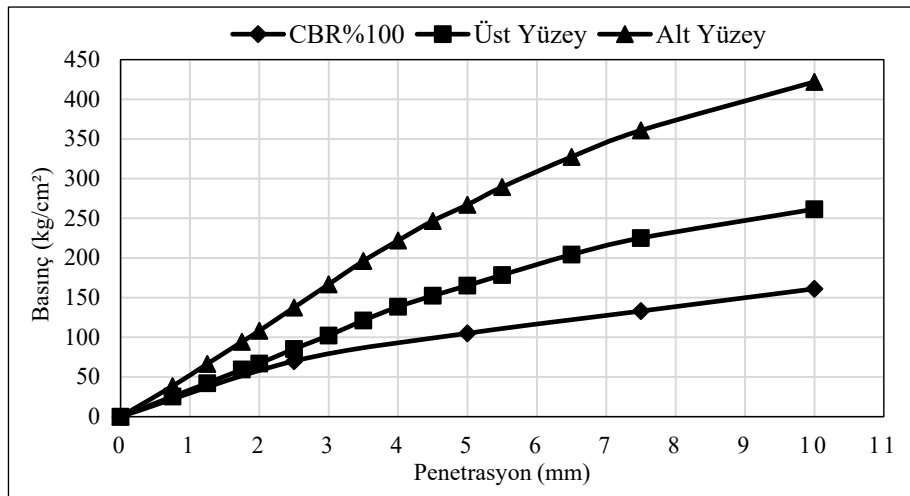
Şekil 6.25. Karışım-3 kuru CBR grafiği (anlık)



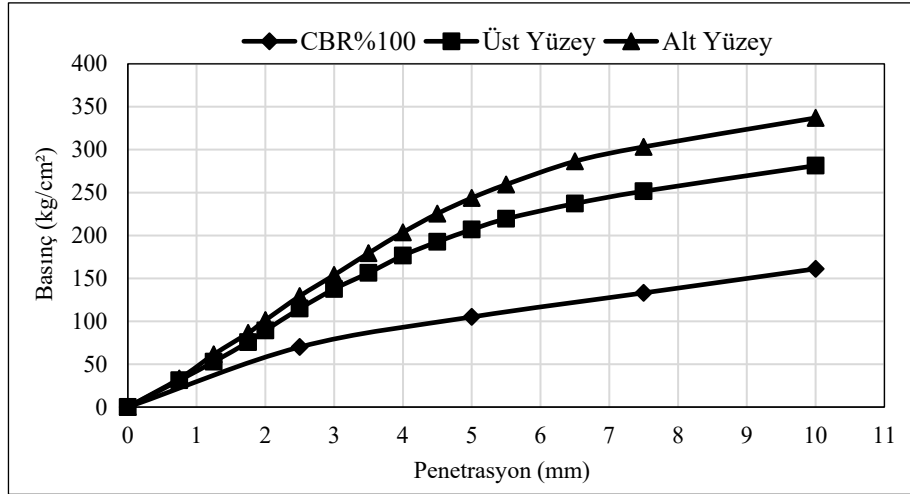
Şekil 6.26. Karışım-3 yaş CBR grafiği (anlık)



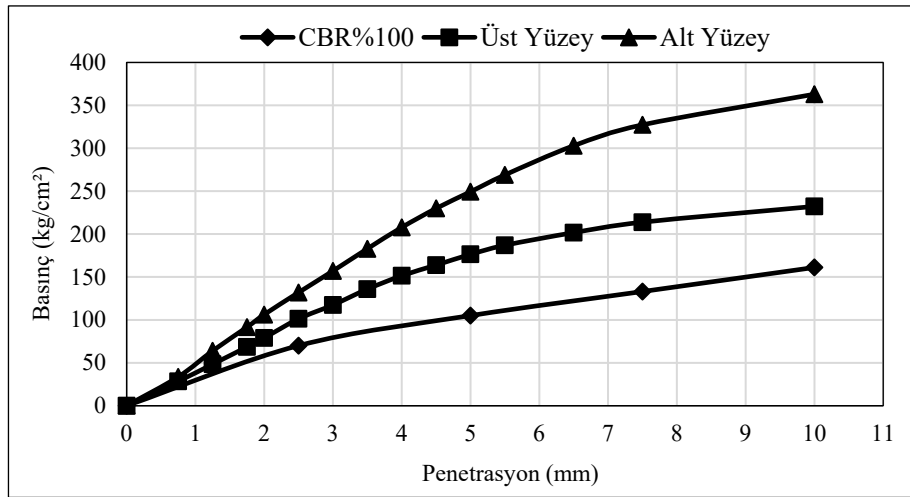
Şekil 6.27. Karışım-4 kuru CBR grafiği (anlık)



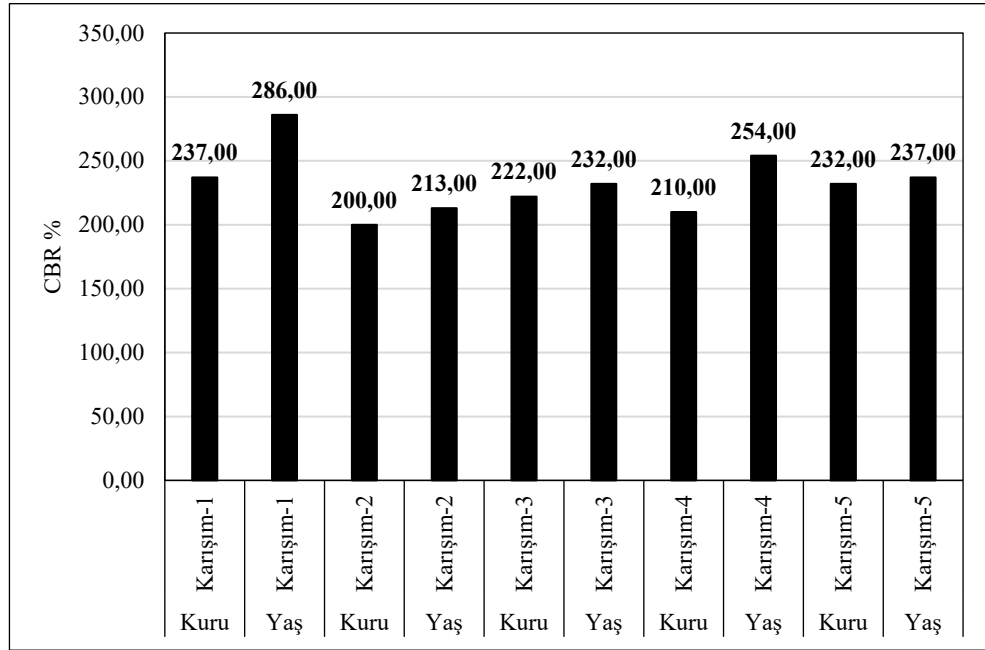
Şekil 6.28. Karışım-4 yaş CBR grafiği (anlık)



Şekil 6.29. Karışım-5 kuru CBR grafiği (anlık)



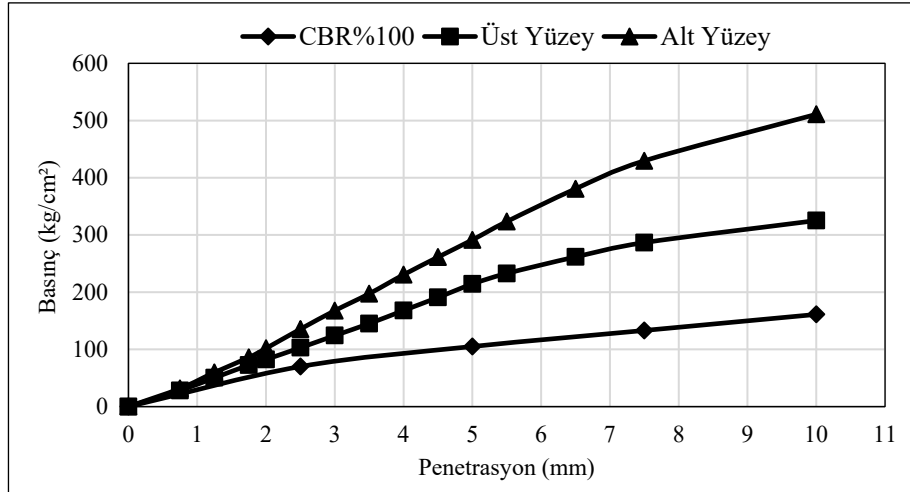
Şekil 6.30. Karışım-5 yaş CBR grafiği (anlık)



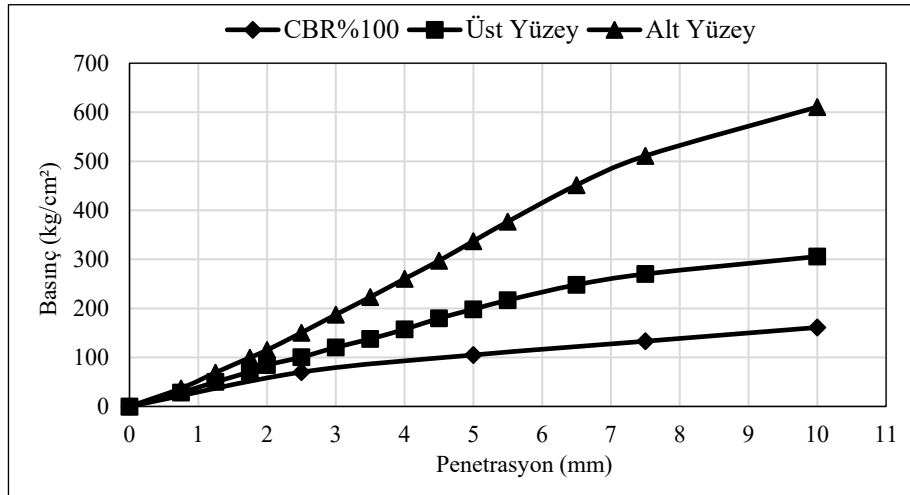
Şekil 6.31. Tüm karışım tiplerinin CBR değerleri (anlık)

Oluşturulan karışım tipleri üzerinde yapılan CBR deneylerinin hepsinde KTŞ’de istenilen CBR %120 değerine ulaşılmış olduğu görülmektedir (Şekil 6. 31.). Sonuçlar değerlendirildiğinde kuru CBR değerleri arasında en yüksek değeri %237 ile Karışım-1 vermiştir. Yaş CBR değerleri karşılaştırıldığında en yüksek değeri %286 ile yine Karışım-1 vermiştir. Karışım-1, Karışım-2, Karışım-3, Karışım-4 ve Karışım-5’in yaş CBR değerleri kuru CBR değerlerinden daha yüksek sonuç vermiştir. Bu karışımlar arasında CBR değerinde, en fazla artış oranı %21 ile Karışım-1 ve Karışım-4’te, en düşük artış oranı ise %2 ile Karışım-5’te yaşanmıştır. Ayrıca numunelerin suya doymun hale gelmesi için 4 gün boyunca suda bekletilmesi sonucunda hiçbir numunede şişme olayı gerçekleşmemiştir.

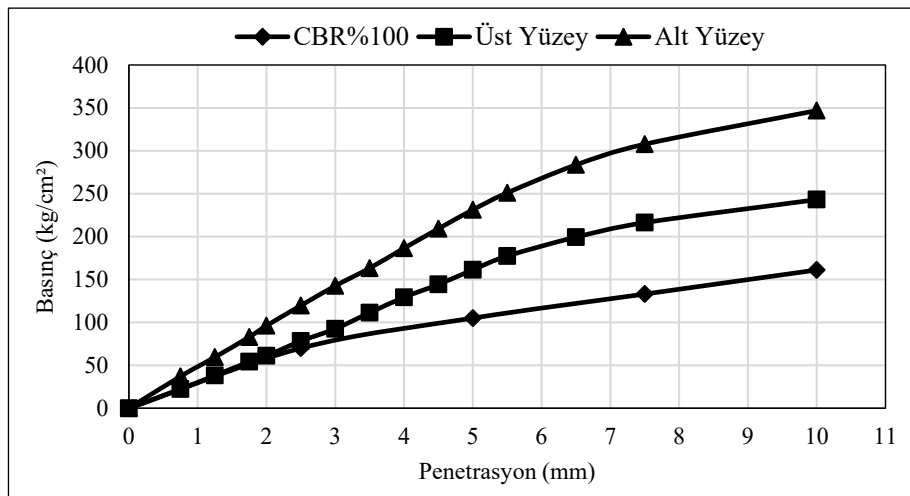
Deneyde 7 günlük kür sonunda elde edilen CBR değerleri ile oluşturulan grafikler Şekil 6.32., Şekil 6.33., Şekil 6.34., Şekil 6.35., Şekil 6.36., Şekil 6.37., Şekil 6.38., Şekil 6.39., Şekil 6.40. ve Şekil 6.41’de verilmiştir. Deney sonuçlarına ait sayısal değerler EK-10’da verilmiştir.



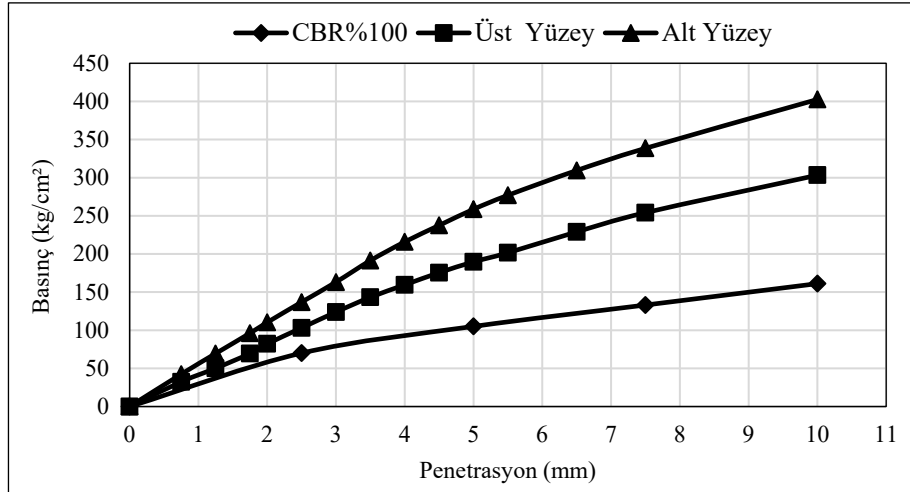
Şekil 6.32. Karışım-1 kuru CBR grafiği (7 gün kür)



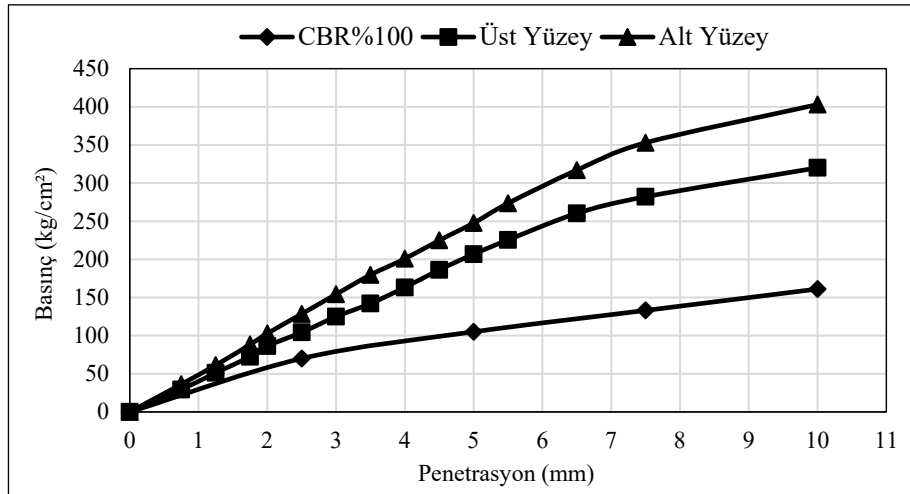
Şekil 6.33. Karışım-1 yaş CBR grafiği (7 gün kür)



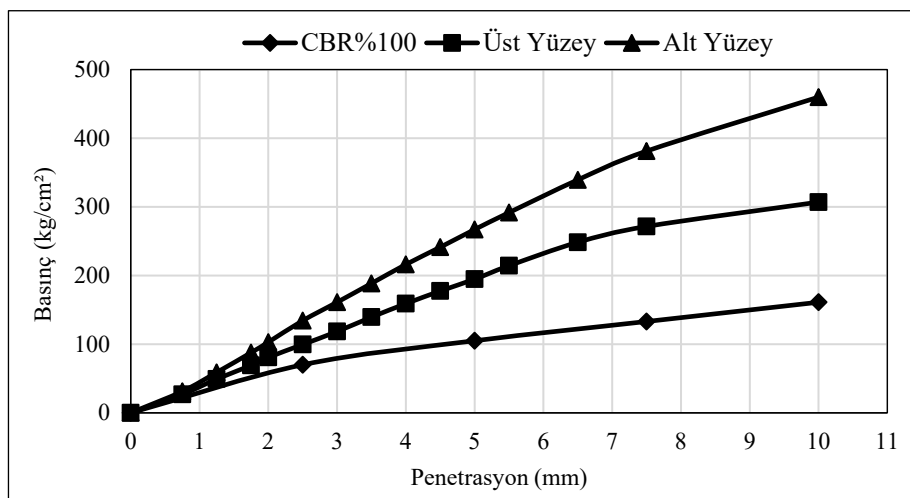
Şekil 6.34. Karışım-2 kuru CBR grafiği (7 gün kür)



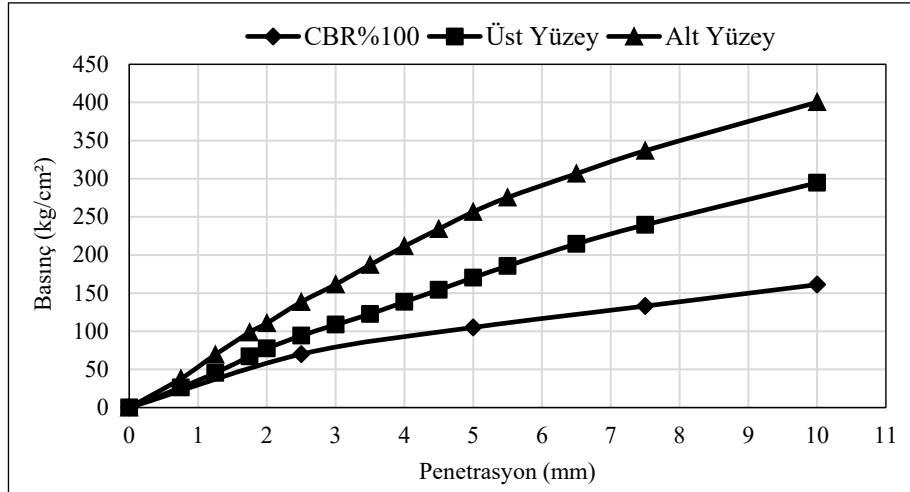
Şekil 6.35. Karışım-2 yaş CBR grafiği (7 gün kür)



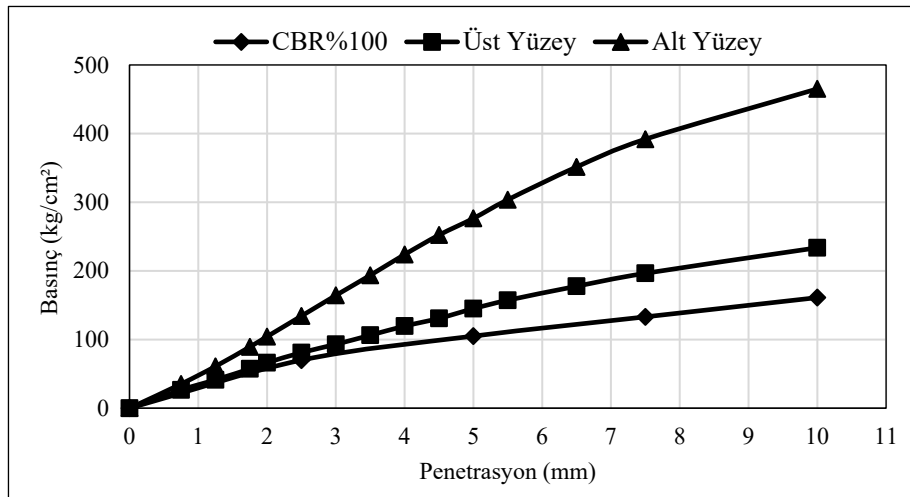
Şekil 6.36. Karışım-3 kuru CBR grafiği (7 gün kür)



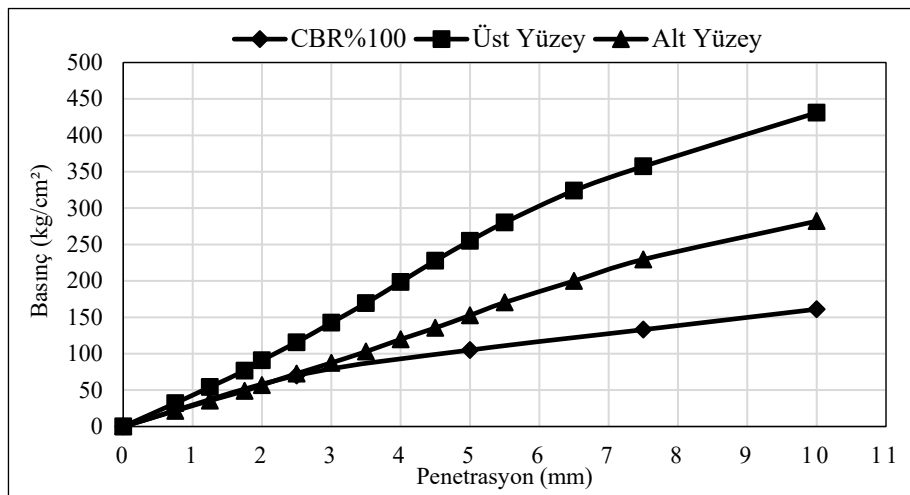
Şekil 6.37. Karışım-3 yaş CBR grafiği (7 gün kür)



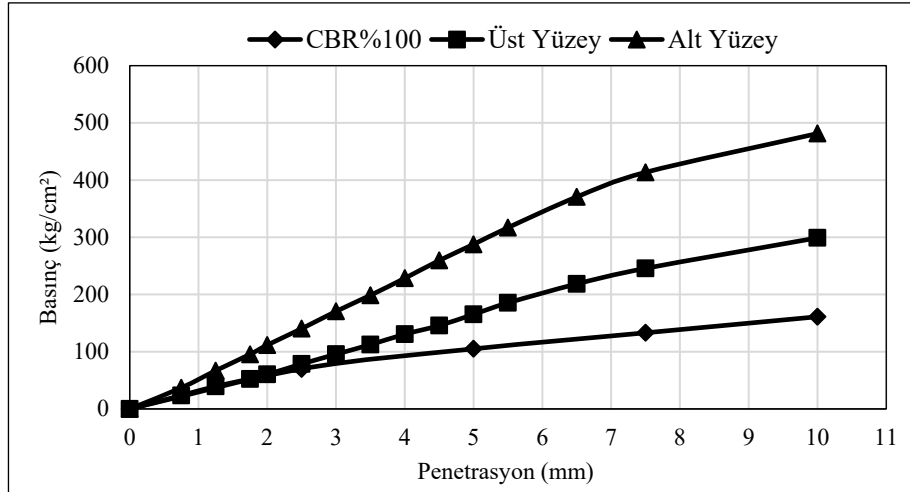
Şekil 6.38. Karışım-4 kuru CBR grafiği (7 gün kür)



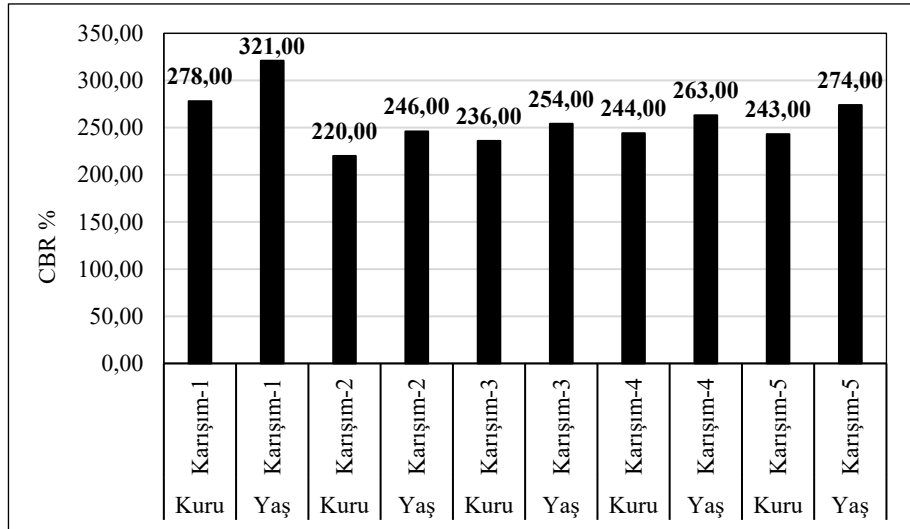
Şekil 6.39. Karışım-4 yaş CBR grafiği (7 gün kür)



Şekil 6.40. Karışım-5 kuru CBR grafiği (7 gün kür)



Şekil 6.41. Karışım-5 yaş CBR grafiği (7 gün kür)

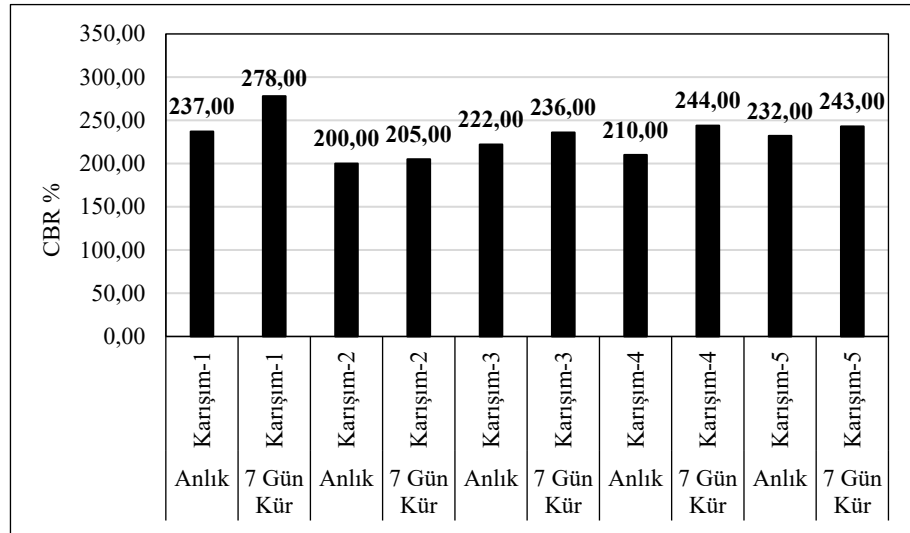


Şekil 6.42. Tüm karışım tiplerinin CBR değerleri (7 gün kür)

Oluşturulan karışım tipleri üzerinde yapılan CBR deneylerinin hepsinde KTŞ'de istenilen CBR %120 değerine ulaşılmış olduğu görülmektedir (Şekil 6. 42.). Sonuçlar değerlendirildiğinde kuru CBR değerleri arasında en yüksek değeri %278 ile Karışım-1 vermiştir. Yaş CBR değerleri karşılaştırıldığında en yüksek değeri %321 ile yine Karışım-1 vermiştir. Karışım-1, Karışım-2, Karışım-3, Karışım-4 ve Karışım-5'in yaş CBR değerleri kuru CBR değerlerinden daha yüksek sonuç vermiştir. Bu karışımlar arasında CBR değerinde, en fazla artış oranı %15 ile Karışım-1'de, en düşük artış oranı ise %8 ile Karışım-3 ve Karışım-4'te yaşanmıştır. Ayrıca numunelerin suya doymun hale gelmesi

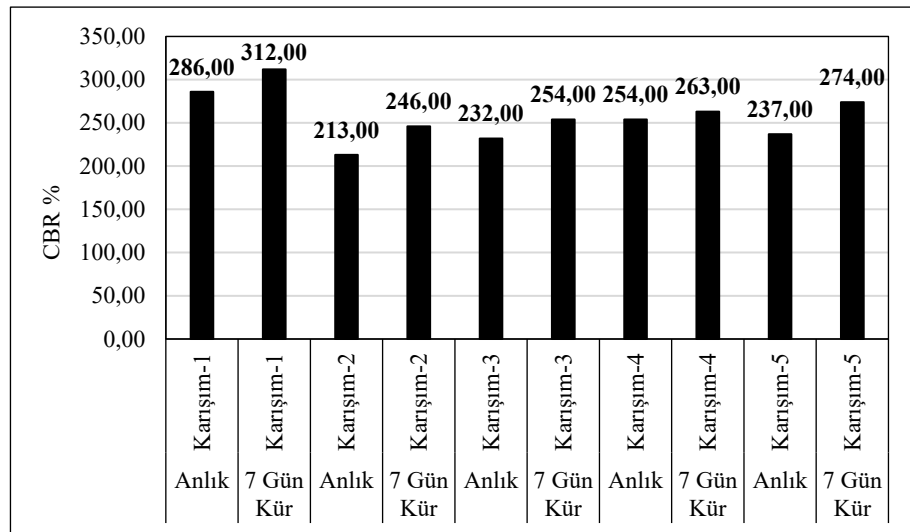
için 4 gün boyunca suda bekletilmesi sonucunda hiçbir numunede şişme olayı gerçekleşmemiştir.

Numunelerin anlık ve 7 günlük kür sonucunda elde edilen kuru ve yaş CBR değerlerinin karşılaştırılması Şekil 6.43. ve Şekil 6.42.'de yapılmıştır.



Şekil 6.43. Kuru CBR anlık ve 7 günlük kür sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 6.43.'te yapılan karşılaştırmada Karışım-1, Karışım-2, Karışım-3 ve Karışım-4 ve Karışım-5 numunelerinin 7 günlük kür sonucundaki CBR değerleri anlık CBR değerlerinden yüksek çıkmıştır.



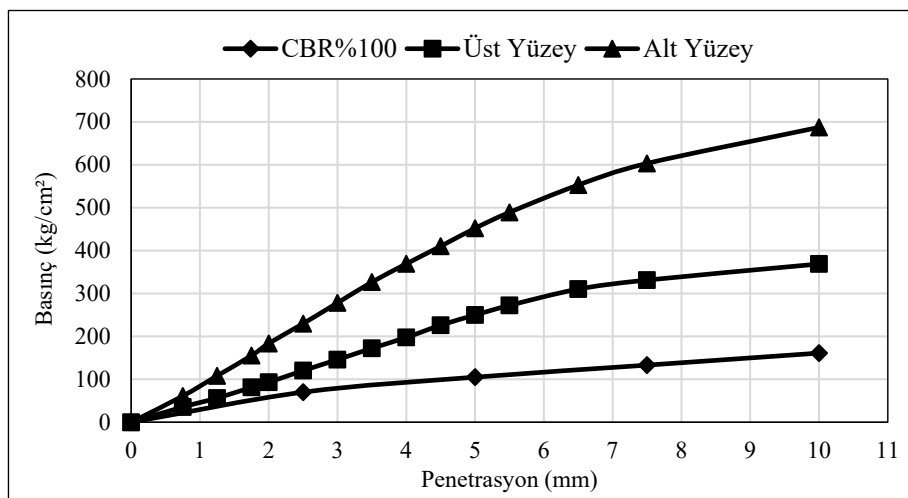
Şekil 6.44. Yaş CBR anlık ve 7 günlük kür sonuçlarının karşılaştırılması

Şekil 6.44.'te yapılan karşılaştırmada tüm karışım tiplerinin 7 günlük kür sonucundaki CBR değerleri anlık CBR değerlerinden yüksek çıkmıştır.

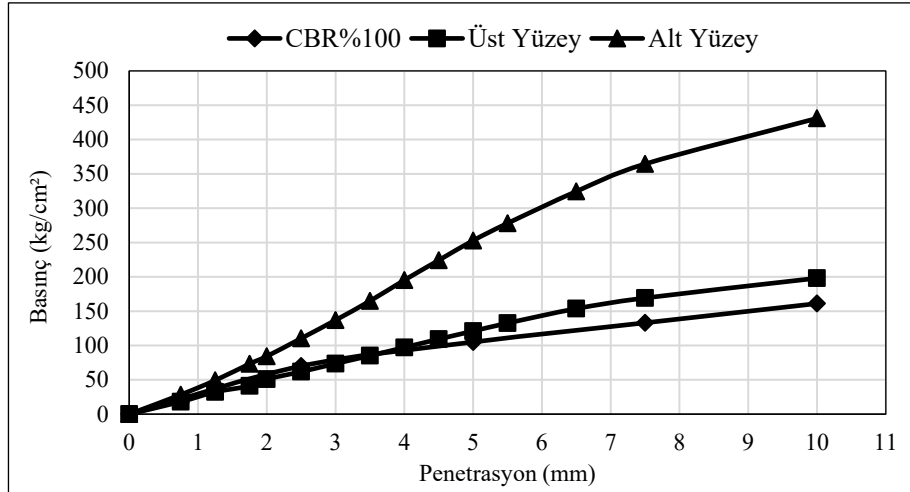
6.13. Donma-Çözünme Deneyi

Belirli bir gradasyona sahip temel tabakasının mekanik özellikleri üzerinde iklim şartlarının etkilerini belirlemek için optimum su muhtevasında ve maksimum kuru birim hacim ağırlıkta numuneler hazırlanmıştır. Bu numuneler iki grup olarak hazırlanmıştır. Birinci grup anlık, ikinci grup ise 7 gün kür uygulanan numunelerden oluşmaktadır. Daha sonra bu iki grup numune ASTM D6035 standardına uygun olarak 4, 12 ve 20 donma ve çözünme çevrimine maruz bırakılmıştır. Her bir çevrim önce 24 saat -19°C ye sonra 24 saat $+21^{\circ}\text{C}$ sıcaklığa maruz bırakılmıştır. 24 saat donma ve 24 saat çözünme işlemi 1 donma-çözünme çevrimine karşılık gelmektedir. Farklı donma-çözünme çevrimleri (4-12-20) sonunda CBR deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneylerden elde edilen sonuçlar, donma-çözünme çevrimine maruz kalmamış numunelerin CBR değerleriyle karşılaştırılıp yorumlanmıştır. Bu çalışmada kapalı sistem donma-çözünme deneyleri uygulanmıştır.

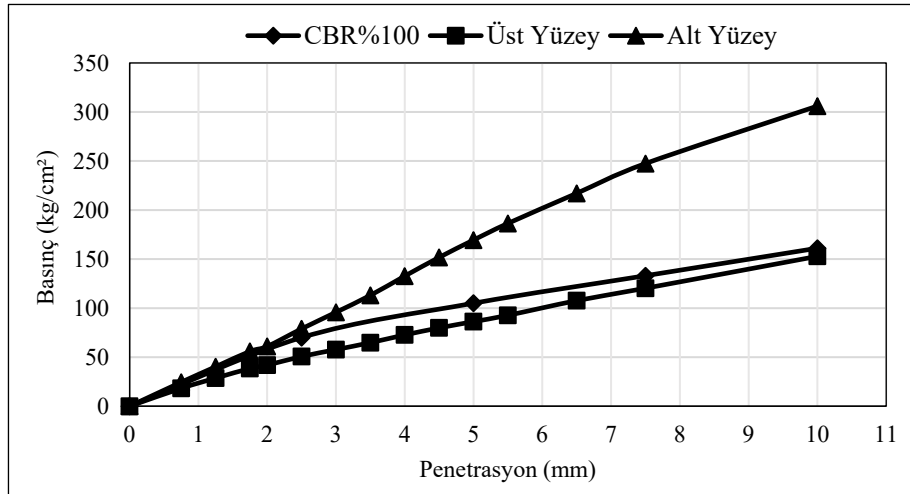
Bu deney kapsamında anlık numuneler üzerinden elde edilen grafikler Şekil 6.45., Şekil 6.46., Şekil 6.47., Şekil 6.48., Şekil 6.49., Şekil 6.50., Şekil 6.51., Şekil 6.52., Şekil 6.53., Şekil 6.54., Şekil 6.55., Şekil 6.56., Şekil 6.57., Şekil 6.58.ve Şekil 6.59.'da verilmiştir. Deney sonuçlarına ilişkin sayısal veriler EK-11'de verilmiştir.



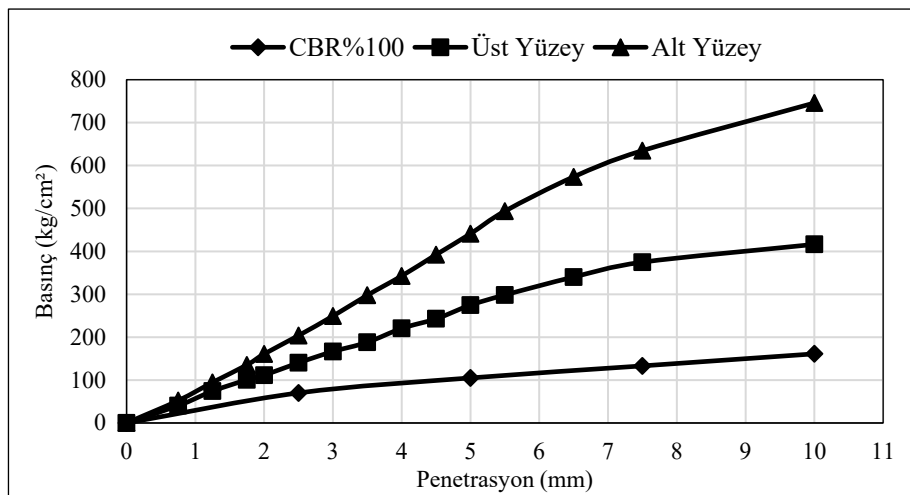
Şekil 6.45. Karışım-1, 4 çevrim donma-çözünme CBR grafiği (anlık)



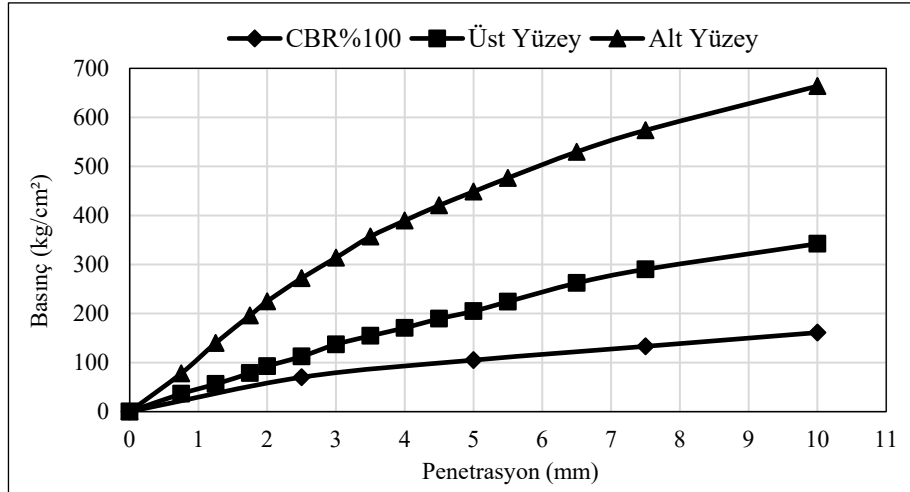
Şekil 6.46. Karışım-1, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık)



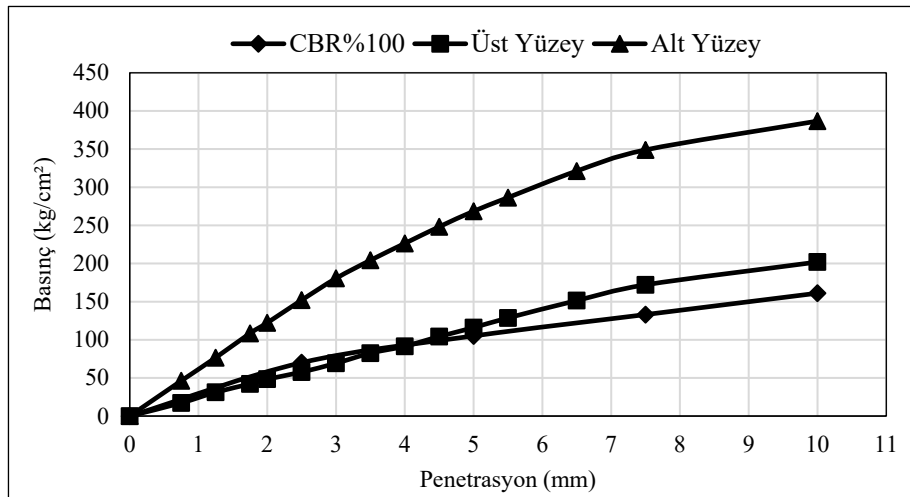
Şekil 6.47. Karışım-1, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık)



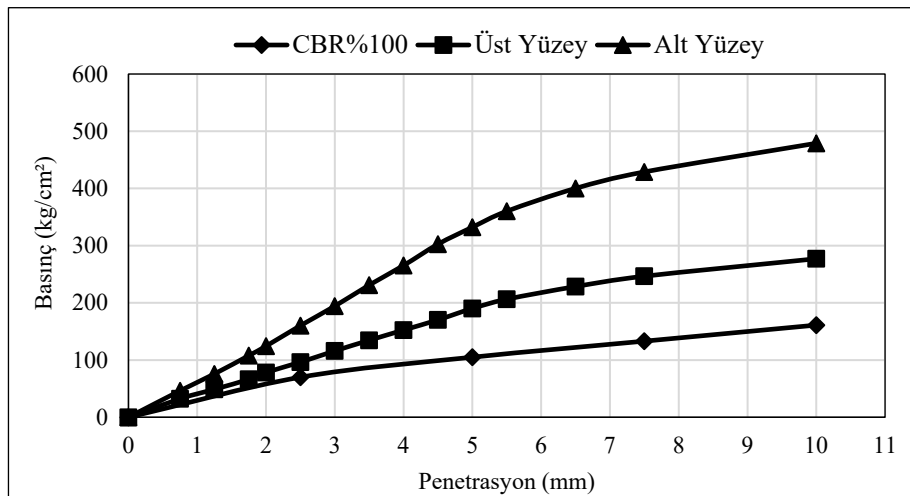
Şekil 6.48. Karışım-2, 4 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık)



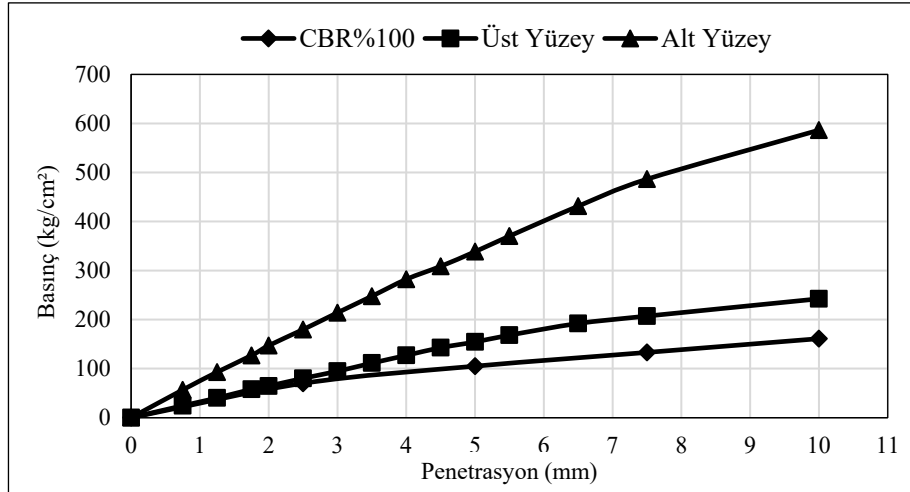
Şekil 6.49. Karışım-2, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık)



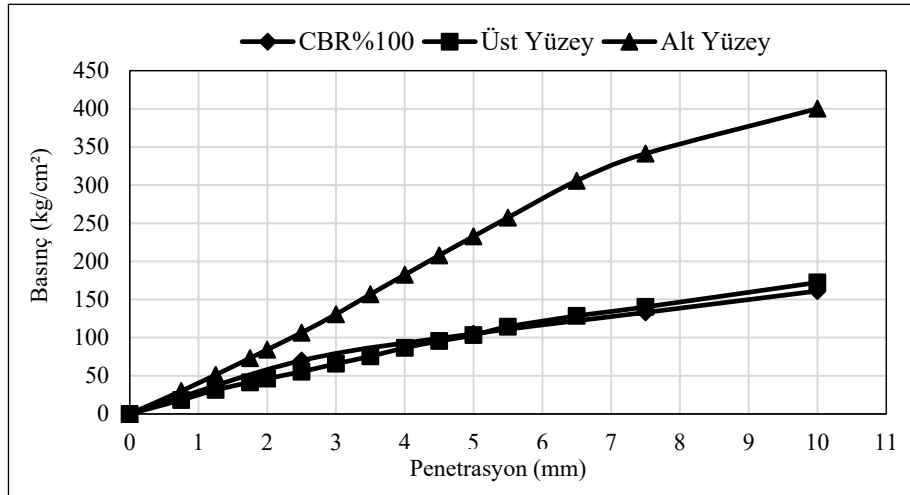
Şekil 6.50. Karışım-2, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık)



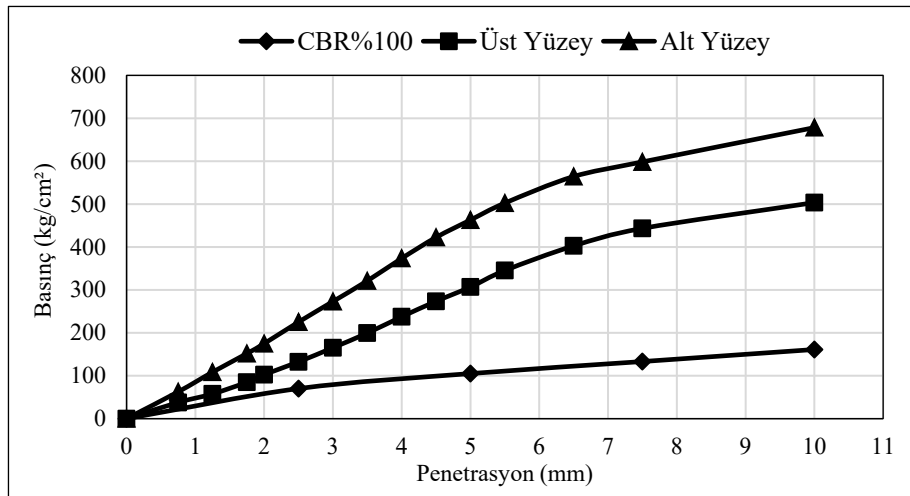
Şekil 6.51. Karışım-3, 4 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık)



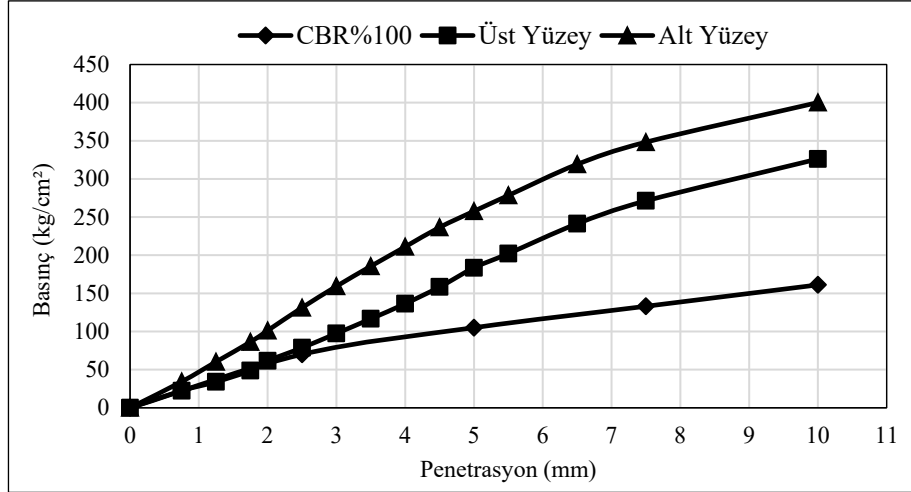
Şekil 6.52. Karışım-3, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık)



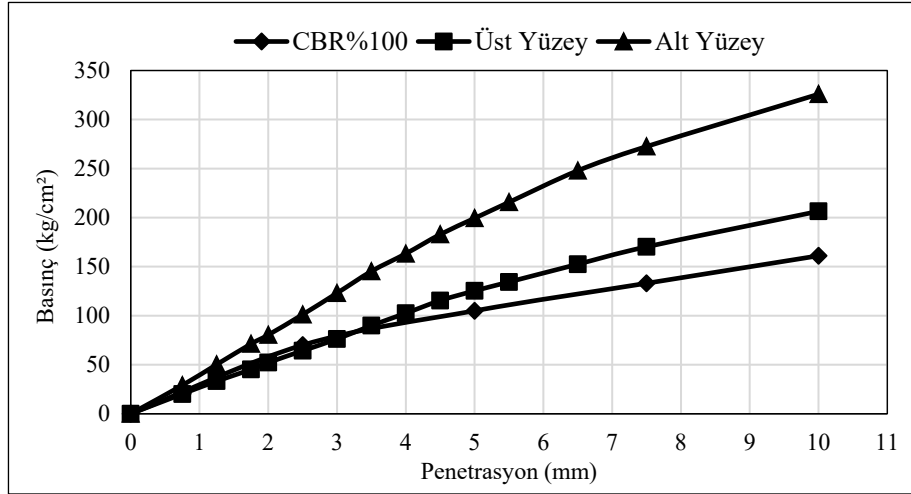
Şekil 6.53. Karışım-3, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık)



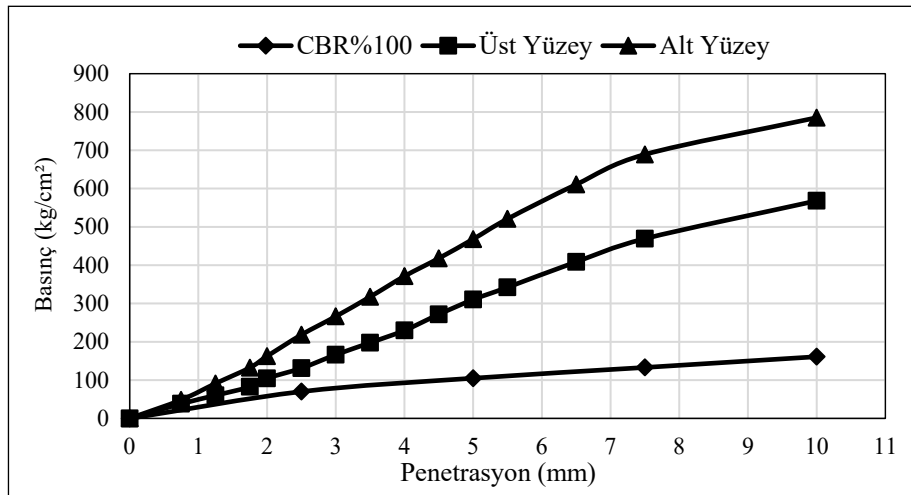
Şekil 6.54. Karışım-4, 4 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık)



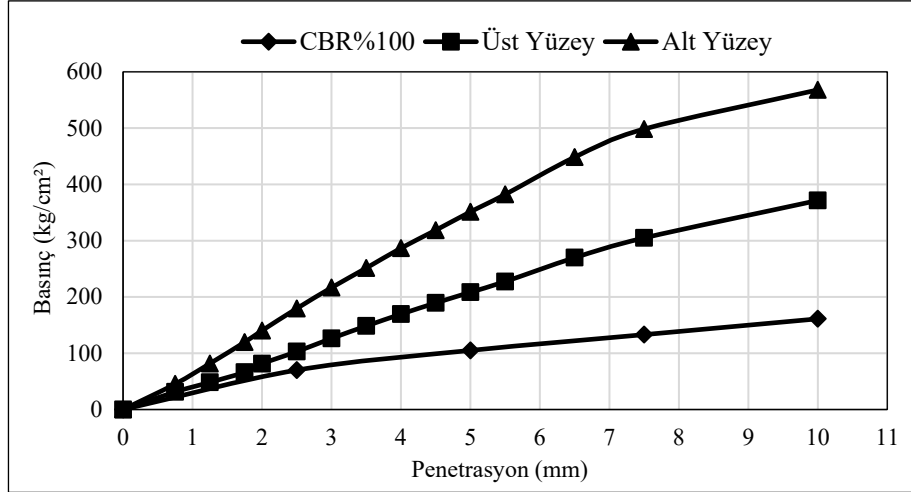
Şekil 6.55. Karışım-4, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık)



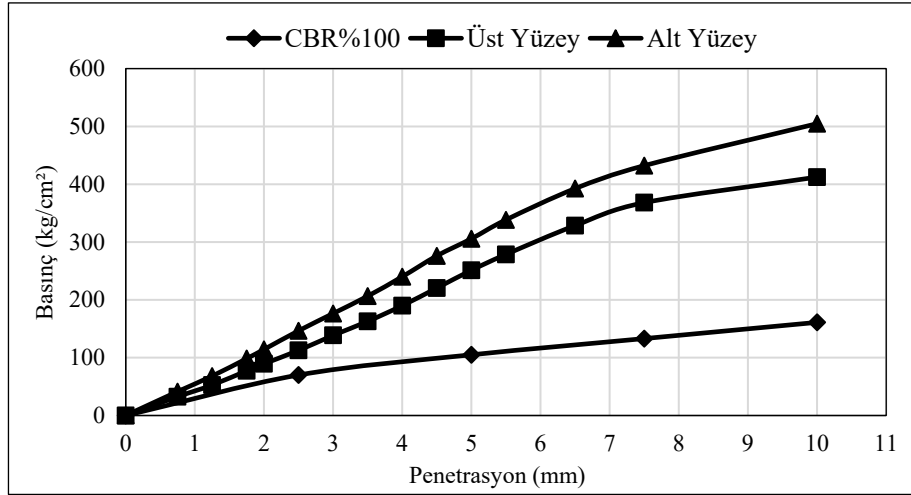
Şekil 6.56. Karışım-4, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık)



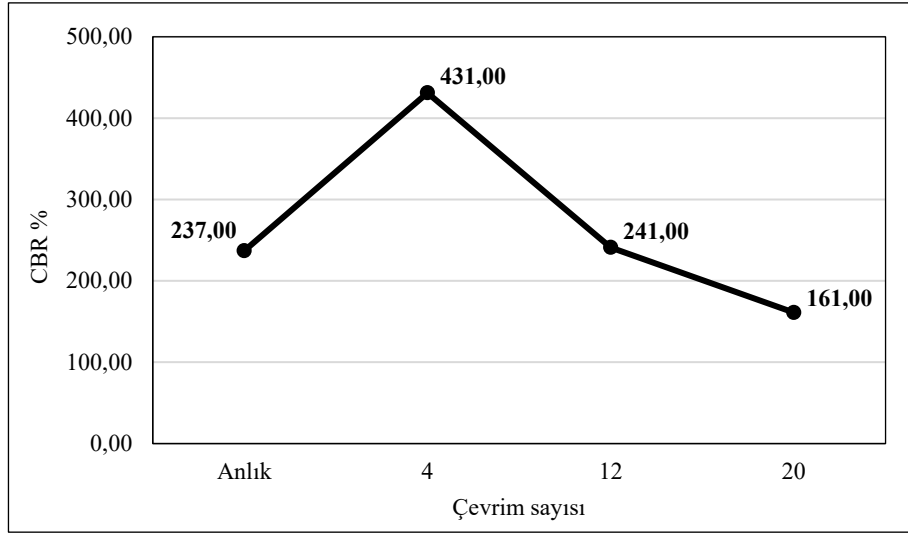
Şekil 6.57. Karışım-5, 4 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık)



Şekil 6.58. Karışım-5, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık)



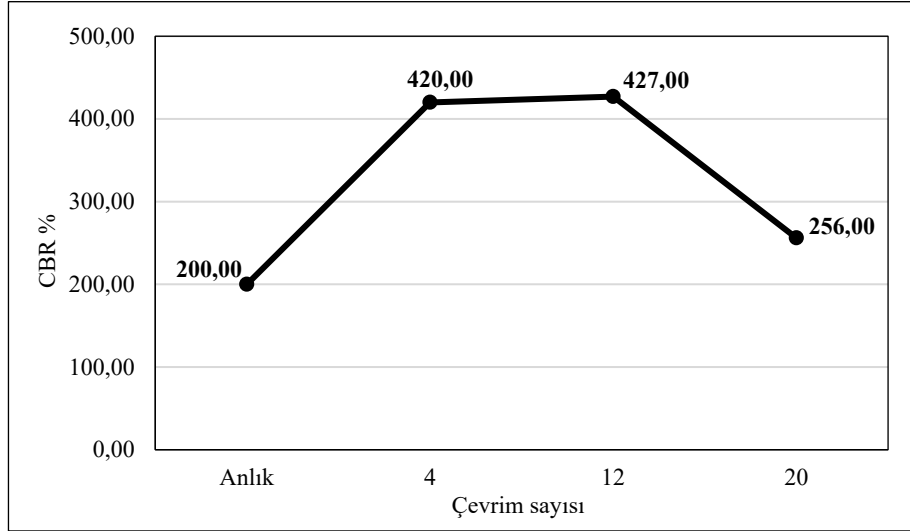
Şekil 6.59. Karışım-5, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (anlık)



Şekil 6.60. Karışım-1 donma-çözünme karşılaştırma (anlık)

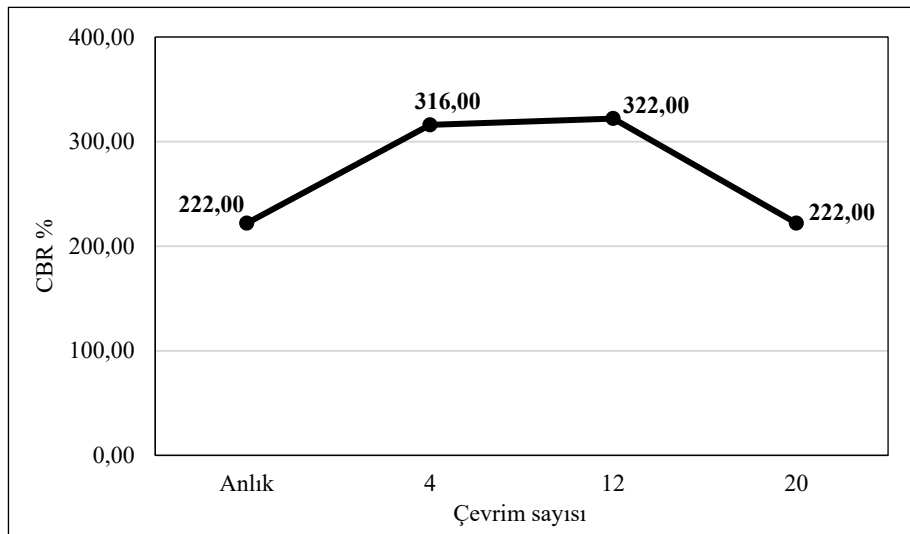
Karışım-1 numunelerinin, değişen çevrim (4, 12, 20) sayılarına bağlı olarak elde edilen CBR sonuçları, anlık CBR sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.60.). 4. çevrimde anlık değere göre yaklaşık %82 oranında artış meydana gelmiş 4. çevrimden sonra artan çevrim sayısı ile CBR değerlerinde düşüş gözlemlenmiş ve 12. çevrim sonunda yeniden anlık CBR değerine ulaşmıştır. 20 çevrim sonunda ise anlık CBR değerinden %32 oranında bir düşüş yaşanmıştır.

Donma-çözünme çevrimlerinin CBR üzerindeki etkileri malzeme içerisindeki danelerin ilk olarak sıkışması ve daha sonra malzemelerde oluşabilecek parçalanmalara bağlı olarak açıklanabilir. Daneler arası sıkılaştırmanın gerçekleştiği çevrim sayılarında CBR değeri artarken, belirli bir çevrimden sonra danelerde meydana gelecek parçalanmalarla CBR değerinde bir düşüş yaşanacaktır. Karışım-1 numuneleri için donma ve çözünme ilk 4 çevrimde sıkışmanın etkisiyle CBR değerini artırmıştır. 12 ve 20 çevrim sonunda CBR’da belirgin bir şekilde düşüş görülmüştür.



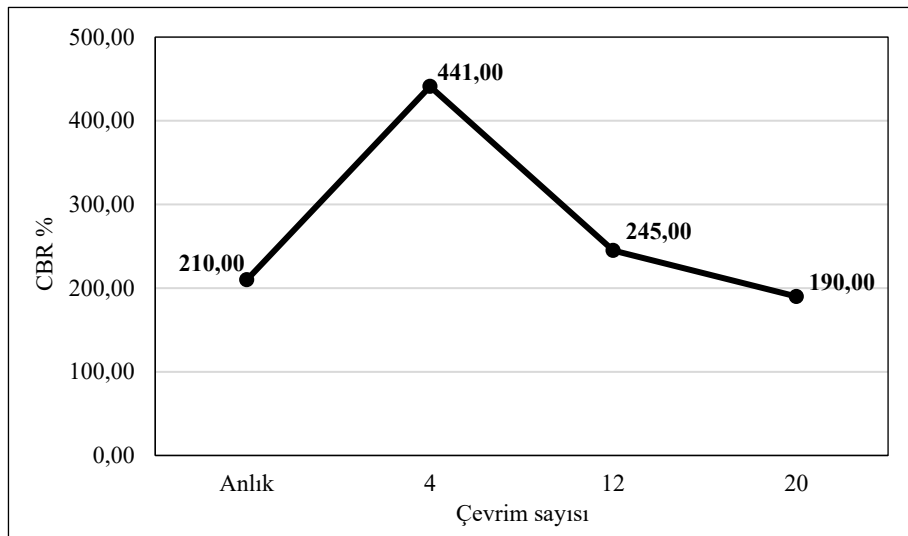
Şekil 6.61. Karışım-2 donma-çözünme karşılaştırma (anlık)

Karışım-2 numunelerinin, değişen çevrim (4, 12, 20) sayılarına bağlı olarak elde edilen CBR sonuçları, anlık CBR sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.61.). 4. çevrimde anlık değere göre yaklaşık %110 oranında artış meydana gelmiş ve 4. çevrimden sonra artış miktarı azalarak 12. çevrimde %427 ile maksimum CBR değerine ulaşmıştır. 12-20 çevrim arası düşüş gerçekleşmiş olmasına rağmen anlık CBR değerinin %28 oranında üzerinde kalmıştır. Karışım-2 numuneleri için donma ve çözünme ilk 12 çevrim sonunda karışımda sıkışmayı artırarak CBR değerinin yükselmesine neden olmuştur. 20 çevrim sonunda ise CBR'da bir düşüş görülmüştür.



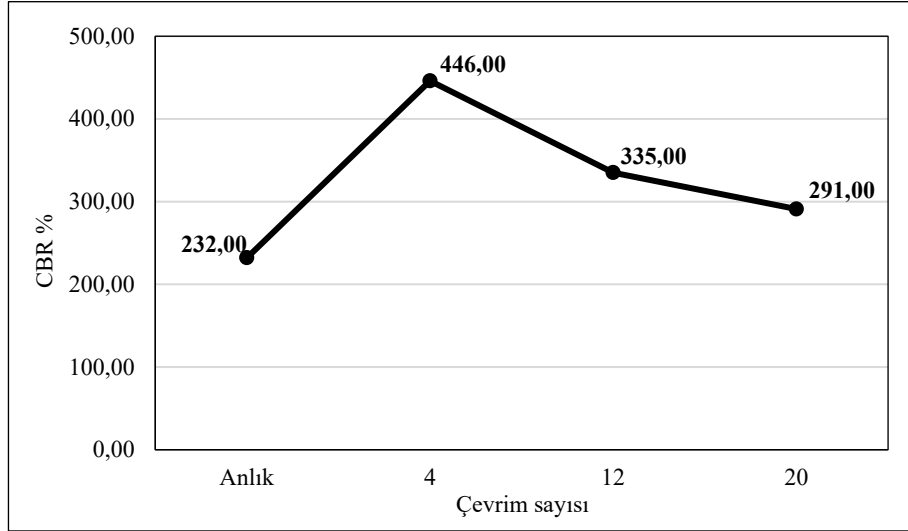
Şekil 6.62. Karışım-3 donma-çözünme karşılaştırma (anlık)

Karışım-3 numunelerinin, değişen çevrim (4, 12, 20) sayılarına bağlı olarak elde edilen CBR sonuçları, anlık CBR sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.62.). 4. çevrimde anlık değere göre yaklaşık %42 oranında artış meydana gelmiş ve 4. çevrimden sonra artış miktarı azalarak 12. çevrimde %322 değeri ile maksimum CBR değerine ulaşmıştır. 12-20 çevrim arası düşüş gerçekleşmiş ve yeniden anlık CBR değerine ulaşılmıştır. Karışım-3 numuneleri için donma ve çözünme ilk 12 çevrim sonunda karışımda sıkışmayı artırarak CBR değerinin yükselmesine sebep olmuştur. 20 çevrim sonunda ise CBR'da belirgin bir şekilde düşüş görülmüştür.



Şekil 6.63. Karışım-4 donma-çözünme karşılaştırma (anlık)

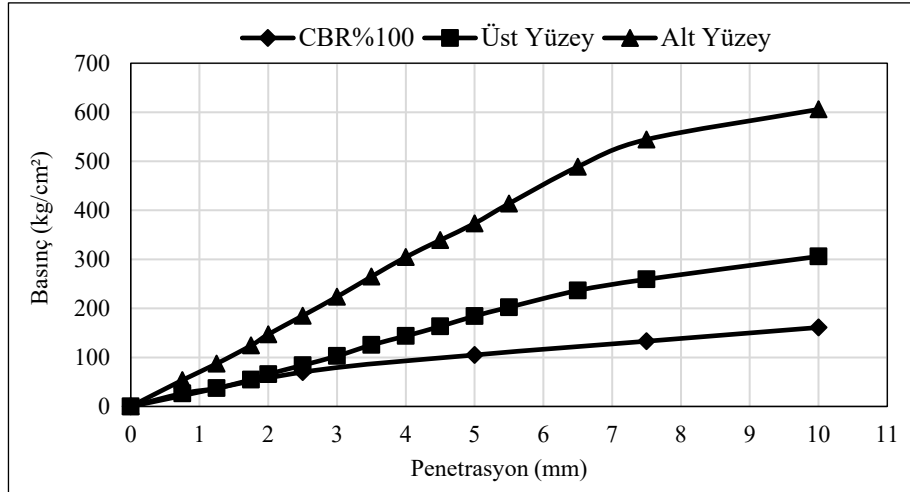
Karışım-4 numunelerinin, değişen çevrim (4, 12, 20) sayılarına bağlı olarak elde edilen CBR sonuçları, anlık CBR sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.63.). 4. çevrimde anlık değere göre yaklaşık %121 oranında artış meydana gelmiş 4. çevrimden sonra artan çevrim sayısı ile CBR değerlerinde düşüş gözlemlenmiş ve 12. çevrim sonunda anlık CBR değerinin %23 oranında üzerinde kalmıştır. 12-20 çevrim arasında bu düşüş sürmüştür ve anlık CBR değerinden %5 daha düşük bir değerle sonuçlanmıştır. Karışım-4 numuneleri için donma ve çözünme ilk 4 çevrim sonunda karışımda sıkışmayı artırarak CBR değerinin yükselmesine sebep olmuştur. 20 çevrim sonunda ise CBR'da belirgin bir düşüş görülmüştür.



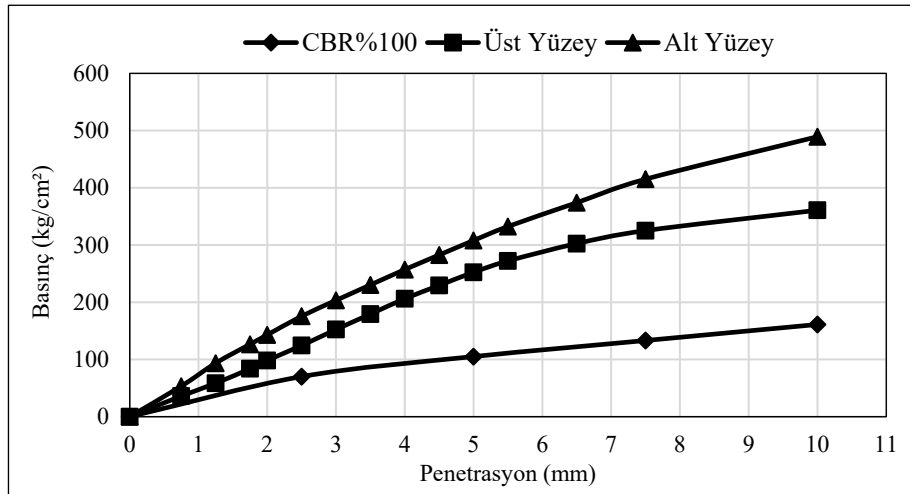
Şekil 6.64. Karışım-5 donma-çözünme karşılaştırma (anlık)

Karışım-5 numunelerinin, değişen çevrim (4, 12, 20) sayılarına bağlı olarak elde edilen CBR sonuçları, anlık CBR sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.64.). 4. çevrimde anlık değere göre yaklaşık %92 oranında artış meydana gelmiş 4. çevrimden sonra artan çevrim sayısı ile CBR değerlerinde düşüş gözlemlenmiş ve 12. çevrim sonunda anlık CBR değerinin %44 oranında üzerinde kalmıştır. 12-20 çevrim arasında bu düşüş sürmüştür ve anlık CBR değerinin %25 oranında üzerinde kalmıştır. Karışım-5 numuneleri için 4 çevrim sonunda karışımda sıkışmayı artırarak CBR değerinin yükselmesine sebep olmuştur. 20 çevrim sonunda ise CBR’da bir düşüş görülmüştür.

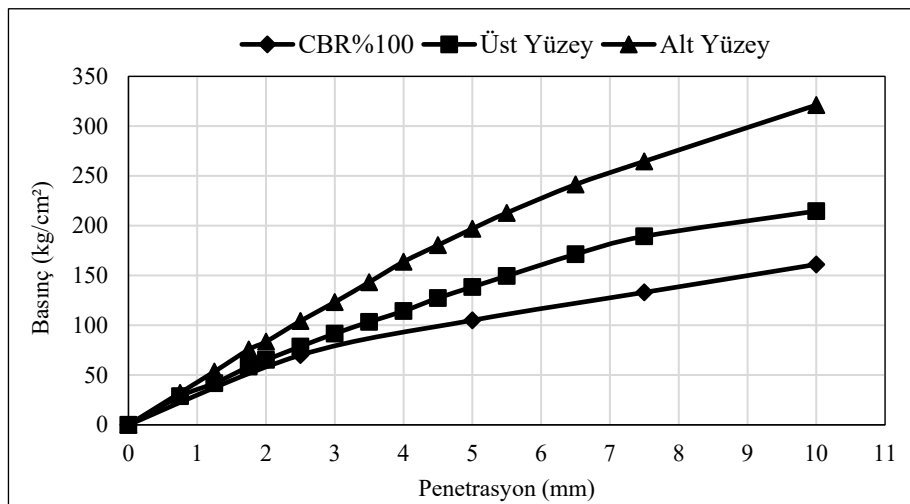
Deney kapsamında 7 gün kür uygulanan numuneler üzerinden elde edilen grafikler Şekil 6.65., Şekil 6.66., Şekil 6.67., Şekil 6.68., Şekil 6.69., Şekil 6.70., Şekil 6.71., Şekil 6.72., Şekil 6.73., Şekil 6.74., Şekil 6.75., Şekil 6.76., Şekil 6.77., Şekil 6.78.ve Şekil 6.79.’da verilmiştir. Deney sonuçlarına ilişkin sayısal veriler EK-12’de verilmiştir.



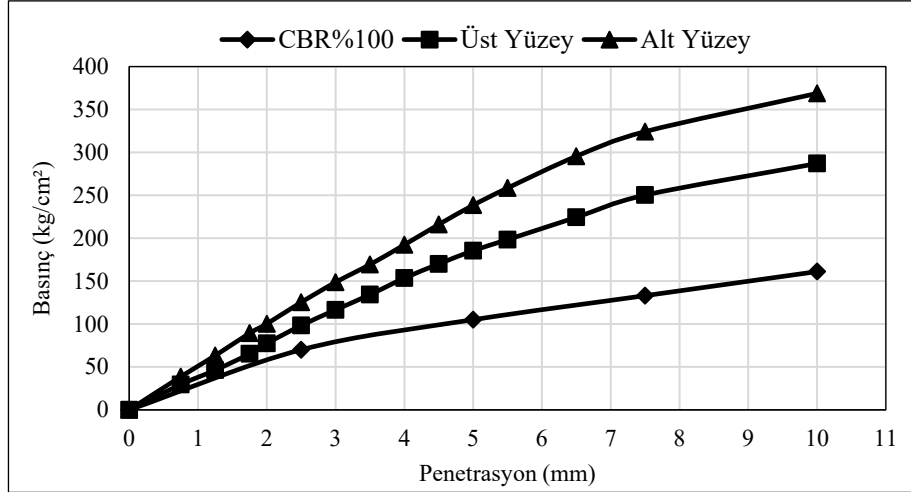
Şekil 6.65. Karışım-1, 4 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür)



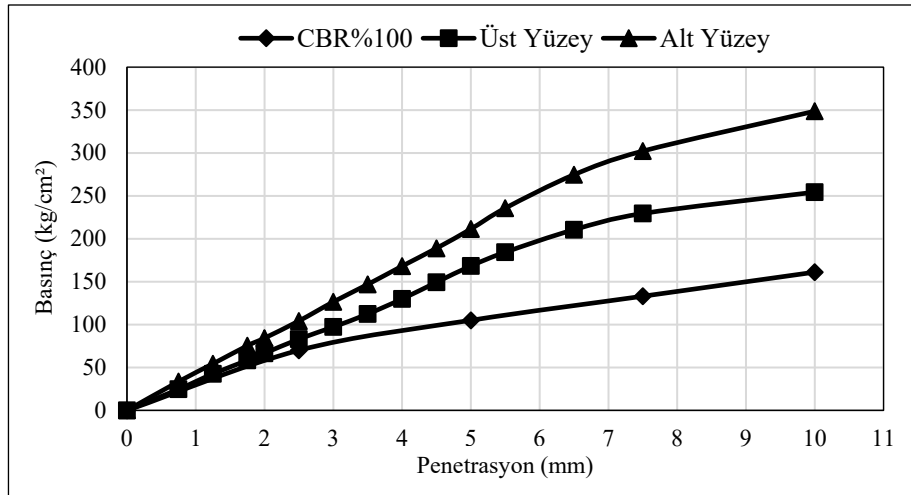
Şekil 6.66. Karışım-1, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür)



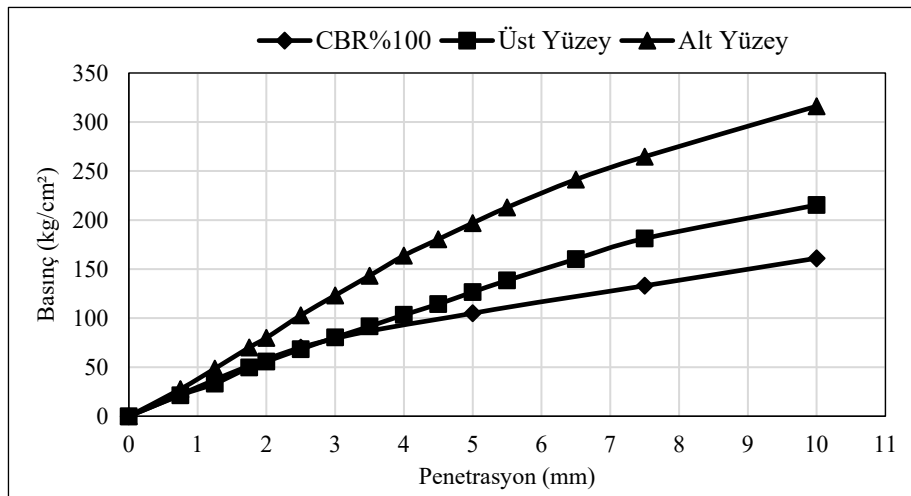
Şekil 6.67. Karışım-1, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür)



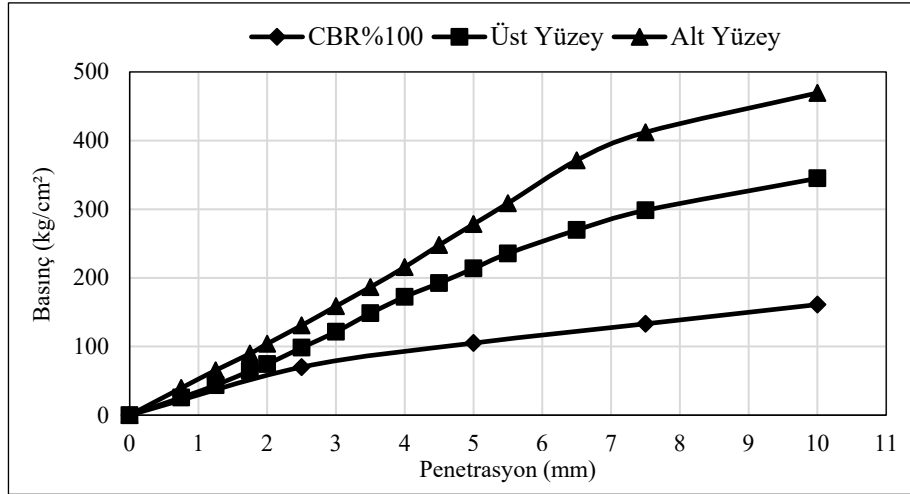
Şekil 6.68. Karışım-2, 4 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür)



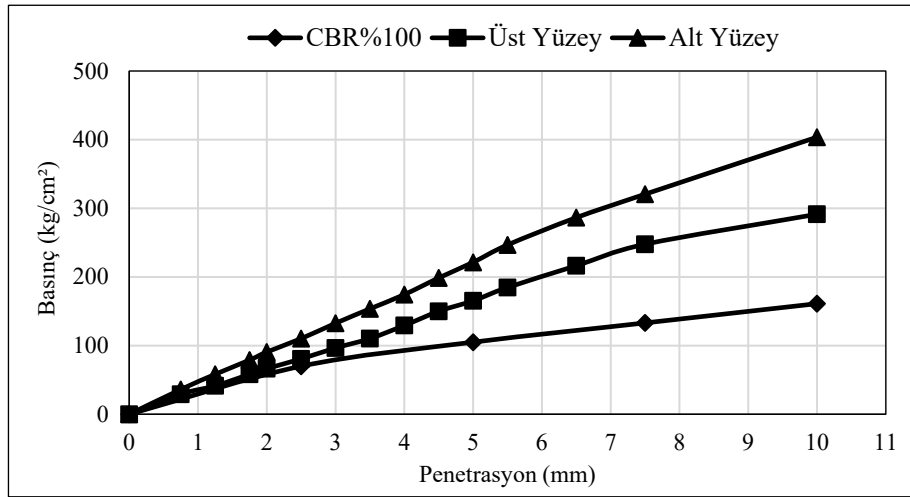
Şekil 6.69. Karışım-2, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür)



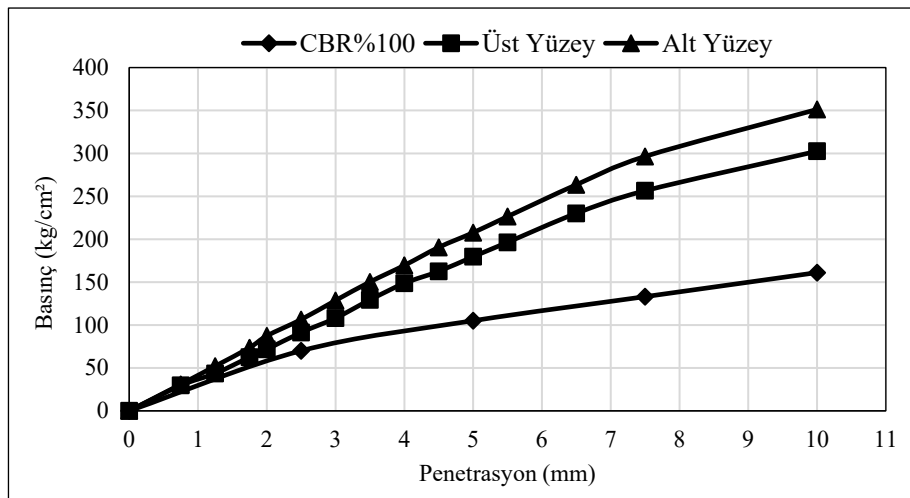
Şekil 6.70. Karışım-2, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür)



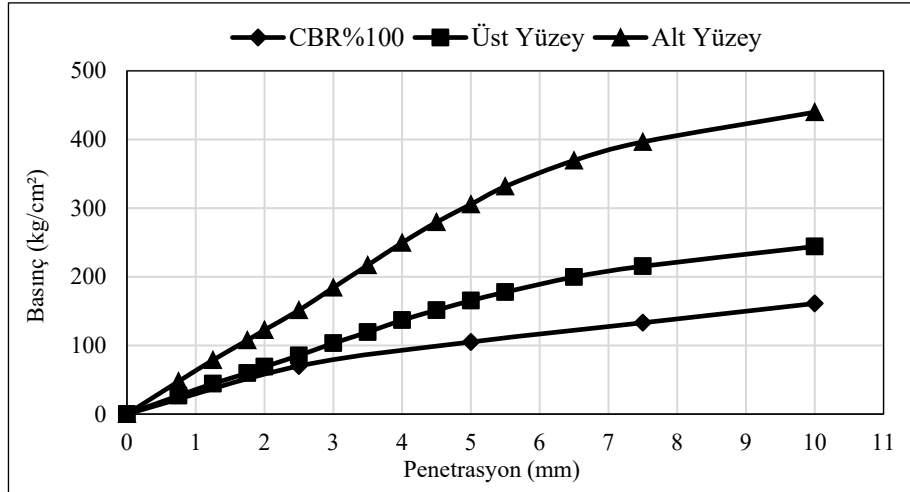
Şekil 6.71. Karışım-3, 4 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür)



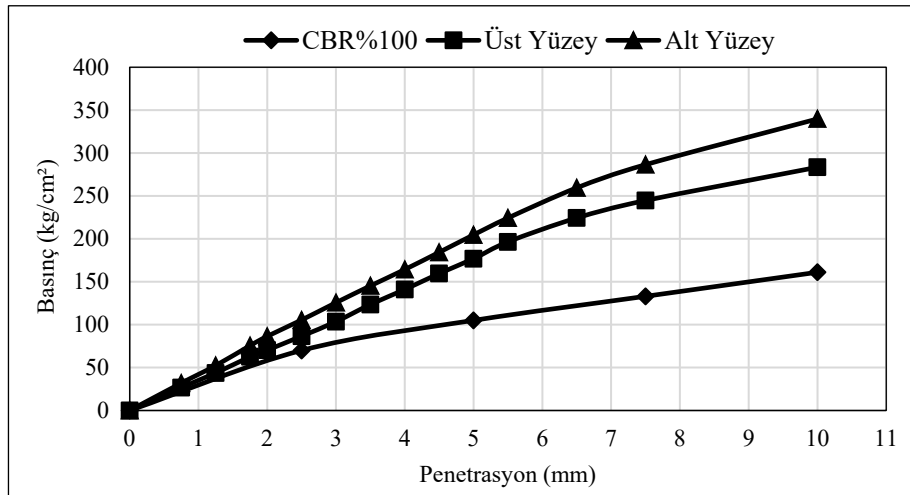
Şekil 6.72. Karışım-3, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür)



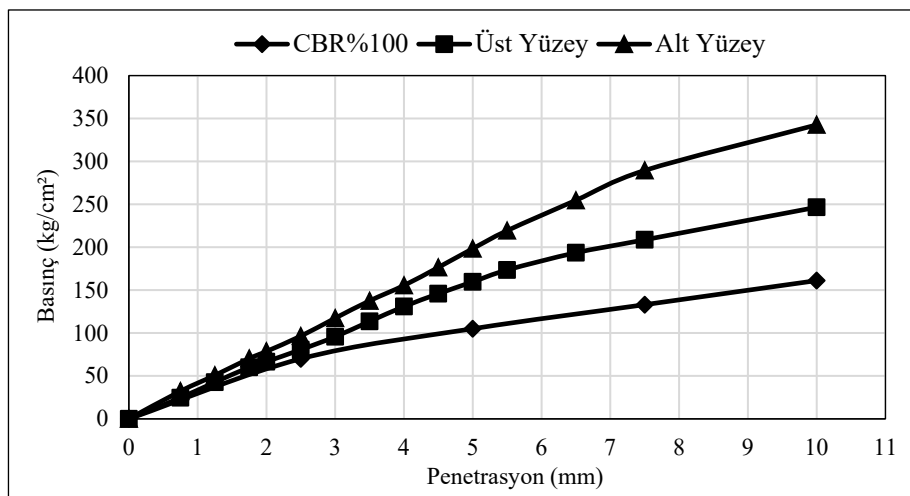
Şekil 6.73. Karışım-3, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür)



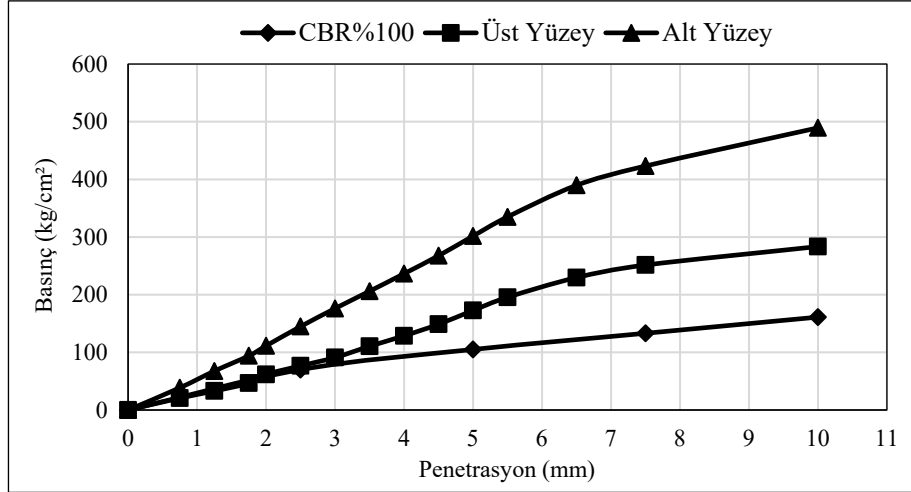
Şekil 6.74. Karışım-4, 4 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür)



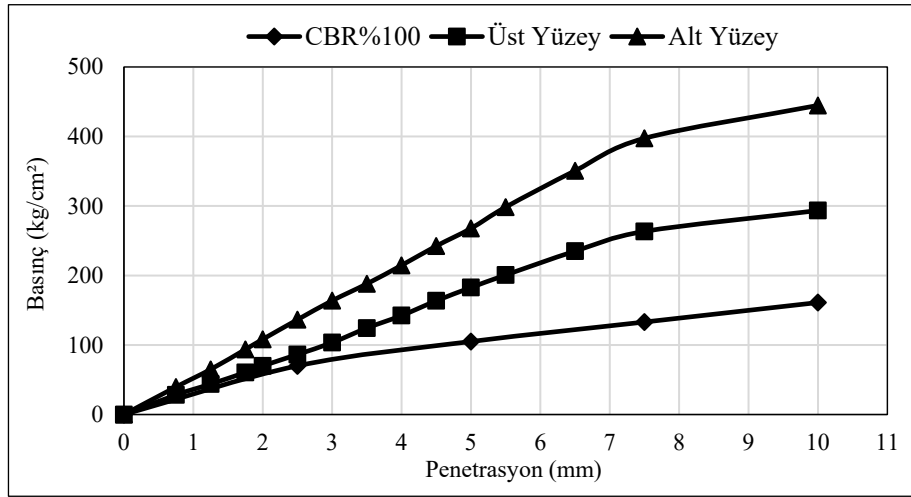
Şekil 6.75. Karışım-4, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür)



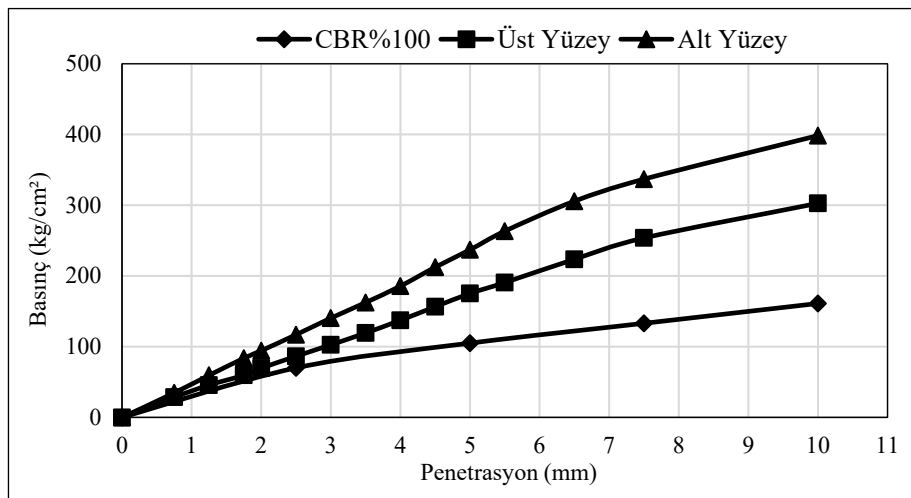
Şekil 6.76. Karışım-4, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür)



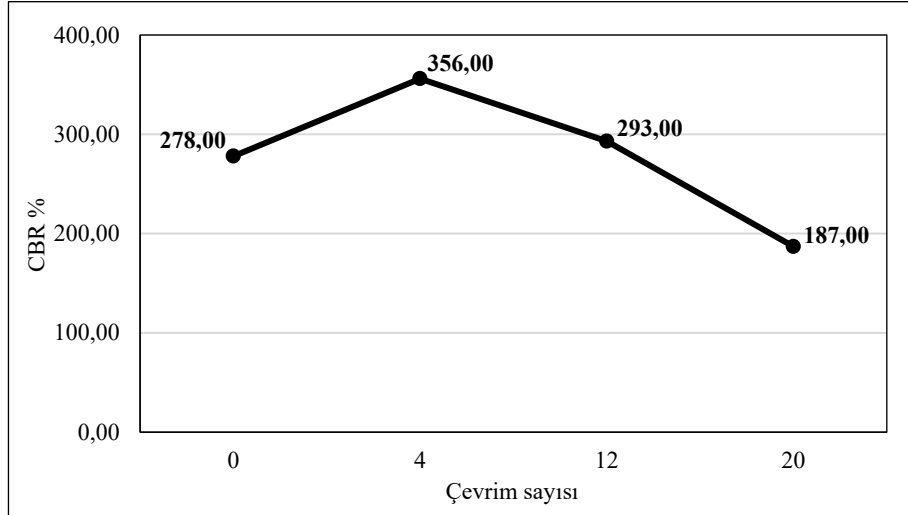
Şekil 6.77. Karışım-5, 4 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür)



Şekil 6.78. Karışım-5, 12 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür)

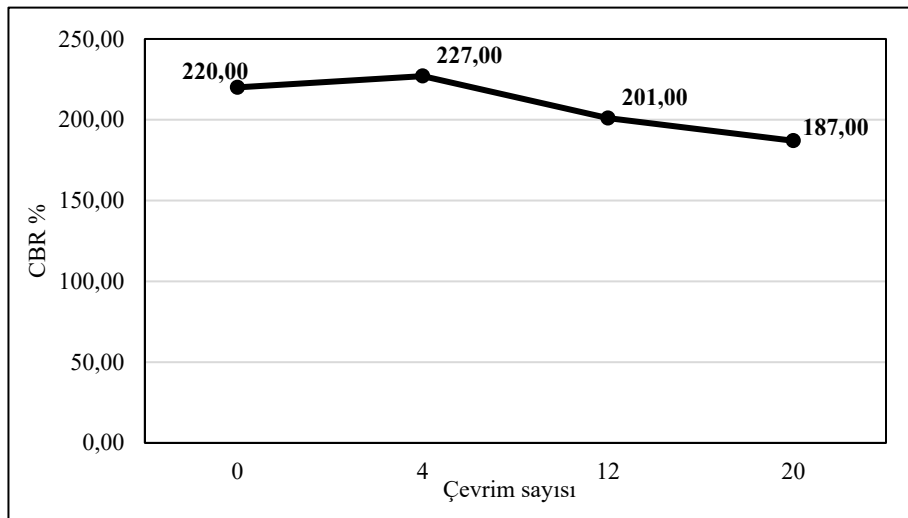


Şekil 6.79. Karışım-5, 20 çevirim donma-çözünme CBR grafiği (7 gün kür)



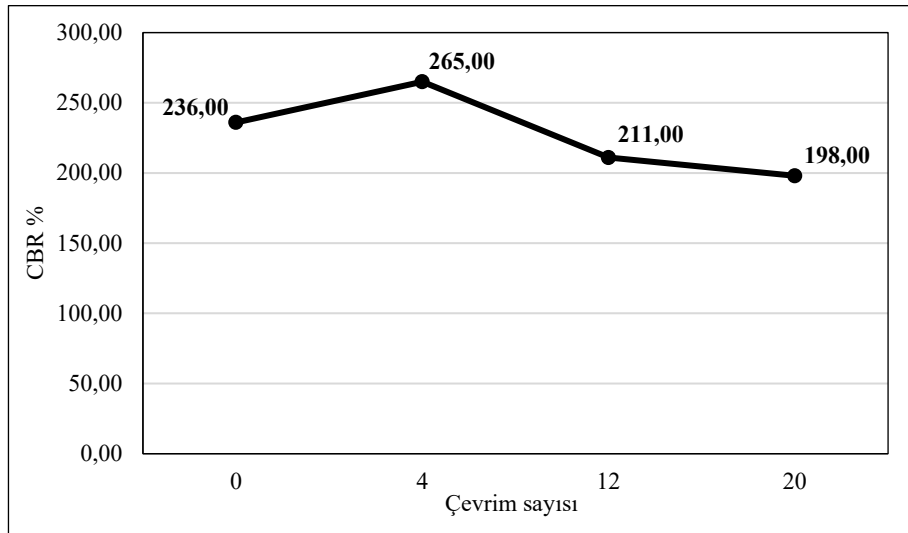
Şekil 6.80. Karışım-1 donma-çözünme karşılaştırma (7 gün kür)

Karışım-1 numunelerinin, değişen çevrim (4, 12, 20) sayılarına bağlı olarak elde edilen CBR sonuçları, anlık CBR sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.80.). 4. çevrimde anlık değere göre yaklaşık %28 oranında artış meydana gelmiş 4. çevrimden sonra artan çevrim sayısı ile CBR değerlerinde düşüş gözlemlenmiş ve 12. çevrim sonunda anlık CBR değerine yaklaşmıştır. 20 çevrim sonunda ise anlık CBR değerinden %33 oranında bir düşüş yaşanmıştır. Karışım-1 numuneleri için donma ve çözünme 4 çevrim sonunda karışımda sıkışmayı artırarak CBR değerinde yükselişe sebep olmuştur. 12 ve 20 çevrim sonunda ise CBR’da belirgin bir düşüş görülmüştür.



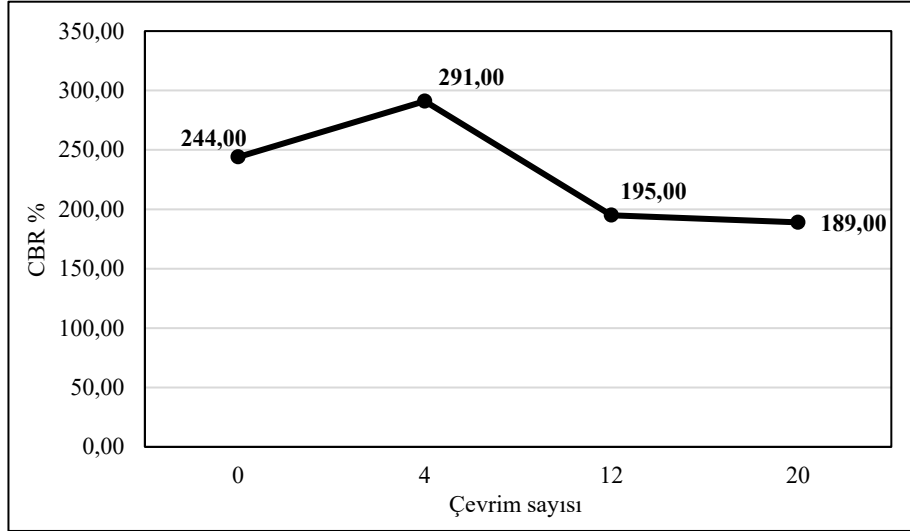
Şekil 6.81. Karışım-2 donma-çözünme karşılaştırma (7 gün kür)

Karışım-2 numunelerinin, değişen çevrim (4, 12, 20) sayılarına bağlı olarak elde edilen CBR sonuçları, anlık CBR sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.81.). 4. çevrimde anlık değere göre yaklaşık %3 oranında artış meydana gelmiş 4. çevrimden sonra artan çevrim sayısı ile CBR değerlerinde düşüş gözlemlenmiş ve 12. çevrim sonunda anlık CBR değerinden yaklaşık %9'luk bir düşüş yaşanmıştır. 20 çevrim sonunda ise anlık CBR değerinden %15 oranında bir düşüş yaşanmıştır. Karışım-2 numuneleri için donma ve çözünme 4 çevrim sonunda karışımda sıkışmayı artırarak CBR değerinde yükselişe sebep olmuştur. 20 çevrim sonunda ise CBR'da bir miktar düşüş görülmüştür.



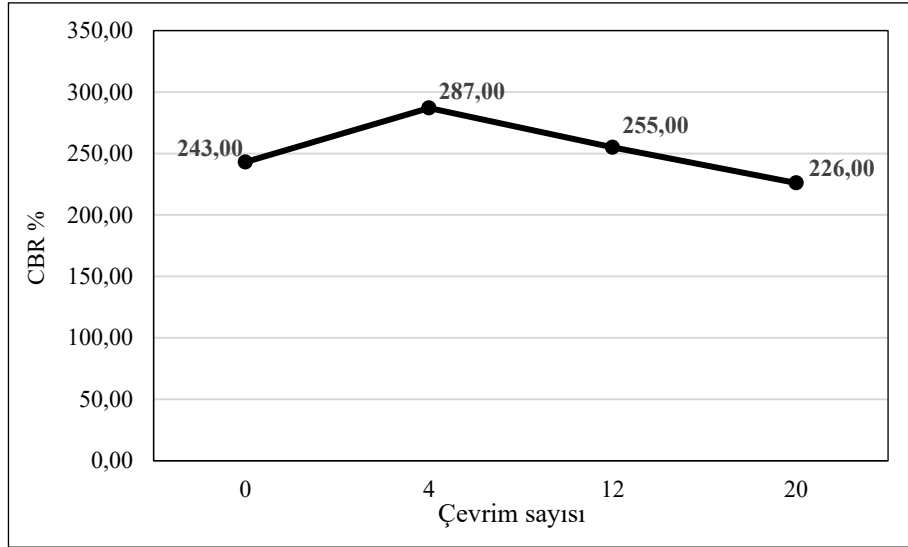
Şekil 6.82. Karışım-3 donma-çözünme karşılaştırma (7 gün kür)

Karışım-3 numunelerinin, değişen çevrim (4, 12, 20) sayılarına bağlı olarak elde edilen CBR sonuçları, anlık CBR sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.82.). 4. çevrimde anlık değere göre yaklaşık %12 oranında artış meydana gelmiş 4. çevrimden sonra artan çevrim sayısı ile CBR değerlerinde düşüş gözlemlenmiş ve 12. çevrim sonunda anlık CBR değerinden %11 oranında bir düşüş gerçekleşmiştir. 12-20 çevrim arası bu düşüş devam etmiş ve 20 çevrim sonunda anlık CBR değerinden %16 oranında bir düşüş yaşanmıştır. Karışım-3 numuneleri için donma ve çözünme 4 çevrim sonunda karışımda sıkışmayı artırarak CBR değerinde yükselişe sebep olmuştur. 12 ve 20 çevrim sonunda ise CBR'da bir miktar düşüş görülmüştür.



Şekil 6.83. Karışım-4 donma-çözünme karşılaştırma (7 gün kür)

Karışım-4 numunelerinin, değişen çevrim (4, 12, 20) sayılarına bağlı olarak elde edilen CBR sonuçları, anlık CBR sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.83.). 4. çevrimde anlık değere göre yaklaşık %19 oranında artış meydana gelmiş 4. çevrimden sonra artan çevrim sayısı ile CBR değerlerinde düşüş gözlemlenmiş ve 12. çevrim sonunda anlık CBR değerinden %20 oranında bir düşüş gerçekleşmiştir. 12-20 çevrim arası bu düşüş çok küçük oranlarda devam etmiş ve 20 çevrim sonunda anlık CBR değerinden %23 oranında bir düşüş yaşanmıştır. Karışım-4 numuneleri için donma ve çözünme 4 çevrim sonunda karışımda sıkışmayı artırarak CBR değerinde yükselişe sebep olmuştur. 12 ve 20 çevrim sonunda ise CBR’da bir miktar düşüş görülmüştür.

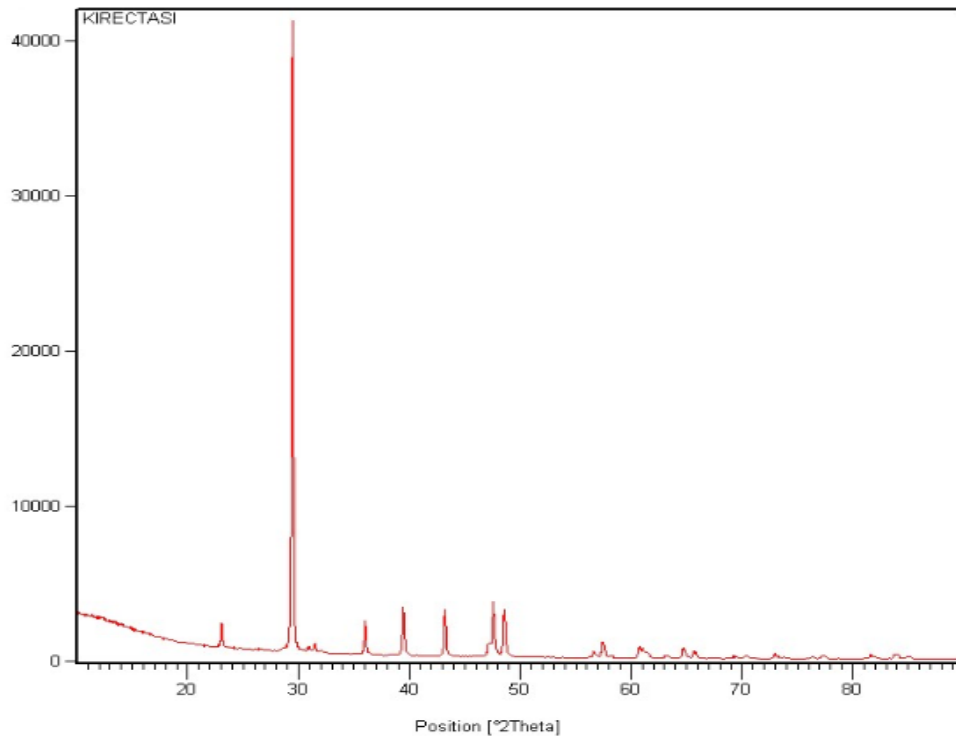


Şekil 6.84. Karışım-5 donma-çözünme karşılaştırma (7 gün kür)

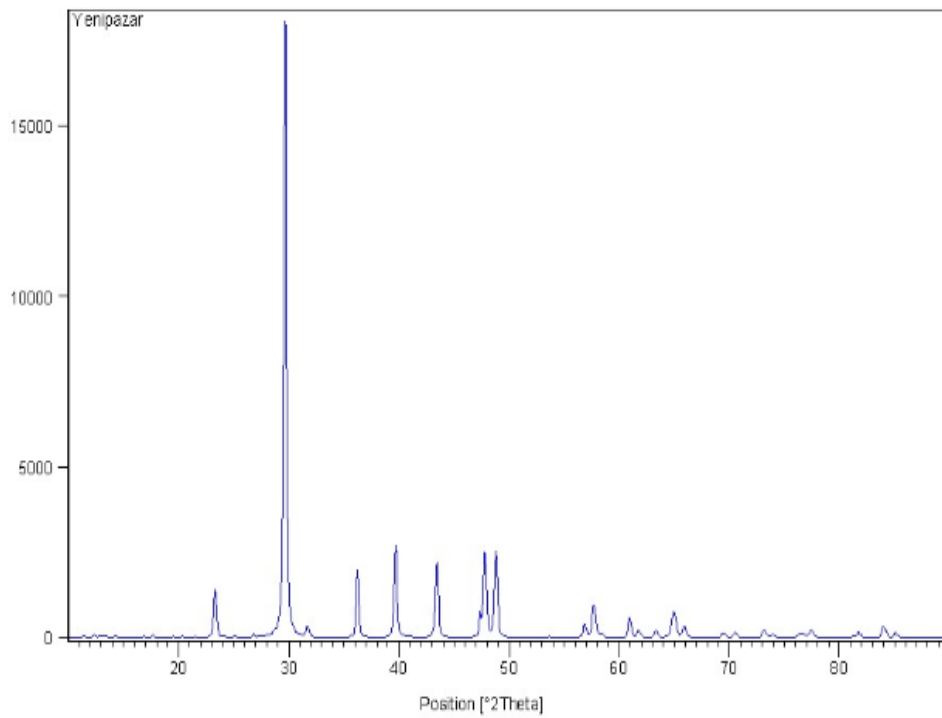
Karışım-5 numunelerinin, değişen çevrim (4, 12, 20) sayılarına bağlı olarak elde edilen CBR sonuçları, anlık CBR sonuçları ile karşılaştırılmıştır (Şekil 6.84.). 4. çevrimde anlık değere göre yaklaşık %18 oranında artış meydana gelmiş 4. çevrimden sonra artan çevrim sayısı ile CBR değerlerinde doğrusal bir düşüş gözlemlenmiş ve 20 çevrim sonunda anlık CBR değerinin %7 oranında bir düşüş yaşanmıştır. Karışım-5 numuneleri için donma ve çözünme 4 çevrim sonunda karışımda sıkışmayı artırarak CBR değerinde yükselişe sebep olmuştur. 12 ve 20 çevrim sonunda ise CBR’da bir miktar düşüş görülmüştür.

6.14. X-Işınları Difraktogramı (XRD) Analizi

XRD, katı ve toz halde bulunan malzemelerin faz analizinde kullanılan temel tekniklerden biridir. XRD ile malzemedeki fazlar, fazların miktarı, kristal boyutu, yapıdaki değişimler, latis parametreleri, kristal yönlenmesi ve atom pozisyonları hakkında bilgi alınır. Bu kapsamda İncirli taş ocağı agregası ve Yenipazar ilçesi mermer ocağından temin edilen mermer atıkları üzerinde XRD analizleri, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi’nde Panalytical-Empyean markalı cihaz yardımı ile yapılmıştır. Elde edilen, X-ray difraksiyon grafikleri yardımıyla mermerin içerisinde bulunan mineral fazları belirlenmiştir. Bu analiz sonucunda oluşan grafikler Şekil 6.85. ve Şekil 6.86.’da verilmiştir.



Şekil 6.85. Agregra XRD grafiği



Şekil 6.86. Mermer atığı XRD grafiği

XRD analizi sonucunda elde edilen XRD grafikleriyle, agregra ile mermer atığı içerisinde bulunan mineral fazları belirlenmiştir. İncirli taş ocağı agregrası üzerinde

yapılan XRD analizi ile kalsiyum karbonatın esas mineral olduğu görülmüştür. Bilecik ili Yenipazar ilçesi mermer atık parçalarında ise kalsitin esas mineral olduğu görülmüştür.

6.15. X-Işını Floresans Spektrometresi (XRF) Analizi

XRF analizi katı (mineral, kayaç, metal, toprak), sıvı (yağ, su, petrol ürünleri) ve preslenmiş toz gibi farklı formlardaki numunelerde elementel içerikleri yüzdelik (%) ve milyonda birlik (ppm) cinsinden yarı kantitatif olarak analiz edilmesine olanak sağlar. Bu kapsamda İncirli taş ocağı agregası ve Yenipazar ilçesi mermer ocağından temin edilen mermer atıkları üzerinde XRF analizleri, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde Panalytical-Axıos markalı cihaz yardımı ile yapılmıştır. Analiz sonucunda elde edilen değerler Çizelge 6.5.'de verilmiştir.

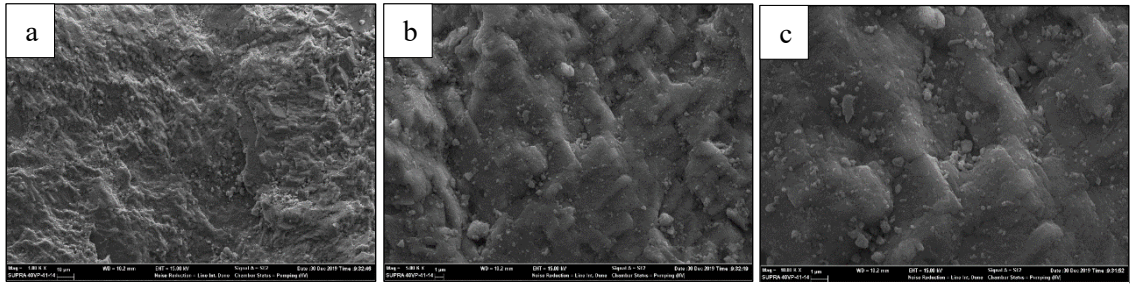
Çizelge 6.5. XRF deney sonuçları

Analit	Agrega	Mermer Atığı
O	0,889	-
Na	-	0,046
Mg	0,008	0,102
Al	0,007	0,115
Si	0,01	0,288
P	0,016	0,271
S	-	0,008
Cl	-	0,01
K	0,006	0,058
Ca	43,868	98,735
Ti	0,005	-
Mn	-	0,34
Fe	0,059	0,167
Ni	-	0,016
Zn	0,033	0,012
Sr	0,049	0,133
Pb	0,015	-

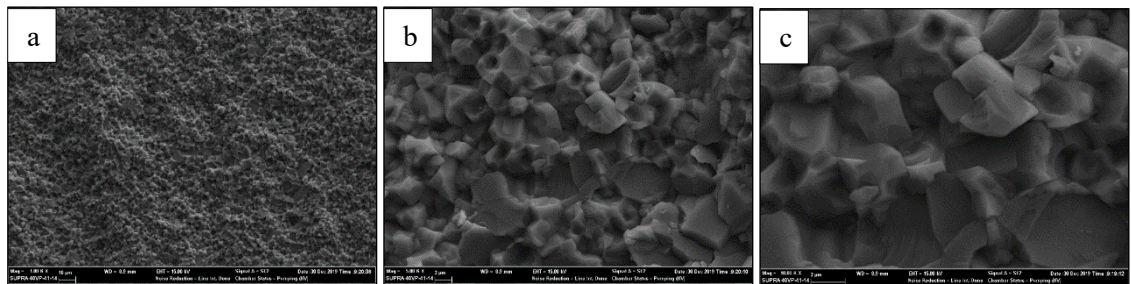
Agrega ve mermer atıkları üzerinde yapılan XRF analizi sonucunda kalsiyumun (Ca) esas element olduğu görülmüştür.

6.16. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM-EDS) Analizleri

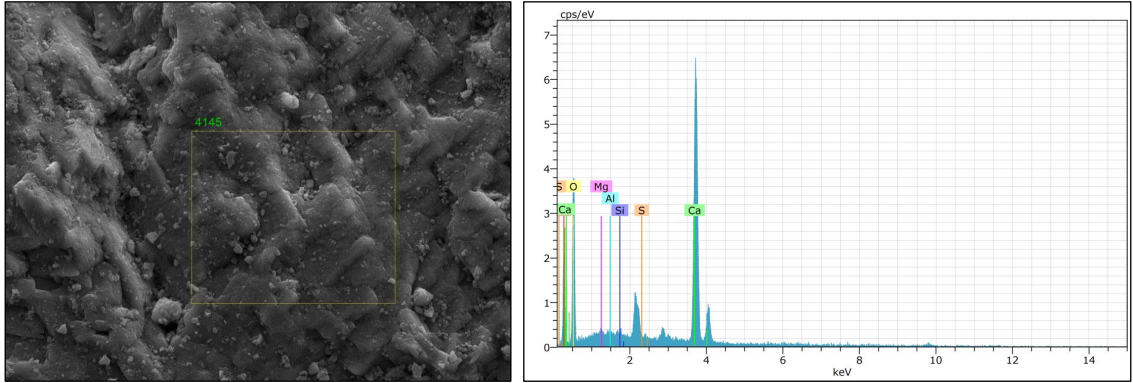
SEM yüksek çözünürlükte görüntü elde etmek için, vakum ortamında oluşturulan ve bu ortamda elektromanyetik lenslerle inceltiren elektron demetiyle incelenecek malzemeyi analiz etme imkanı sunan bir cihazdır. Mikroskopta oluşturulan resimler, elektron demetinin malzeme ile olan etkileşiminden ortaya çıkan ışınlar veya geri yansıyan elektronlar sayılarak oluşturulur. SEM analizleri İncirli taş ocağı agregası ve Yenipazar ilçesi mermer ocağından temin edilen mermer atıkları üzerinde, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Merkezi Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde Zeiss-Supra 40Vp markalı cihaz yardımı ile yapılmıştır. SEM çalışmaları kapsamında, örneklerdeki bileşenlerin tanımlanmasına, mineral ilişkilerine, morfolojik özelliklerine ve oluşum tür ile kökenlerine yönelik yorumlar için gözlemler yapılmıştır. Yapılan gözlemlere ait görüntüler Şekil 6.87. ve Şekil 6.88.'de verilmiştir. Ayrıca gerekli alanlardan veya noktalardan yarı kantitatif EDS kimyasal analizler alınmıştır (Şekil 6.89. ve Şekil 6.90.).



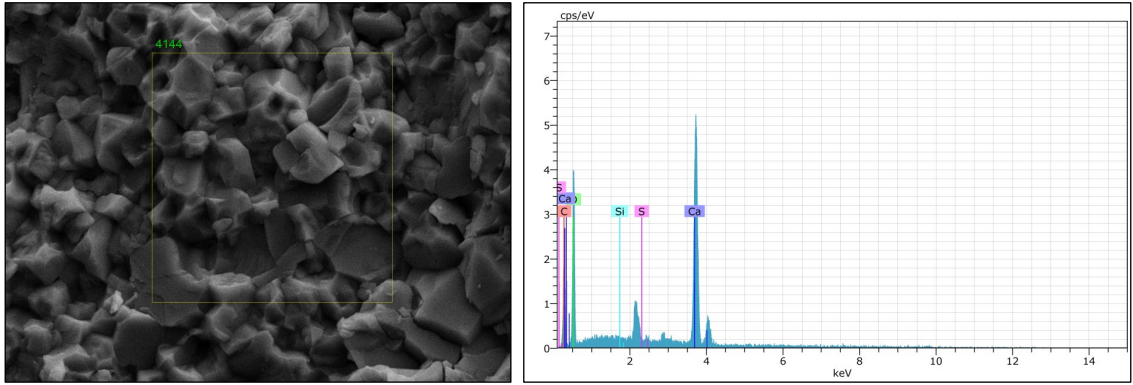
Şekil 6.87. Agregası SEM görüntüleri (a: 1000 kat büyütülmüş, b: 5000 kat büyütülmüş, c: 10000 kat büyütülmüş)



Şekil 6.88. Mermer atığı SEM görüntüleri (a: 1000 kat büyütülmüş, b: 5000 kat büyütülmüş, c: 10000 kat büyütülmüş)



Şekil 6.89. Agregada EDS görüntüsü ve grafiği



Şekil 6.90. Mermer atığı EDS görüntüsü ve grafiği

Agrega ve mermer atığı EDS sonuçları XRF analizi sonuçlarını kanıtlar nitelikte olup esas elementin kalsiyum olduğu gözlemlenmiştir.

6.17. Deney Sonuçlarının Genel Değerlendirilmesi

Çizelge 6.6. Deney sonuçlarının karşılaştırılması

Deneyin Adı	Birim	Agrega	Mermer Atığı	KTŞ Limit
Parçalanma direncinin tayini (Los Angeles metodu)	%	19,46	21,68	35,00
Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi	%	3,24	2,50	20,00
Su emme (absorbsiyon)	%	0,35	0,19	3,00
Yassılık indeksi	%	12,81	14,64	30,00
NaOH ile organik madde tespiti		Negatif	Negatif	Negatif
Kil topağı ince agrega	%	0,53	0,40	1,00
Kil topağı kaba agrega	%	0,17	0,11	1,00
Likit limit		NP	NP	NP
Plastik limit		NP	NP	NP
Metilen mavisi	%	1	0,75	3,00
Modifiye Proktor ($w_{opt} - \gamma_{kmax}$)	Karışım-1	% - kN/m ³	4,50 – 23,25	
	Karışım-2	% - kN/m ³	4,50 – 22,80	
	Karışım-3	% - kN/m ³	4,56 – 22,99	
	Karışım-4	% - kN/m ³	4,58 – 22,97	
	Karışım-5	% - kN/m ³	4,55 – 22,80	
Kaliforniya taşıma oranı yaş (CBR)	Karışım-1	%	286,00	120,00
	Karışım-2	%	213,00	
	Karışım-3	%	232,00	
	Karışım-4	%	265,00	
	Karışım-5	%	237,00	
Donma-çözünme sonrası CBR değerleri (4 çevrim-12 çevrim-20 çevrim)	Karışım-1	%	431,00-241,00-161,00	
	Karışım-2	%	420,00-427,00-256,00	
	Karışım-3	%	316,00-322,00-222,00	
	Karışım-4	%	441,00-245,00-190,00	
	Karışım-5	%	446,00-335,00-291,00	

Çizelge 6.6. incelendiğinde:

- Parçalanma direncinin tayini (Los Angeles metodu)'ne göre her iki malzemede şartname limit değerinin altında kalmıştır. Mermer atığının parçalanma direnci, agregaya göre %11 oranında daha yüksek çıkmıştır.
- Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyinde ise mermer atığı agregaya göre %23 oranında daha dayanıklı çıkmıştır. Her iki malzeme için elde edilen değer KTŞ limit değerinin altında kalmıştır.
- Su emme (absorbsiyon) deneyinden elde edilen sonuçlara göre agrega, mermer atığına göre %84 daha fazla su emme oranına sahiptir. Aradaki bu farka rağmen elde edilen değerler KTŞ limit değerinin altında kalmıştır.
- Yassılık indeksi deneyinden elde edilen sonuçlara göre mermer atığı, agregaya göre %14 oranında daha yassı bir değere sahiptir. Her iki malzeme için elde edilen değer KTŞ limit değerinin altında kalmıştır.
- NaOH ile organik madde tespiti KTŞ'nin öngördüğü şekilde her iki malzeme içinde negatif çıkmıştır.
- Kil topağı değeri ince agrega için İncirli taş ocağı agregasının, mermer atığına göre %33 daha fazla çıkmıştır. Kaba agregalarda yine İncirli taş ocağı agregada mermer atığına göre %55 oranında daha fazla çıkmıştır. Deney sonucunda elde edilen değerler her iki malzeme içinde KTŞ limitleri altındadır.
- Likit limit ve plastik limit deneyleri sonucunda KTŞ'nin öngördüğü şekilde malzemeler non-plastik özellik göstermiştir.
- Metilen mavisi deneyi sonucunda metilen mavisi değeri agregada mermer atığına göre %33 daha fazla çıkmıştır. Her iki malzeme için elde edilen değer KTŞ limit değerinin altında kalmıştır.
- Modifiye proktor deneyi sonucunda maksimum kuru birim hacim ağırlık değeri en yüksek Karışım-1'de görülmüştür. Bunun sebebinin Karışım-1'e giren malzeme içerisindeki yassı ve uzun agregaların diğer karışımlara göre daha az olmasından kaynaklanmaktadır. Aynı sonuca Kailash, vd. (2013) yaptığı çalışmada ulaşmıştır.
- Yaş CBR değerleri KTŞ limit değeri üzerinde kalarak şartname değerlerini sağlamıştır.

Tüm bu deney sonuçlarına göre mermer atık parçalarının farklı boyut aralıklarında agrega yerine ikame edilmesi ile oluşan bütün karışım tiplerinin bir karayolu üst yapısında

temel malzemesi olarak kullanılabilceğini göstermiştir. Aynı şekilde Yakše (2016), Ahmed vd. (2010), Fırat vd. (2012) ve Mostofa (2016) mermer atık parçalarının karayolu üst yapısında kullanılabilirliği üzerine çalışma yapmış ve mermer atıklarının karayolu üst yapısında kullanılabilir olduğu sonucuna varmışlardır. Ayrıca Kailash, vd. (2013) kireçtaşı atıklarının yol temel tabakasında bazalt gibi geleneksel agregalar yerine kullanılabilirliği üzerine bir çalışma yapmış ve Yeni Delhi MoRT&H-2001 şartnamesine göre uygun olduğunu belirtmiştir.

Çizelge 6.7. CBR değerlerinin karşılaştırılması

Kür Süresi	İkame Edilen Malzeme	Karışım No	Kuru CBR %	Yaş CBR %	4 Çevrim CBR %	12 Çevrim CBR %	20 Çevrim CBR %
Anlık	Referans	Karışım-1	237,00	286,00	431,00	241,00	161,00
	0-5	Karışım-2	200,00	213,00	420,00	427,00	256,00
	5-12	Karışım-3	222,00	232,00	316,00	322,00	222,00
	12-19	Karışım-4	210,00	254,00	441,00	245,00	190,00
	19-38	Karışım-5	232,00	237,00	446,00	335,00	291,00
7 gün	Referans	Karışım-1	278,00	321,00	356,00	293,00	187,00
	0-5	Karışım-2	220,00	246,00	227,00	201,00	187,00
	5-12	Karışım-3	236,00	254,00	265,00	211,00	198,00
	12-19	Karışım-4	244,00	263,00	291,00	195,00	189,00
	19-38	Karışım-5	243,00	274,00	287,00	255,00	226,00

Çizelge 6.7.'de görüleceği üzere tüm karışım tiplerinin yaş CBR değerleri kuru CBR değerlerinden yüksek çıkmıştır. Ortamdaki su içeriğinin optimum değerinden doyma değerine değiştirilmesi sonucunda test edilen tüm karışımların CBR değerinde artış yaşanmıştır. Bu artış aşağıdaki denklem (6.1) ile hesaplanmıştır (Domitrovic, vd., 2016).

$$\Delta\text{CBR} = \left(\frac{\text{CBR}(96\text{h})}{\text{CBR}(\text{omc})} - 1 \right) \times 100[\%] \quad (6.1)$$

CBR(omc): Optimum su muhtevasında test edilmiş numunelerin CBR değeridir,

CBR(96h): 96 saat suda bekletildikten sonra test edilen numunelerin CBR değeridir.

Çizelge 6.8. Kuru ve yaş CBR değerlerindeki değişim

	Anlık				
	Karışım-1	Karışım-2	Karışım-3	Karışım-4	Karışım-5
CBR(omc)	237,00	200,00	222,00	210,00	232,00
CBR(96h)	286,00	213,00	232,00	254,00	237,00
Δ CBR%	21	7	5	21	2
	7 Gün Kür				
	Karışım-1	Karışım-2	Karışım-3	Karışım-4	Karışım-5
CBR(omc)	278,00	220,00	236,00	244,00	243,00
CBR(96h)	321,00	246,00	254,00	263,00	274,00
Δ CBR%	15	12	8	8	13

Su içeriğinin CBR değeri üzerindeki etkisi büyük oranda doğal agreganın tipine bağlıdır (Domitrovic, vd., 2016). Çizelge 6.8.'den genel anlamda CBR değerindeki en büyük değişim, agregadan oluşan Karışım-1'de yaşanmıştır.

Kuru ve yaş CBR değerleri karşılaştırıldığında referans olarak alınan Karışım-1 numunesinin CBR değeri diğer tüm karışım tiplerinden yüksek çıkmıştır. Bunun sebebinin referans malzemenin sahip olduğu düşük Los Angeles aşınma değeri (Bkz. Şekil 6.6.) ve düşük yassılık indeksi değeri (Bkz. Şekil 6.9.) ile açıklanabilir. Los Angeles aşınma değeri, malzemedeki aşınma ve darbeler karşısında yaşanacak parçalanmalar sonucunda dayanımda oluşacak kayıplar hakkında bilgi vermektedir. Bu değerlerin dayanım kayıplarını en aza indirmek için düşük olması istenmektedir. Yapılan aşınma deneyi sonucunda mermer atığı agregaya göre %11 oranında daha fazla aşınma göstermiştir. İki malzeme arasındaki bu farktan dolayı referans malzemenin CBR değeri, içerisinde mermer atığı parçalarının bulunduğu diğer karışımlardan (Karışım-2, Karışım-3, Karışım-4, Karışım-5) daha yüksek çıkmıştır. Sonuç olarak, referans malzemesi dışındaki karışım tiplerinin yüksek aşınma değerine sahip olması karışım içerisine giren yüksek aşınma değerine sahip mermer atığı parçalarından kaynaklanmaktadır. Yassılık indeksine bakıldığında ise yine aynı şekilde referans malzemenin yassılık indeksi değeri diğer karışım tipleri için oluşturulan numunelerin yassılık indeksi değerinden daha düşüktür. Bu düşüş referans malzemesi dışındaki karışımların (Karışım-2, Karışım-3, Karışım-4, Karışım-5) içerisine referans malzemenin yassılık indeksi değerine göre daha yüksek yassılık indeksi değerine sahip mermer atık parçalarının girmesinden kaynaklanmaktadır.

Yassılık indeksi yüksek olan malzemelerin çekme dayanımları düşük olduğu için çevre ve trafik etkisi altında kolayca aşınıp kırılabilirler. Agrega danelerinin yassı veya ince-uzun daneli olması durumunda stabilite oldukça düşmektedir. Bu tip agrega danelerine kısa eksen üzerinde bir yük tatbik edilmesi ile agrega daneleri kolayca kırılarak degradasyona uğrayacak ve ayrıca serim sırasında segregasyona neden olabilecektir (Şenol, 2010). Dolayısıyla yassı agregalar üzerine dört taraftan gelecek olan basınçlara karşı istenilen mukavemeti sağlayamayacaktır. Yapılan deneylerle mermer atığının yassılık indeksi değeri referans malzemenin yassılık indeksi değerine göre %12.50 daha düşük bulunmuştur. Bu nedenle referans malzemesinin CBR değeri, mermer atıkları ile oluşturulan karışımların (Karışım-2, Karışım-3, Karışım-4, Karışım-5) CBR değerine göre daha yüksek çıkmıştır.

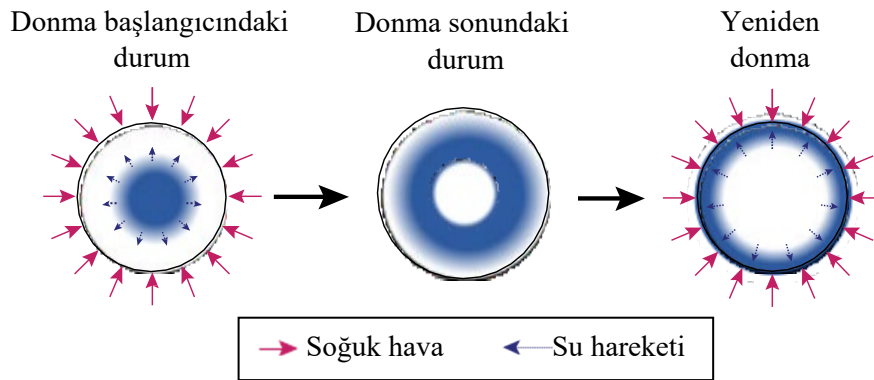
Anlık ve 7 günlük kür sonucunda karışımların kuru ve yaş CBR değerleri karşılaştırıldığında en düşük değerlere genellikle Karışım-2'de ulaşılmıştır. Bunun sebebinin Karışım-2'ye %44 oranında giren 0-5 mm mermer atığı parçalarından kaynaklandığı düşünülmektedir. Oluşturulan Karışım-2'ye bakıldığında 0-5 mm malzemenin karışımı oluşturan diğer aralıklardaki agrega malzemeleri ile bir kenetlenme sağlayamadığı ve bu karışımda 0-5 mm boyutlarındaki mermer atığı malzemesinin bağlayıcı özellikte bir malzeme olmadığı gözlemlenmiştir (Bkz. Şekil 6.20.). Bu özellik numunelerde istenilen oranlarda sıkışmasının sağlanamamasına neden olmuştur. Bu durum sonucunda ulaşılan CBR değerleri diğer karışım tiplerinin CBR değerlerinden daha düşük kalmıştır.

Çizelge 6.9. Donma-çözünme çevrim sayısına göre numunelerin su muhtevası

Çevrim Sayısı	Kür Süresi	Anlık					7 Günlük				
	Karışım	K-1	K-2	K-3	K-4	K-5	K-1	K-2	K-3	K-4	K-5
	Optimum Su Muhtevası (w_{opt})	4,50	4,50	4,56	4,58	4,55	4,50	4,50	4,56	4,58	4,55
0	Alt Yüzey (w_{alt})	4,41	4,48	3,98	3,87	3,72	3,76	4,18	4,26	3,47	4,15
	$w_{alt}-w_{opt}$	-0,09	-0,02	-0,58	-0,71	-0,83	-0,74	-0,32	-0,30	-1,11	-0,40
	Üst Yüzey ($w_{üst}$)	5,56	4,45	4,75	4,53	4,25	5,16	4,47	4,54	4,03	5,04
	$w_{üst}-w_{opt}$	1,06	-0,05	0,19	-0,05	-0,30	0,66	-0,03	-0,02	-0,55	0,49
	Ortalama (w_{ort})	4,99	4,47	4,37	4,20	3,99	4,46	4,33	4,40	3,75	4,60
	$w_{ort}-w_{opt}$	0,48	-0,04	-0,19	-0,38	-0,57	-0,04	-0,18	-0,16	-0,83	0,05
4	Alt Yüzey (w_{alt})	4,15	3,49	4,37	4,68	4,12	4,65	3,64	4,00	4,41	4,21
	$w_{alt}-w_{opt}$	-0,35	-1,01	-0,19	0,10	-0,43	0,15	-0,86	-0,56	-0,17	-0,34
	Üst Yüzey ($w_{üst}$)	4,48	3,75	5,53	4,58	4,60	5,43	4,05	4,77	5,04	4,70
	$w_{üst}-w_{opt}$	-0,02	-0,75	0,97	0,00	0,05	0,93	-0,45	0,21	0,46	0,15
	Ortalama (w_{ort})	4,32	3,62	4,95	4,63	4,36	5,04	3,85	4,39	4,73	4,46
	$w_{ort}-w_{opt}$	-0,19	-0,88	0,39	0,05	-0,19	0,54	-0,66	-0,18	0,15	-0,09
12	Alt Yüzey (w_{alt})	5,43	4,64	5,06	4,81	4,57	4,83	4,28	4,16	4,92	4,64
	$w_{alt}-w_{opt}$	0,93	0,14	0,50	0,23	0,02	0,33	-0,22	-0,40	0,34	0,09
	Üst Yüzey ($w_{üst}$)	6,11	4,46	6,93	5,87	5,66	4,95	4,29	5,59	5,38	6,82
	$w_{üst}-w_{opt}$	1,61	-0,04	2,37	1,29	1,11	0,45	-0,21	1,03	0,80	2,27
	Ortalama (w_{ort})	5,77	4,55	6,00	5,34	5,12	4,89	4,29	4,88	5,15	5,73
	$w_{ort}-w_{opt}$	1,27	0,05	1,44	0,76	0,57	0,39	-0,22	0,32	0,57	1,18
20	Alt Yüzey (w_{alt})	5,96	4,94	5,51	6,98	5,04	5,74	5,74	5,51	5,39	4,91
	$w_{alt}-w_{opt}$	1,46	0,44	0,95	2,40	0,49	1,24	1,24	0,95	0,81	0,36
	Üst Yüzey ($w_{üst}$)	6,59	4,68	6,07	6,52	6,50	6,28	6,28	5,70	6,42	6,70
	$w_{üst}-w_{opt}$	2,09	0,18	1,51	1,94	1,95	1,78	1,78	1,14	1,84	2,15
	Ortalama (w_{ort})	6,28	4,81	5,79	6,75	5,77	6,01	6,01	5,61	5,91	5,81
	$w_{ort}-w_{opt}$	1,78	0,31	1,23	2,17	1,22	1,51	1,51	1,05	1,33	1,26

Yapılan bu çalışmada tüm CBR deneyleri, modifiye proktor deneyi sonucunda bulunan optimum su muhtevalarına göre hazırlanan karışımlar (K-1, K-2, K-3, K-4, K-5) üzerinde yapılmıştır. CBR deneyi sonrasında bulunan su muhtevaları Çizelge 6.9.'da verilmiştir. Anlık ve 4. çevrim sonunda KTŞ'nde belirtildiği üzere, karışımların su muhtevaları $w_{opt} \pm 2$ sınır değerleri arasında kalmıştır. 12 ve 20. çevrim sonunda bu sınır değerlerin üstünde sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçların elde edilmesinde, donma-çözünme çevrim sayılarının artması ile su muhtevasında yaşanan artış etkili olmuştur.

Şekil 6.91.'de donma nedeniyle dane gözeneklerindeki su hareketinin şematığı gösterilmiştir. Agrega daneleri düşük sıcaklığa maruz bırakıldığında, dane yüzey sıcaklığı düşüktür, iç sıcaklık ise başlangıç aşamasında yüksektir. Bu da danede sıcaklık gradyanı ile sonuçlanır. Bu sıcaklık gradyanı suyun termal akış yönünde akışına neden olur. Zaman geçtikçe dane içerisindeki sıcaklık dengelenir ve suyun hareketi sona erer. Bu şartlar altında çözülme olayı gerçekleşirse, danenin yüzeyindeki gözenek su içeriği başlangıçtaki duruma göre artar ve yeniden donma, suyun yüzey civarında ilave yığılmasına neden olur (Kawabata vd., 2016).



Şekil 6.91. Donma nedeni ile dane gözenek suyunun hareketi

Donma-çözünme çevrim sayıları sonucunda CBR değerlerindeki değişim (6.2) nolu denklem yardımı ile oluşturulmuş ve Çizelge 6.10. ve Çizelge 6.11'de verilmiştir (Domitrovic, vd., 2016).

$$\Delta CBR = \left(\frac{CBR(d\check{c})}{CBR(omc)} - 1 \right) \times 100 [\%] \quad (6.2)$$

CBR(omc): Optimum su muhtevasında test edilmiş numunelerin CBR değeridir,

CBR(dç): Donma-çözünme çevrimi sonrası test edilen numunelerin CBR değeridir.

Çizelge 6.10. Anlık kür sonunda donma-çözünme CBR değerleri

Anlık					
		Anlık	4 Çevrim	12 Çevrim	20 Çevrim
Karişim-1	CBR(omc)	237,00	431,00	241,00	161,00
	Δ CBR%		82	2	-32
		Anlık	4 Çevrim	12 Çevrim	20 Çevrim
Karişim-2	CBR(omc)	200,00	420,00	427,00	256,00
	Δ CBR%		110	114	28
		Anlık	4 Çevrim	12 Çevrim	20 Çevrim
Karişim-3	CBR(omc)	222,00	316,00	322,00	222,00
	Δ CBR%		42	45	0
		Anlık	4 Çevrim	12 Çevrim	20 Çevrim
Karişim-4	CBR(omc)	200,00	441,00	245,00	190,00
	Δ CBR%		121	23	-5
		Anlık	4 Çevrim	12 Çevrim	20 Çevrim
Karişim-5	CBR(omc)	232,00	446,00	335,00	291,00
	Δ CBR%		92	44	25

Çizelge 6.11. 7 gün kür sonunda donma-çözünme CBR değerleri

7 Gün Kür					
		Anlık	4 Çevrim	12 Çevrim	20 Çevrim
Karişim-1	CBR(omc)	278,00	356,00	293,00	187,00
	Δ CBR		28	5	-33
		Anlık	4 Çevrim	12 Çevrim	20 Çevrim
Karişim-2	CBR(omc)	220,00	227,00	201,00	187,00
	Δ CBR		3	-9	-15
		Anlık	4 Çevrim	12 Çevrim	20 Çevrim
Karişim-3	CBR(omc)	236,00	265,00	211,00	198,00
	Δ CBR		12	-11	-16
		Anlık	4 Çevrim	12 Çevrim	20 Çevrim
Karişim-4	CBR(omc)	244,00	291,00	195,00	189,00
	Δ CBR		19	-20	-23
		Anlık	4 Çevrim	12 Çevrim	20 Çevrim
Karişim-5	CBR(omc)	243,00	287,00	255,00	226,00
	Δ CBR		18	5	-7

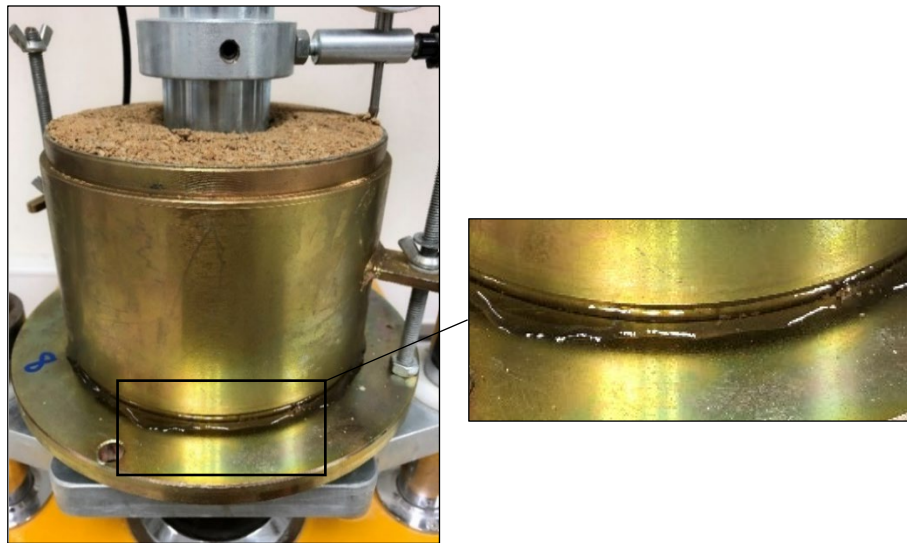
Donma-çözünmeye karşı dayanıklılık büyük ölçüde agreganın içsel ve dışsal parametrelerine bağlıdır. Gözeneklilik, su içeriği ve çözülmemiş tuzlar donmaya maruz bırakılan agreganın performansını önemli ölçüde etkiler (Yates ve Mauko, 2008; Lindqvist vd., 2007). Donmaya bağlı genişmiş gözenek suyu agreganın aşınmasına ve kırılmasına neden olabilecek önemli basınçlar üretebilir ve yol temel tabakalarında rijitliğin düşüşüne katkıda bulunan bozunmaya neden olabilir (Arm, 2001; Rosa, 2006).

Donma-çözünme çevrim sayılarına bakıldığında (Çizelge 6.10. ve Çizelge 6.11.) 4. çevrim sonunda tüm karışım tiplerinin CBR değerlerinde bir artış meydana gelmiştir. CBR değeri malzemenin dayanımı ile ilgili bir kavram olduğundan artış sadece malzemenin dayanımında yaşanacak bir yükselmeye veya sıkışmanın daha iyi sağlanması ile mümkün olacaktır. Donma-çözünme sürecinde malzemenin dayanımında artışa sebep olacak herhangi bir durum olmadığından CBR değerindeki artışın, agregaların az miktarda da olsa hareket etmesi ile sıkışma değeri üzerinde bir miktar artışa sebep olacağı düşünülmektedir. Kawabata vd.'nin 2016 yılında yaptığı çalışmada ve Soleimanbeigi vd.'nin 2015 yılında yaptığı çalışmada donma neticesinde bir hacim artışı yaşandığı ve bu süreçteki hacim artışının dane gözeneklerindeki suyun donma nedeniyle boşluklara zorla gönderilmesi ile agrega danelerinin de bir miktar hareket edeceğini belirtmiştir. Bu fiziksel durumun boşluk yapısını değiştireceğini ve bundan dolayı CBR değerini etkileyeceğini belirtmişlerdir (Kawabata vd., 2016), (Soleimanbeigi vd., 2015). 12 ve 20 çevrim sonunda CBR değerleri genel olarak düşüş göstermiştir. En büyük düşüş referans malzeme olan Karışım-1'de gerçekleşmiştir. Bu düşüşün malzeme içerisindeki suyun hacim genişlemesi sonucunda, danelerin hareketinin daha fazla olduğu ve danelerin kenarlarında kopma ve kılcal çatlakların oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir. Buda malzemenin dayanımında olumsuz bir etki yaratmaktadır. Dayanımda gerçekleşen bu düşüklükte CBR değerlerinde bir azalmaya neden olmuştur. Benzer şekilde Yates ve Mauko (2008) yaptığı çalışmada 12. çevrim sonunda malzemede ince çatlaklar oluştuğunun gözlemlemiştir (Yates ve Mauko, 2008).

Çizelge 6.9.'da görüldüğü üzere çevrim sayısının artması ile numunenin su muhtevası artmıştır. Çizelge 6.9.'da 12 ve 20. çevrimler için gösterilen su muhtevaları normalde daha fazladır. Şekil 6.92'de görüldüğü üzere özellikle 12 ve 20. çevrim sonunda CBR ölçümü yapılırken pistonun numuneye baskı uyguladığı anda kalıp tabanından bir miktar su kaybı gerçekleşmiştir. Bu kayıp su muhtevası belirlenirken hesaplara dahil













edilememiştir. Su muhtevastındaki bu artış donmadan dolay malzemede daha fazla bir dayanım düşüklüğü yaşanmasına sebep olmuştur. Malzemede yaşanan kopma ve çatlakların 20 çevrim sonuna kadar devam ettiğı ve CBR değerlerinin giderek azaldığı görülmüştür. Benzer şekilde Kawabata vd, 2016 yılında Japonya'nın Hokkaido bölgesinde yaptıkları çalışmada soğuk bölgelerde yol kaplamasının iç kısmının kış boyunca donduğunu ve alt tabaka zemindeki hacim artışının sürtünme ve çatlamalara neden olduğunu belirtmişlerdir. Don olayından dolayı hacim genişlemesine maruz kalan yol alt tabakasının çözülmesi, taşıma kapasitesinde düşüğe ve kaplamada bozulmalara neden olduğunu açıklamışlardır (Kawabata vd., 2016).

Anlık ve 7 günlük kür sonucunda 4 çevrim ile 20 çevrim arasındaki CBR değerindeki en büyük düşüş referans malzeme olan Karışım-1'de yaşanmıştır. CBR değerindeki düşüşün, donma-çözünmenin daneler üzerinde yaptığı kopma ve çatlamlar sonucundaki dayanım düşüklüğünden kaynaklandığı düşünülmektedir. Yapılan su emme deneyi sonuçlarına göre agrega mermer atığına göre %45.7 daha fazla su emme oranına sahiptir. Karışım-1'i oluşturan agrega malzemesinin su emme oranının, içerisinde mermer atığı parçalarının bulunduğu diğer karışımlara göre daha yüksek olması beklenir (Bkz. Şekil 6.8.). Yüksek su emme oranına sahip agrega daneleri bünyesinde daha fazla su bulundurarak donma neticesinde daha fazla kopma ve çatlama maruz kalacaktır. Bu kopma ve çatlamalardaki yüksek oranlar referans karışımın CBR değerinin diğer karışımların (Karışım-2, Karışım-3, Karışım-4, Karışım-5) CBR değerinden daha fazla düşüğe neden olmuştur.



Şekil 6.92. CBR deneyi sırasında yaşanan su kaybı

Çizelge 6.12. Donma sonrası taşıma kapasitesinin değişimi (Kawabata vd., 2016)

Su İçeriği Durumları	Dane yüzey suyu durumu		Boşluk yapısı		Taşıma Gücü
	Donma Öncesi	Donma Sonrası	Şekil	Değişim	Değişkenlik Durumu
Kuru				Yok	Yok
Hava ile Kurutulmuş				Yok	Eskiye dönebilir. (Sürtünme değişikliği)
Yaş				Orta	Eskiye dönemez. (Yapısal değişiklik)
Doymuş				Büyük	Eskiye dönemez. (Yapısal değişiklik)

Çizelge 6.12. donma-çözünme etkileri nedeniyle taşıma kapasitesindeki düşüşleri özetlemektedir. Dane gözenek suyu donma neticesinde dane yüzeyine hareket eder. Bu da daneler arası sürtünmede ve boşluk yapısında değişimlere neden olur. Değişimin miktarı su içeriği ile değişir ve eğer yalnızca daneler arası sürtünme değişirse taşıma kapasitesindeki düşüş geri alınabilir. Bununla birlikte eğer boşluk yapısı önemli miktarlarda değişmiş ise taşıma kapasitesi eski haline gelmez (Kawabata vd., 2016).

7. MALİYET ANALİZİ

Yol inşaatlarında temel malzemesi olarak taş ocaklarından temin edilen kırma taş agregalar kullanılmaktadır. Bu malzemelerin elde edilme maliyetleri ve nakliye bedelleri oldukça büyük bütçe oluşturmaktadır. Bu sebeple imalatın yapıldığı yere yakın mesafelerden temin edilen malzemeler inşaat maliyetlerinde ciddi miktarlarda düşüşe sebep olmaktadır. Bir ocaktan doğal agrega elde etmenin maliyeti, taş ocağında patlayıcı madde kullanılması, ocaktan elde edilen taşın kompresörle kırılması, lastik tekerlekli yükleyici ile yüklenmesi, konkasörde kırılması ve elenerek sınıflandırılması, araçlara yüklenmesi ve inşaat sahasına nakliyesi gibi kalemlerden oluşmaktadır. Bu kalemlerden oluşan maliyet doğal agrega için Karayolları Genel Müdürlüğü (KGM) 2019 yılı birim fiyatları dikkate alınarak hesaplanmıştır (Çizelge 7.1).

Çizelge 7.1. Doğal agrega birim maliyet analizi

Poz No: KGM/15.113/K					
Açıklama: Ocak Taşından Konkasörle Kırılmış ve Elenmiş 25 mm (1")'lik Temel Malzemesi Temini					
Birim: m ³					
Poz No	Tanımı	Birimi	Miktar	Birim Fiyat (TL)	Tutar (TL)
	Malzeme				15,72
KGM/08.021/K.	Ocaktan taş hazırlanması	m ³	1	15,72	15,72
	Makine				9,76
19.100.1028	Lastik tekerlekli yükleyici 1 saat ücreti	saat	0,025	117,40	2,94
03.530	Konkasörün 1 saatlik ücreti	saat	0,025	273,01	6,83
	İşçilik				4,03
10.100.1060	Formen	saat	0,025	23,10	0,58
10.100.1062	Düz işçi (inşaat işçisi)	saat	0,3	11,50	3,45
	Diğer				1,24
10.110.1003	Her cins ve tonajda motorlu araç taşıma katsayısı K	adet	0,00375	330,00	1,24
Toplam					30,75
Yüklenici Karı (%25)					7,69
Toplam					38,43

KGM 2019 yılı birim maliyetleri kullanılarak, doğal agregadan elde edilen 1 m³ temel malzemesinin nakliye hariç birim maliyeti 38.43 TL/m³ olarak hesap edilmiştir. Doğal agreganın yığın birim ağırlığının ortalama 1.6 t/m³ olduğu kabul edilerek, 1 ton temel malzemesinin birim maliyeti 24.02 TL/t olarak hesaplanmıştır.

Mermer atıklarının maliyet hesaplamalarına, lastik tekerlekli yükleyici ile yüklenmesi, elenerek çaplarına ayrılması, konkasörde kırılması, taşıma aracına yüklenmesi ve inşaat sahasına nakliyesi işleri girmektedir. Bu maliyet KGM 2019 yılı birim fiyatları kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 7.2). Mermer atıklarından imal edilen 1 m³ temel malzemesinin 2019 yılı birim fiyatları ile nakliye hariç birim maliyeti 18.78 TL/m³ olarak hesaplanmıştır. Mermer atıklarının yığın birim ağırlığı ortalama 1.56 t/m³ olduğu kabul edilerek, 1 ton temel malzemesi birim maliyeti 12.04 TL/t olarak hesap edilmiştir.

Çizelge 7.2. Mermer atıkları birim maliyet analizi

Poz No: KGM/15.113/K					
Açıklama: Ocak Taşından Konkasörle Kırılmış ve Elenmiş 25 mm (1")'lik Temel Malzemesi Temini					
Birim: m ³					
Poz No	Tanımı	Birimi	Miktar	Birim Fiyat (TL)	Tutar (TL)
	Malzeme				0,00
					0,00
	Makine				9,76
19.100.1028	Lastik tekerlekli yükleyici 1 saat ücreti	saat	0,025	117,40	2,94
03.530	Konkasörün 1 saatlik ücreti	saat	0,025	273,01	6,83
	İşçilik				4,03
10.100.1060	Formen	saat	0,025	23,10	0,58
10.100.1062	Düz işçi (inşaat işçisi)	saat	0,3	11,50	3,45
	Diğer				1,24
10.110.1003	Her cins ve tonajda motorlu araç taşıma katsayısı K	Adet	0,00375	330,00	1,24
				Toplam	15,03
				Yüklenici Karı (%25)	3,76
				Toplam	18,78

Doğal agregadan temin edilen 1 ton temel malzemesinin nakliye hariç birim maliyeti 24.02 TL olarak bulunmuştur. Mermer atıklarının değerlendirilmesi ile temin edilen 1 ton temel malzemesinin nakliye hariç birim maliyeti de 12.04 TL olarak bulunmuştur. Mermer atıklarından elde edilecek malzemenin birim maliyeti ile doğal agregadan elde edilecek malzemenin birim maliyeti arasında yaklaşık olarak iki kat fark oluşmaktadır.

1 ton temel malzemesi için oluşacak fiyat farkı hesaplanacak olursa:

$$24.02 \text{ TL} - 12.04 \text{ TL} = 11.98 \text{ TL} \text{ olarak hesaplanır.}$$

Bu iki malzeme arasındaki birim fiyat farkının, taşıma uzaklığı olarak kaç kilometreye karşılık geleceği hesaplanacak olursa:

$M > 10$ km olan taşımalar için taşıma eşitliği (7.1) aşağıdaki gibidir.

$$F = 1.25 \times A \times K \times (0.0007 \times M + 0.01) \quad (7.1)$$

F: Birim fiyat,

A: Yol durum katsayısı,

K: Taşıma katsayısı birim fiyatı,

M: Mesafe.

Analiz çalışması yapılan 2019 yılı K katsayısı 330.00 TL (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2019) ve Yenipazar ilçesine ait A katsayısı 1.25 olduğundan (İl Özel İdaresi Komisyon Raporu, 2019),

$$F = 1.25 \times 1.25 \times 330 \times (0.0007 \times M + 0,01)$$

$$F = 0.3609 \times M + 5.16$$

$$F = 0.3609 \times M + 5.16$$

$$11.98 = 0.3609 \times M + 5.16$$

$$M = 18.9 \text{ km} \text{ olarak bulunur.}$$

Yapılan hesaplarla elde edilen 18.9 km'lik taşıma uzaklığına, mermer atıkları ve doğal agrega için ekonomik eşitlik mesafesi denilebilir. Başka bir ifadeyle, mermer atıkları 18.9 km uzaklıktaki bir yol şantiyesi için şantiye sahası içinde bir taş ocağı olması durumunda bile, 18.9 km uzaklıktan mermer atıkları getirerek kullanmak, doğal agrega kullanımını ile aynı maliyeti verecektir. Şantiye sahası ile mermer ocağı arasındaki mesafenin 18.9 km'den daha az olması durumunda, temel malzemesi olarak mermer atıklarının kullanılması malzeme birim fiyatında bir azalmaya ve dolayısıyla da ekonomik bir kazanç elde edilmesine sebep olacaktır.

8. SONUÇLAR

Türkiye’de, katı atık sahalarında atıl bir şekilde depolanan mermer atıkları hem ekonomik açıdan bir kayıp hem de çevre açısından bir görüntü kirliliği ve tehdit oluşturmaktadır. Atıkların kullanılmamasından dolayı oluşan ekonomik kaybın yanı sıra kontrolsüz depolanması da ek bir maliyet getirmektedir. Günümüzde nüfusun hızla artması ve buna bağlı olarak doğada bulunan doğal kaynakların hızla tükenmesi bizleri atık malzemelerin geri dönüşüm olanaklarını araştırmaya yönlendirmektedir. Bu malzemelerin uygun şartlarda değerlendirilerek ekonomiye kazandırılması gerekmektedir.

Yol kaplamaları mermer atıklarının en iyi kullanım alanlarından birisidir. Bu amaçla yol temel tabakasında Bilecik ili Yenipazar ilçesinde bir mermer ocağından temin edilen mermer atıklarının bir karayolu inşaatında kullanılan agreganın yerine farklı aralıklarda ikame edilmesinin uygunluğu araştırılmıştır. Yapılan analiz ve deney sonuçları KTŞ (2013)’te belirtilen standart değerler ile karşılaştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Elek analizi deney sonucuna göre oluşturulan karışım gradasyonları KTŞ’de belirtilen alt ve üst limitler arasında kalmaktadır.
- Parçalanma direncinin tayini Los Angeles aşınma deneyi metoduna göre yapılmış ve sonuç agrega için %19.46, mermer atığı için %21.68 olarak belirlenmiştir. Bu deney sonucunda elde edilecek değer KTŞ limitleri temel tabakası için maksimum %35 olarak belirtilmiştir. Dolayısıyla agrega ve mermer atığı için bulunan değerler KTŞ şartlarını sağlamıştır.
- Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deney sonucu agrega için %3.24, mermer atığı için %2.50 olarak bulunmuştur. Hava tesirlerine karşı dayanıklılık değeri KTŞ limitlerinde temel tabakası için maksimum %20 olarak belirtilmiştir. Agregası ve mermer atığı değerleri bu koşulu sağlamıştır.
- Yassılık indeksi deney sonucu agrega için %12.81, mermer atığı için %14.64 olarak bulunmuştur. KTŞ limitleri temel tabakası için maksimum %30 değerine kadar müsaade etmiştir. Her iki malzemede KTŞ değerlerini sağlamıştır.
- Su emme ve özgül ağırlık deney sonucu agrega için %0.35, mermer atığı için %0.19 olarak bulunmuştur. KTŞ limitleri temel tabakası için maksimum %3 değerini

istemektedir. Agregada ve mermer atığı değerleri bu koşulu sağlamıştır. Ayrıca her iki malzemenin de özgül ağırlığı 2.64 gr/cm^3 olarak hesaplanmıştır.

- Yapılan NaOH ile organik madde tespit deneyi sonuçlarına göre iki malzemede de NaOH çözeltisinde herhangi bir renk değişimi gözlemlenmemiş ve malzemeler içerisinde organik madde bulunmadığı tespit edilmiştir. Her iki malzemede bu sonuçla KTŞ’de istenen özelliği göstermiştir.

- Kil topağı deneyi sonuçlarına göre, agregada kaba malzemeler için %0.17, ince malzemeler için %0.53 olarak bulunmuştur. Bu değerler mermer atığında kaba malzemeler için %0.11, ince malzemeler için %0.40 olarak bulunmuştur. KTŞ limitlerine göre temel tabakası için bu oran maksimum %1’dir. Deney sonuçlarına göre her iki malzemede şartname koşullarını sağlamaktadır.

- Yapılan plastik limit deneyinde agregada ve mermer atığı malzemelerinin plastik özellikte olmadığı belirlenmiştir. Plastik özellikte olmadığından, malzemeye likit limit deneyi yapılamamıştır. Bu özelliği ile agregada ve mermer atığı KTŞ verilerine uygun bulunmuştur.

- Metilen mavisi deney sonuçlarına göre, agregada için 1, mermer atığı için 0.75 olarak bulunmuştur. KTŞ limitleri bu değeri temel tabakası için maksimum 3 olarak belirtmiştir. Her iki malzemede KTŞ değerlerini sağlamıştır.

- Tip-1 PM temel tabakası için oluşturulan karışımlar ile Modifiye proktor deneyleri yapılmıştır. Her karışım için optimum su muhtevaları ve maksimum KBHA’lar belirlenmiştir. Elde edilen bu değerler kullanılarak CBR numuneleri hazırlanmış, anlık ve 7 günlük kür sonunda CBR deneyleri yapılmıştır. Buna göre anlık kuru CBR değerleri arasında en yüksek değer Karışım-4 için %265.22, anlık yaş CBR değerleri için en yüksek değer Karışım-1 için % 285.94 olarak bulunmuştur. 7 günlük kür sonucunda kuru CBR değeri en yüksek %277.52 ile Karışım-1’de, en yüksek yaş CBR ise yine Karışım-1’de % 285.96 olarak tespit edilmiştir. KTŞ limitlerinde CBR değeri için %100’lük bir alt limit belirlemiştir. Bütün karışım tipleri bu değer üzerinde kalarak şartname koşullarını yerine getirmiştir.

- Donma-çözünme deney sonuçlarına göre genel olarak ilk 4 çevrimde CBR değerlerinde bir artış ve daha sonraki çevrimlerde bir düşüş yaşanmıştır. Elde edilen tüm deney sonuçlarına göre mermer atığı KTŞ (2013)’te belirtilen kriterleri sağlamış karayolu esnek üstyapılarında temel tabakasında agregada olarak kullanımı uygun bulunmuştur.

- Yapılan maliyet analizine göre, agrega birim maliyeti 24.02 TL/t, mermer atığı birim maliyeti 12.04 TL/t olarak hesaplanmıştır. Agrega birim maliyeti mermer atığı birim maliyetinin yaklaşık olarak iki katını oluşturmaktadır. Ayrıca aradaki bu fark 18.9 km'lik bir ekonomik eşitlik mesafesi oluşturmuştur. Dolayısıyla bir mermer ocağı ile bir yol inşaatı şantiyesinin hesaplanan ekonomik eşitlik mesafesi içerisinde bulunması ve mermer atığı malzemesinin kullanılması ülkemiz için ekonomik bir kazanç sağlayacaktır.

- Bilecik ili için 35 firma üzerinde yapılan bir çalışmada elde edilen sonuçlara göre (Bkz. Çizelge 2.4.) bir firma günlük 35 ton mermer atığı oluşturmaktadır. Bir firmanın ayda ortalama 25 gün çalıştığı düşünülürse açığa çıkacak olan atık miktarı:

$$35 \times 25 = 875.00 \text{ t/ay olur.}$$

35 firmanın oluşturacağı toplam atık miktarı ise:

$$35 \times 875.00 = 30.625 \text{ t/ay olmaktadır.}$$

Karayolları geometrik standartlarından (KGM, 2005) kent içinden geçen 12 metre platform genişliğine sahip iki şeritli bir yolda 20 cm Tip-1 PM temel tabakası serilecek olması durumunda eşitlik (8.1) yardımı ile 1 metre yol yapımı için ne kadar malzeme gerektiği hesaplanır.

$$\text{Gerekli malzeme} = \text{platform genişliği} \times \text{kalınlık} \times \text{özgül ağırlık} \quad (8.1)$$

$$\text{Gerekli malzeme} = 12 \times 0,20 \times 2,64$$

$$\text{Gerekli malzeme} = 6.336,00 \text{ t/metre}$$

Bu sonuca göre 30.625,00 tonluk malzeme ile yaklaşık olarak 4.833,00 metrelik bir yolun temel tabakası imal edilebilmektedir. Bilecik ilinin mermer ocağı sayısının fazla olması bu ilde yapılacak olan yollarda mermer atıklarının kullanılması ile hem yolu yapacak olan firmalara hem de ülke ekonomimize büyük katkılar sağlayacaktır.

- Gelecek nesillere yaşanabilir bir dünya, zengin hammadde kaynakları ve güçlü bir ekonomi bırakmak için atık geri dönüşümüne mümkün mertebede dikkat etmemiz gerekmektedir. Aksi halde dünyamız ilerleyen süreçlerde yaşanabilir olmaktan çıkacaktır.

KAYNAKLAR

- AASHTO T96, (2002). *Standard Method of Test for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in the Los Angeles Machine*
- Ahmed, A.A.M., Kareem, K.H.A., Altohamy, A.M., Rizk, A.M., (2014). Potential use of mines and quarries solid waste in road construction and as replacement soil under foundations, *Journal of Food Engineering Sciences*, 42 (4), 1094-1105.
- Ahmedzade, P., Yılmaz, M., (2007). Uzun Ömürlü Esnek Üstyapıların Tasarımı. 7. *Ulaştırma Kongresi*, İstanbul.
- Alataş, T., Somunkıran, E. T., Ahmedzade, P. (2006). Ereğli Demir Çelik Fabrikası Cürufunun Asfalt Betonunda Agrega Olarak Kullanılması. *Fırat Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(2), 225-234.
- Alyıldız İ. S., (2003). *Isparta Dereboğazı Tüflerinde Donma-Çözülme Periyotlarının Fiziko-Mekanik Davranışlarına Etkisi*. S.D.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Isparta.
- Arm, M. (2001). Self-cementing properties of crushed demolished concrete in unbound layers: Results from triaxial tests and field tests. *Waste Management*, 21, 235-239.
- ASTM C142, (2010). *Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates*. American Society for Testing and Materials, USA.
- ASTM D6035, (2013). *Standard Test Methods for Determining the Effect of Freeze-Thaw on Hydraulic Conductivity of Compacted or Intact Soil Specimens Using a Flexible Wall Permeameter*. American Society for Testing and Materials, USA.
- Bilensoy, M., (2010). *Mermer fabrikaları toz atıklarının değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Bilgin, N., (2010). *Mermer Tozu Atıklarının Yapı Malzemesi Üretiminde Kullanılması*. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Binal A., (1996). *Aksaray-Ihlara Vadisindeki Volkanosedimanter Kayaçlarda Görülen Duyarsızlık Mekanizmalarının Araştırılması*. H.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Ankara.
- Chakraborty, A., Nagar, B., (2016). An experimental study on rigid pavements by using various waste Material. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 4 (6), 547-554.
- Çağlar, A.Ç., (2007). *Endüstriyel atık malzemelerinin karayollarında kullanımı*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Çetin, A., (1997). *Endüstriyel Atıkların Asfalt Beton Kaplama Karışımında Değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.

- Dhanapandian S., Gnanavel, B. ve Ramkumar T., (2009b). Utiliation of Granite and marble sawing Powder wastes as Brick Metarials. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 4 (2), 47-160.
- De Rezende, R, l., and Carvalho, J. C., (2003). The Use of Quarry Waste in Pavement Constructioné. *Resources Convertion & Reycling*.
- Deniz, M.T., Sönmez, İ., Yıldırım, S. A., Eren, B. K., (2005). Kullanılmış otomobil lastiklerinin bitümlü sıcak karışım performansına etkisi. *6. Ulaştırma Kongresi, İstanbul*.
- Dhanapandian S. ve Gnanavel, B., (2009a). Studies on Granite and Marble Sawing Powder Wastes in İndustrial Brick Formulation. *Asian Journal of Applied Sciences*, 2 (4), 331-340 ISSN 1996-3343.
- Domitrovic, J., Rukavina, T., Dimter, S., (2016). Effect Of Moisture Content and Freeze-thaw Cycles On Bearing Capacity Of RAP/Natural Aggregate Mixtures, *4th International Conference on Road and Rail Infrastructure*, 237-243, Sibenik Croatia
- Drew, L.J., Langer, W.H., Sach, Janet, S., (2002). Enviromentalism and Natral Aggregate Mining", *Natural Resources Research, Elsevier Sience*, 11 (11)
- Fındık F. S., (2005). *Karayolu Esnek Üst Yapılarının Alttemel Tabakasının Stabilizasyonunda Hafif Agregaların Etkisi*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Fırat, S., Yılmaz, G., Cömert, A.T., Sümer, M., (2012). Utilization of marble dust, fly ash and waste sand (silt-quartz) in road subbase filling Materials. *KSCCE Journal of Civil Engineering*, 16 (7), 1143-1151.
- Genç, Ö. (2004). *Blok Mermer ve Mermer İşleme Sektörü*. Rapor, Türkiye Kalkınma Bankası A.Ş.
- Gurbuz, A., (2015). Marble powder to stabilise clayey soils in sub-bases for road construction, *Road Materials and Pavement Design*, 16 (2), 481-492.
- Hınıslioğlu, S., Açar, E., (2003). Use of Waste High Density Polyethylene as Bitumen Modifier in Asphalt Concrete Mix. *Material Letters*.
- <https://www.bilmerder.org>, (20.04.2020)
- <https://www.enerji.gov.tr/tr-TR/Sayfalar/Dogal-Taslar>, (20.04.2020)
- <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=BILECIK> (20.04.2020)
- https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/images/b_h/mermer.jpg, (20.04.2020)

<https://www.mta.gov.tr/v3.0/sayfalar/hizmetler/maden-haritalari/bilecik.pdf>,
(20.04.2020)

İlcalı, M., (1998). *Karayolu Üstyapısında Erdemir Cürufunun Kullanılabilirliğinin Araştırılması*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

İlcalı, M., Tayfur, S., Özen, H., Sönmez, İ. ve Eren, K., (2001). *Asfalt ve uygulamaları*, İstanbul Asfalt Fabrikaları Sanayi ve Ticaret A.Ş., İstanbul.

Ishikawa, T., (2015). Advanced Laboratory Tests On Granular Materials For Transportation Facilities In Cold Regions, *The first China-Japan Mini Workshop on High Speed Railway Geotechnics*, Beijing, CHINA

Kacı, S. (2017). *Bilecik Mermer Sektörü Raporu*, Bursa Eskişehir Bilecik Kalkınma Ajansı (BEBKA)

Kailash, K., Alingprabhu, S.P., Devaraj, S.H, Mehta, D.K., Awanti, S.S., (2013). Characterization Of Limestone Waste For Construction Of Flexible Pavement. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 221-225, eISSN: 2319-1163

Karayolları Genel Müdürlüğü, (2005). *Karayolu tasarım el kitabı*, syf:99, Ankara.

Karayolları Genel Müdürlüğü, (2015). *Birim Fiyat Analizleri*. T.C. Ulaştırma, Denizcilik ve Haberleşme Bakanlığı, Ankara.

Karayolu Teknik Şartnamesi. (2013). Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara.

Kawabata, S., Ishikawa, T. ve Kamayama, S., 2016. Effects of Freeze-Thaw History on Bearing Capacity of Granular Base Course Materials, *The 3rd International Conference on Transportation Geotechnics*, 143, 828-835

Kushwah, R.P., Sharma, I. C., Chaurasia, P. (2015). Utilization of “marble slurry” in cement concrete replacing fine aggregate, *American Journal of Engineering Research*, 4(1), 55-58.

Lappa, Ş., Yıldız, A., Demirbilek, Ö. (1997). *Mermercilikte atık sorunu, atıkların değerlendirilmesi ve çevre ilişkileri*. Mermercilik Semineri Raporu, Afyonkarahisar

Lindqvist, J.E., Malaga, K., Middendorf, B., Savukoski, M., & Pétursson, P., 2007, ‘Frost resistance of natural stone, the importance of micro and nano porosity’, www.sgu.se/dokument/fou_extern/Lindqvist-et-al_2007.pdf, last visited on 29th of October, 2007.

Misra, A.K., Mathur, R., Rao, Y.V., Singh, A.P., Goel, P., (2010). A new technology of marble slurry waste utilisation in roads. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 69, 67-72.

- Mostafa, A.E.A., (2016). Investigating the effect of using recycled Materials in highway construction. *International Journal of Scientific & engineering Research*, 7 (2), 362-368.
- Nejad, F.M., Azarhoosh, A.R., Hamed, G.H., (2013). Laboratory evaluation of using recycled marble aggregates on the mechanical properties of hot mix asphalt. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25 (6), 741-746.
- Nicholson, D. T., (1995). The Visual Impact of Quarrying. *Quarry Management*, 22 (7), 39-42.
- Okagbue, C., O., Onyeobi, T.U.S., (1999). Potansiyel of marble dust to Stabilise Red Tropical Soils For Road Construction. *Engineering Geology*, 53.
- Önal, A. ve Kahramangil, M., Bitümlü karışımlar laboratuvar el kitabı, K.G.M Teknik Araştırma Dairesi Başkanlığı, Ankara, (1993).
- Rosa, M. (2006). *Effect of freeze and thaw cycling on soils stabilized using fly ash* (MS Thesis). University of Wisconsin-Madison, Madison, WI.
- Sezgin, H., (2003). *Karayolları Esnek Üstyapılarında Alttemel Tabakasının Yapay Sinir Ağları Kullanılarak Modellenmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Soleimanbeigi, A., Shedivy, R.F., Tinjum, J. F. & Edil, T.B., 2015, Climatic effect on resilient modulus of recycled unbound aggregates, *Road Materials and Pavement Design*, 16:4, 836-853, DOI: 10.1080/14680629.2015.1060250
- Şenol, A., (2010). *Karayolu Yol Üst Yapısı*. Cumhuriyet Üniversitesi, Sivas, 63.
- Şentürk, A., Gündüz, L., Tosun, Y.G. ve Sarıışık A., (1996). *Mermer Teknolojisi Kitabı*. S.D.Ü. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü, Isparta, 242.
- Terzi, S., Karaşahin, M., (2003). Mermer Toz Atıklarının Asfalt Betonu Karışımlarında Filler Malzemesi Olarak Kullanımı. *Teknik Dergi*, TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası 14(2).
- Tuncan, A., Çetin, A., Tuncan, M., (1998). Lastik atıkların asfalt betonu kaplamaların mekanik özelliklerine etkileri. 2. Ulusal Asfalt Sempozyumu Bildiriler Kitabı, Ankara.
- Tunç, A., (2002). *Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları*. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- TS 1500, (2000). *İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS 1900-1, (2006). *İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri-Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

- TS 1900-2, (2006). *İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuvar Deneyleri-Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-3, (2012). *Agregaların geometrik özellikleri için deneyler-Bölüm 3: Tane şekli tayini-Yassılık endeksi*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 933-9, (2014). *Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler-Bölüm 9: İnce Malzeme Tayini – Metilen Mavisini Deneyi*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-2, (2010). *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 2: Parçalanma direncinin tayini için metotlar*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1097-6, (2013). *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler 6: Tane yoğunluğu ve su emme oranı tayini*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1367-2, (2010). *Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler bölüm 2: Magnezyum sülfat deneyi*. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1744-1, (2013). *Agregaların Kimyasal Özellikleri İçin Deneyler-Bölüm 1: Kimyasal Analiz*, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- Tunç, A., (2007). *Yol Malzemeleri ve Uygulamaları*. Nobel Yayın Dağıtım, Ankara
- Umar, F., Açar, E., (1985). *Yol üstyapısı*, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi, İstanbul.
- Umar, F., Açar, E., (1991). *Yol Üstyapısı*. İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul (1991).
- Ural, N., Yakşe, G., (2015). Atık Mermer Parçalarının Yol Temel Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 2 (2), 53-62
- Yakşe, G., (2016). *Atık Mermer Parçalarının Yol Temel Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Ortak Programı Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilecik
- Yates, T., ve Mauko, A., (2008). Freeze Thaw Susceptibility of Natural Stone Characterization of the Mechanical Strength and Microstructure During Frost Cycling, *11.DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components*, İstanbul.
- Yayla, N., (2004). *Karayolu Mühendisliği Kitabı*, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Yılmaz, A., Süttaş, İ. (2008). Ferrokrom Cürufnun Yol Temel Malzemesi Olarak Kullanımı. *İMO Teknik Dergi*, 4455-4470, Yazı 294.
- Yılmaz, E., Kesimal, A., Ercıktı, B., ve Kaya, R., (2003). Seslidere Taşocağı'ndan Üretilen Kayanın Üstyapı Malzemesi Olarak Kullanılabilirliği. *3. Ulusal Kırmataş Sempozyumu*, İstanbul.

Vijayalakshmi, V., Singh, S. ve Bhatnagar, D., (2001), Marble Slurry-A New Perspective, Technology Information, Forecasting and Assesment Council, New Delhi, India. 2001 Golden Jubile Year, M.B.M. Engineering College National Seminar on Small Scale Mining Jodhppur, Rajasthan.

Zoorab, S.E., Suparma, L.B., (2000). Laboratory Design and Investigation of the Properties of Continuously Graded Asphaltic Concrete Containing Recycled Plactics Aggregate Replacement. *Cement & Concrete Compasites*.

EKLER

EK-1: Elek analizi deneyi sayısal verileri.

EK-1a: Karışım-1 elek analizi deneyi sayısal verileri.

Karışım-1							
Elekler		Elekte Kalan (gr)	Kümülatif Toplam (gr)	Elek Altına Geçen (gr)	Toplam Geçen %	Şartname Limitleri	
						Alt	Üst
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	5982,00	100	100	100
1"	25,4	837,48	837,48	5144,52	86	72	100
¾"	19	927,21	1764,69	4217,31	70,5	60	92
3/8"	9,5	753,73	2518,42	3463,58	57,9	40	75
No 4	4,75	723,82	3242,24	2739,76	45,8	30	60
No10	2	843,47	4085,71	1896,29	31,7	20	45
No 40	0,425	1154,52	5240,23	741,77	12,4	8	25
No 200	0,075	598,20	5838,43	143,57	2,4	0	10
Tava		143,57	5982,00	0,00			
Kuru Numune (gr)		5982,00					

EK-1b: Karışım-2 elek analizi deneyi sayısal verileri.

Karışım-2							
Elekler		Elekte Kalan (gr)	Kümülatif Toplam (gr)	Elek Altına Geçen (gr)	Toplam Geçen %	Şartname Limitleri	
						Alt	Üst
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	6086,00	100	100	100
1"	25,4	815,52	815,52	5270,48	86,6	72	100
¾"	19	827,70	1643,22	4442,78	73	60	92
3/8"	9,5	955,50	2598,72	3487,28	57,3	40	75
No 4	4,75	785,10	3383,82	2702,18	44,4	30	60
No10	2	876,38	4260,20	1825,80	30	20	45
No 40	0,425	1038,27	5298,47	787,53	12,94	8	25
No 200	0,075	567,83	5866,30	219,70	3,61	0	10
Tava		219,70	6086,00	0,00			
Kuru Numune (gr)		6086,00					

EK-1c: Karışım-3 elek analizi deneyi sayısal verileri.

Karışım-3							
Elekler		Elekte Kalan (gr)	Kümülatif Toplam (gr)	Elek Altına Geçen (gr)	Toplam Geçen %	Şartname Limitleri	
						Alt	Üst
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	6018,00	100	100	100
1"	25,4	770,30	770,30	5247,70	87,2	72	100
¾"	19	886,60	1656,90	4361,10	72,8	60	92
3/8"	9,5	930,84	2587,74	3430,26	57	40	75
No 4	4,75	764,29	3352,03	2665,97	44,3	30	60
No10	2	794,37	4146,40	1871,60	31,1	20	45
No 40	0,425	1110,32	5256,72	761,28	12,65	8	25
No 200	0,075	524,77	5781,49	236,51	3,93	0	10
Tava		236,51	6018,00	0,00			
Kuru Numune (gr)		6018,00					

EK-1d: Karışım-4 elek analizi deneyi sayısal verileri.

Karışım-4							
Elekler		Elekte Kalan (gr)	Kümülatif Toplam (gr)	Elek Altına Geçen (gr)	Toplam Geçen %	Şartname Limitleri	
						Alt	Üst
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	6146,00	100	100	100
1"	25,4	811,27	811,27	5334,73	86,8	72	100
¾"	19	928,05	1739,32	4406,68	71,7	60	92
3/8"	9,5	897,31	2636,63	3509,37	57,1	40	75
No 4	4,75	676,06	3312,69	2833,31	46,1	30	60
No10	2	1032,53	4345,22	1800,78	29,3	20	45
No 40	0,425	1072,48	5417,70	728,30	11,85	8	25
No 200	0,075	537,24	5954,94	191,06	3,12	0	10
Tava		191,06	6146,00	0,00			
Kuru Numune (gr)		6146,00					

EK-1e: Karışım-5 elek analizi deneyi sayısal verileri.

Karışım-5							
Elekler		Elekte Kalan (gr)	Kümülatif Toplam (gr)	Elek Altına Geçen (gr)	Toplam Geçen %	Şartname Limitleri	
						Alt	Üst
1 1/2"	37,5	0,00	0,00	6015,00	100	100	100
1"	25,4	709,77	709,77	5305,23	88,2	72	100
¾"	19	974,43	1684,20	4330,80	72	60	92
3/8"	9,5	878,19	2562,39	3452,61	57,4	40	75
No 4	4,75	757,89	3320,28	2694,72	44,8	30	60
No10	2	830,07	4150,35	1864,65	31	20	45
No 40	0,425	1090,52	5240,87	774,13	12,87	8	25
No 200	0,075	566,01	5806,88	208,12	3,46	0	10
Tava		208,12	6015,00	0,00			
Kuru Numune (gr)		6015,00					

EK-2: Los Angeles deneyi sayısal verileri.

Agrega	Agreganın İlk Ağırlığı (gr)	Agreganın 500 Devir Sonrası Ağırlığı (gr)	Fark (gr)	Agreganın 500 Devir Sonrası Aşınma Kaybı (%)
Agrega (İncirli taş ocağı)	5001,00	4028,00	973,00	19,46
Mermer atığı (Yenipazar mermer ocağı)	5000,00	3916,00	1084,00	21,68

EK-3: Hava tesirlerine karşı dayanıklılık deneyi sayısal verileri.

Agrega	Deney Öncesi Ağılık (gr)	Deney Sonrası Ağılık (gr)	Kayıp (gr)	Kayıp (%)	Ortalama (%)
Agrega-1 (İncirli taş ocağı)	402	390	12	2,99	3,24
Agrega-2 (İncirli taş ocağı)	401	387	14	3,49	
Mermer atığı-1 (Yenipazar mermer ocağı)	400	392	8	2,00	2,50
Mermer atığı-2 (Yenipazar mermer ocağı)	401	389	12	2,99	

EK-4: Özgül ağırlık ve su emme deneyi sayısal verileri.

EK-4a: Agrega özgül ağırlık ve su emme deneyi sayısal verileri.

Agrega Deney Numunesi					
Kuru Ağırlığı M ₁ (gr)		Doygun Yüzey Kuru Ağırlığı M ₂ (gr)		Sudaki Ağırlığı M ₃ (gr)	
1.Deney	2.Deney	1.Deney	2.Deney	1.Deney	2.Deney
3522,00	3540,00	3536,00	3550,00	2185,10	2199,30
Kuru Birim Hacim Ağırlığı $M_k = \frac{M_1}{M_2 - M_3}$		DKY Birim Hacim Ağırlığı $M_d = \frac{M_2}{M_2 - M_3}$		Görünen Birim Hacim Ağırlığı $M_g = \frac{M_1}{M_1 - M_3}$	
1.Deney	2.Deney	1.Deney	2.Deney	1.Deney	2.Deney
2,61	2,62	2,62	2,63	2,63	2,64
Ortalama	2,62	Ortalama	2,63	Ortalama	2,64
Su Emme Oranı (%) $M_s = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1}\right) \times 100$		1.Deney	0,40	Ortalama Su Emme Oranı (%)	
		2.Deney	0,29	0,35	

EK-4b: Mermer atığı özgül ağırlık ve su emme deneyi sayısal verileri.

Mermer Atığı Deney Numunesi					
Kuru Ağırlığı M ₁ (gr)		Doygun Yüzey Kuru Ağırlığı M ₂ (gr)		Sudaki Ağırlığı M ₃ (gr)	
1.Deney	2.Deney	1.Deney	2.Deney	1.Deney	2.Deney
3203,00	3220,00	3210,00	3225,00	1987,40	1999,60
Kuru Birim Hacim Ağırlığı $M_k = \frac{M_1}{M_2 - M_3}$		DKY Birim Hacim Ağırlığı $M_d = \frac{M_2}{M_2 - M_3}$		Görünen Birim Hacim Ağırlığı $M_g = \frac{M_1}{M_1 - M_3}$	
1.Deney	2.Deney	1.Deney	2.Deney	1.Deney	2.Deney
2,62	2,63	2,63	2,63	2,63	2,64
Ortalama	2,63	Ortalama	2,63	Ortalama	2,64
Su Emme Oranı (%) $M_s = \left(\frac{M_2 - M_1}{M_1}\right) \times 100$		1.Deney	0,22	Ortalama Su Emme Oranı (%)	
		2.Deney	0,16	0,19	

EK-5: Yassılık indeksi deneyi sayısal verileri.

Agrega	Numune Toplam Ağırlığı (gr)	Yassı Olmayan Numune Ağırlığı (gr)	Fark (gr)	Yassılık değeri (%)
Agrega (İncirli taş ocağı)	5002,00	4361,00	641,00	12,81
Mermer atığı (Yenipazar mermer ocağı)	5001,00	4269,00	732,00	14,64

EK-6: Kil topağı deneyi sayısal verileri.

EK-6a: Agregas kil topağı deneyi sayısal verileri.

Agrega						
Agrega Boyutu (mm)		İlk Tartım A (gr)	Son Tartım B (gr)	Fark (gr)	Kil Topağı Oranı (%)	Ortalama Kil Topağı Oranı (%)
İnce agrega	1,18-4,75	613,46	610,19	3,27	0,53	0,53
Kaba agrega	4,75-9,50	1187,32	1185,52	1,80	0,15	0,17
Kaba agrega	9,50-19,00	1070,84	1068,32	2,52	0,24	
Kaba agrega	19,00-37,5	1667,15	1665,04	2,11	0,13	

EK-6b: Mermer atığı kil topağı deneyi sayısal verileri.

Mermer Atığı Deney Numunesi						
Agrega Boyutu (mm)		İlk Tartım A (gr)	Son Tartım B (gr)	Fark (gr)	Kil Topağı Oranı (%)	Ortalama Kil Topağı Oranı (%)
İnce agrega	1,18-4,75	422,92	421,24	1,68	0,40	0,40
Kaba agrega	4,75-9,50	700,54	699,49	1,05	0,15	0,11
Kaba agrega	9,50-19,00	950,12	949,18	0,94	0,10	
Kaba agrega	19,00-37,5	1382,00	1381,07	0,93	0,07	

EK-7: Metilen mavisi deneyi sayısal verileri.

Agrega	Metilen Mavisi Miktarı (mL)	Numune Miktarı (g)	Metilen Mavisi Değeri (g/kg)
Agrega (İincirli taş ocağı)	20,00	200,00	1,00
Mermer atığı (Yenipazar mermer ocağı)	15,00	200,00	0,75

EK-8: Modifiye proktor deneyi sayısal verileri.

EK-8a: Karışım-1 modifiye proktor deneyi sayısal verileri.

Modifiye Proktor Deneyi

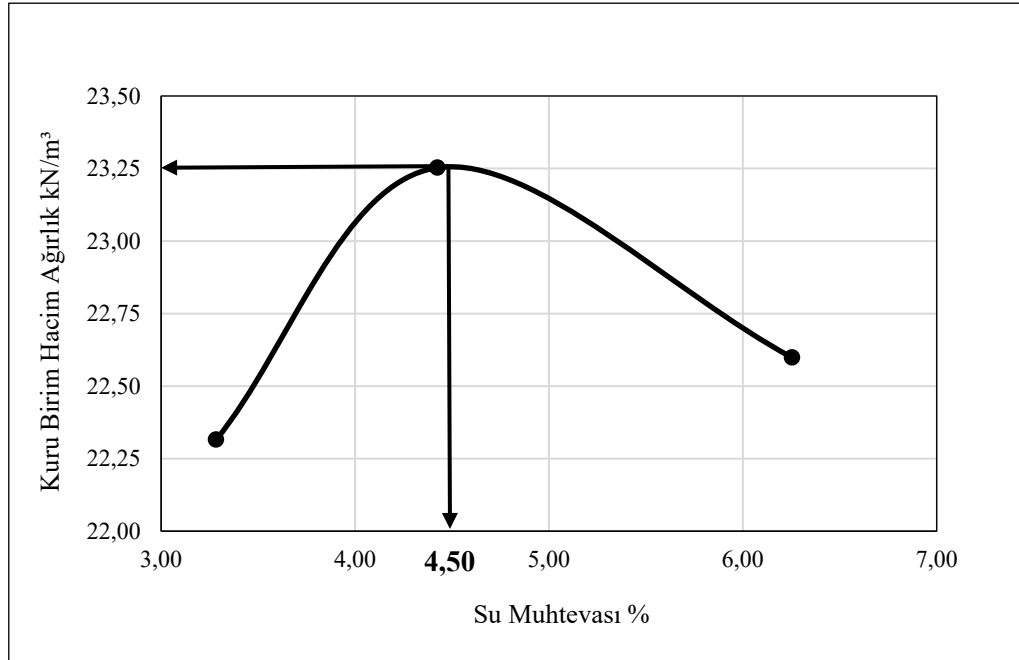
Numune : Karışım-1

Kalıp Kütlesi, g : 6312,00

Kalıbın Hacmi, cm³ : 2106,89

Kuru birim hacim ağırlık, γ_k , kN/m ³				
Deney No	1	2	3	4
Kap + Sıkıştırılmış numune, g	11262,00	11527,00	11469,00	
Kap kütlesi, g	6312,00	6312,00	6312,00	
Sıkıştırılmış numune, g	4950,00	5215,00	5157,00	
Yaş birim hacim kütle kN/m ³	23,05	24,28	24,01	
Kuru birim hacim kütle kN/m ³	22,32	23,25	22,60	

Su muhtevası, W_n , %				
Kap No	1	2	3	
Yaş numune + kap, g	250,65	228,46	270,64	
Kuru numune + kap, g	244,49	220,94	258,24	
Su miktarı, g	6,16	7,52	12,40	
Kap, g	56,90	51,00	59,98	
Kuru numune, g	187,59	169,94	198,26	
Su muhtevası, (%)	3,28	4,43	6,25	



γ_k , kN/m³ : 23,25

w_{opt} , % : 4,50

EK-8b: Karışım-2 modifiye proktor deneyi sayısal verileri.**Modifiye Proktor Deneyi**

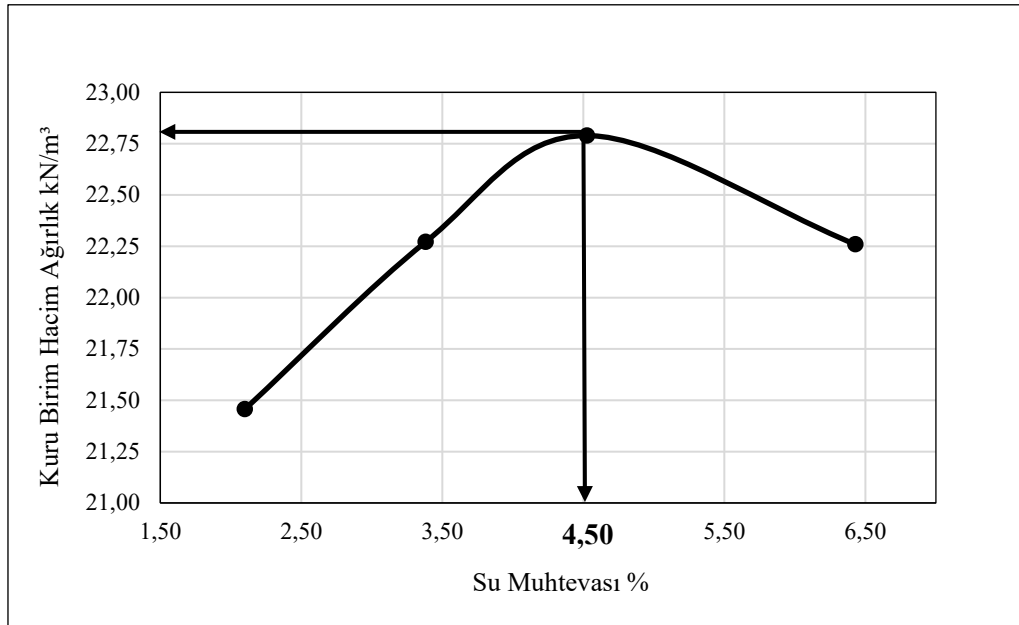
Numune : Karışım-2

Kalıp Kütlesi, g : 6312,00

Kalıbın Hacmi, cm³ : 2106,89

Kuru birim hacim ağırlık, γ_k , kN/m ³				
Deney No	1	2	3	4
Kap + Sıkıştırılmış numune, g	11017,00	11257,00	11428,00	11400,00
Kap kütlesi, g	6312,00	6312,00	6312,00	6312,00
Sıkıştırılmış numune, g	4705,00	4945,00	5116,00	5088,00
Yaş birim hacim kütle kN/m ³	21,91	23,02	23,82	23,69
Kuru birim hacim kütle kN/m ³	21,46	22,27	22,79	22,26

Su muhtevası, W_n , %				
Kap No	1	2	3	4
Yaş numune + kap, g	251,00	240,61	263,20	283,58
Kuru numune + kap, g	246,95	234,05	253,98	269,71
Su miktarı, g	4,05	6,56	9,22	13,87
Kap, g	54,06	40,06	50,29	53,98
Kuru numune, g	192,89	193,99	203,69	215,73
Su muhtevası, (%)	2,10	3,38	4,53	6,43

 **γ_k , kN/m³ : 22,80** **w_{opt} , % : 4,50**

EK-8c: Karışım-3 modifiye proktor deneyi sayısal verileri.**Modifiye Proktor Deneyi**

Numune : Karışım-3

Kalıp Kütle, g : 6312,00

Kalıbın Hacmi, cm³ : 2106,89

Kuru birim hacim ağırlık, γ_k , kN/m ³				
Deney No	1	2	3	4
Kap + Sıkıştırılmış numune, g	11102,00	11282,00	11476,00	11417,00
Kap kütle, g	6312,00	6312,00	6312,00	6312,00
Sıkıştırılmış numune, g	4790,00	4970,00	5164,00	5105,00
Yaş birim hacim kütle kN/m ³	22,30	23,14	24,04	23,77
Kuru birim hacim kütle kN/m ³	21,73	22,39	22,98	22,10

Su muhtevası, W_n , %				
Kap No	1	2	3	4
Yaş numune + kap, g	233,34	250,79	262,81	307,06
Kuru numune + kap, g	228,64	244,34	253,43	289,38
Su miktarı, g	4,70	6,45	9,38	17,68
Kap, g	51,78	52,79	51,66	55,61
Kuru numune, g	176,86	191,55	201,77	233,77
Su muhtevası, (%)	2,66	3,37	4,65	7,56

 γ_k , kN/m³ : 22,99 w_{opt} , % : 4,56

EK-8d: Karışım-4 modifiye proktor deneyi sayısal verileri.

Modifiye Proktor Deneyi

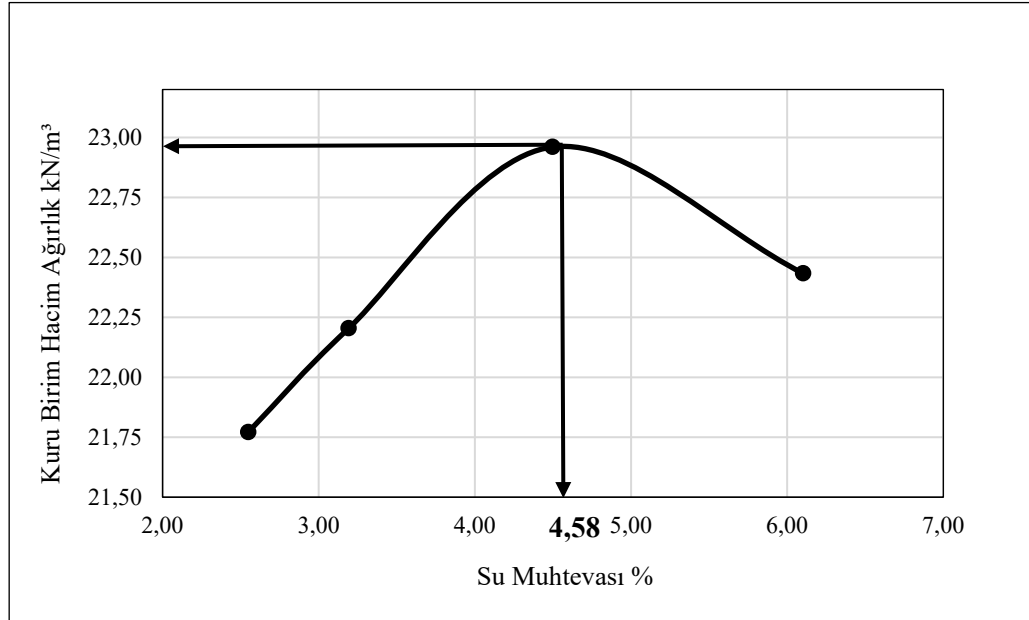
Numune : Karışım-4

Kalıp Kütle, g : 6312,00

Kalıbın Hacmi, cm³ : 2106,89

Kuru birim hacim ağırlık, γ_k , kN/m ³				
Deney No	1	2	3	4
Kap + Sıkıştırılmış numune, g	11107,00	11233,00	11465,00	11424,00
Kap kütle, g	6312,00	6312,00	6312,00	6312,00
Sıkıştırılmış numune, g	4795,00	4921,00	5153,00	5112,00
Yaş birim hacim kütle kN/m ³	22,33	22,91	23,99	23,80
Kuru birim hacim kütle kN/m ³	21,77	22,20	22,96	22,43

Su muhtevası, W_n , %				
Kap No	1	2	3	4
Yaş numune + kap, g	223,52	250,40	274,72	285,07
Kuru numune + kap, g	219,23	244,21	265,59	271,74
Su miktarı, g	4,29	6,19	9,13	13,33
Kap, g	50,92	50,28	62,61	53,32
Kuru numune, g	168,31	193,93	202,98	218,42
Su muhtevası, (%)	2,55	3,19	4,50	6,10



γ_k , kN/m³ : 22,97

w_{opt} , % : 4,58

EK-8e: Karışım-5 modifiye proktor deneyi sayısal verileri.

Modifiye Proktor Deneyi

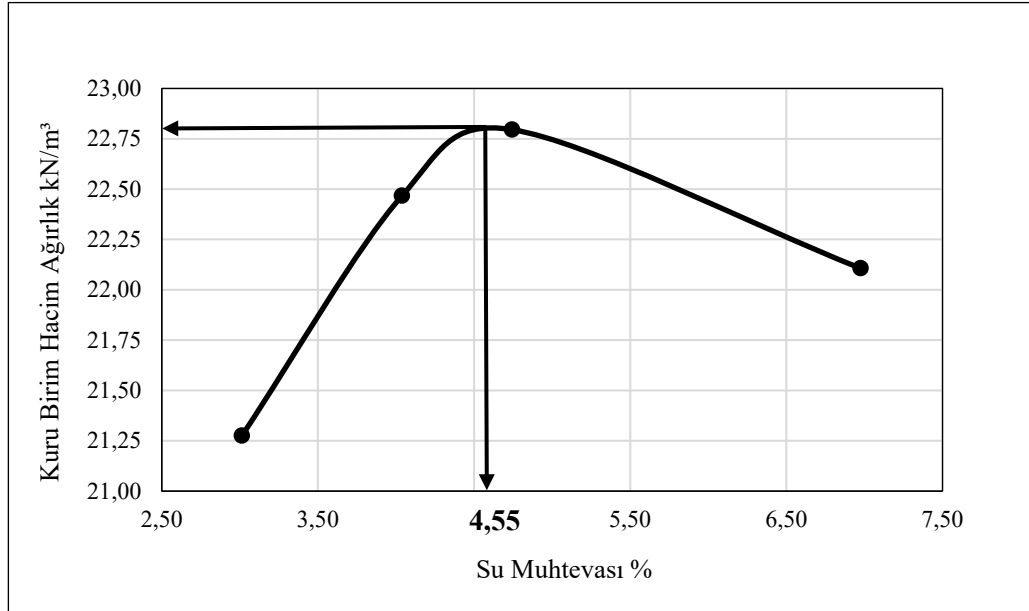
Numune : Karışım-5

Kalıp Kütle, g : 6312,00

Kalıbın Hacmi, cm³ : 2106,89

Kuru birim hacim ağırlık, γ_k , kN/m ³				
Deney No	1	2	3	4
Kap + Sıkıştırılmış numune, g	11019,00	11332,00	11440,00	11391,00
Kap kütle, g	6312,00	6312,00	6312,00	6312,00
Sıkıştırılmış numune, g	4707,00	5020,00	5128,00	5079,00
Yaş birim hacim kütle kN/m ³	21,92	23,37	23,88	23,65
Kuru birim hacim kütle kN/m ³	21,28	22,47	22,80	22,11

Su muhtevası, W_n , %				
Kap No	1	2	3	4
Yaş numune + kap, g	233,78	228,55	276,66	262,52
Kuru numune + kap, g	228,11	221,91	266,43	248,92
Su miktarı, g	5,67	6,64	10,23	13,60
Kap, g	39,94	57,48	50,77	53,95
Kuru numune, g	188,17	164,43	215,66	194,97
Su muhtevası, (%)	3,01	4,04	4,74	6,98

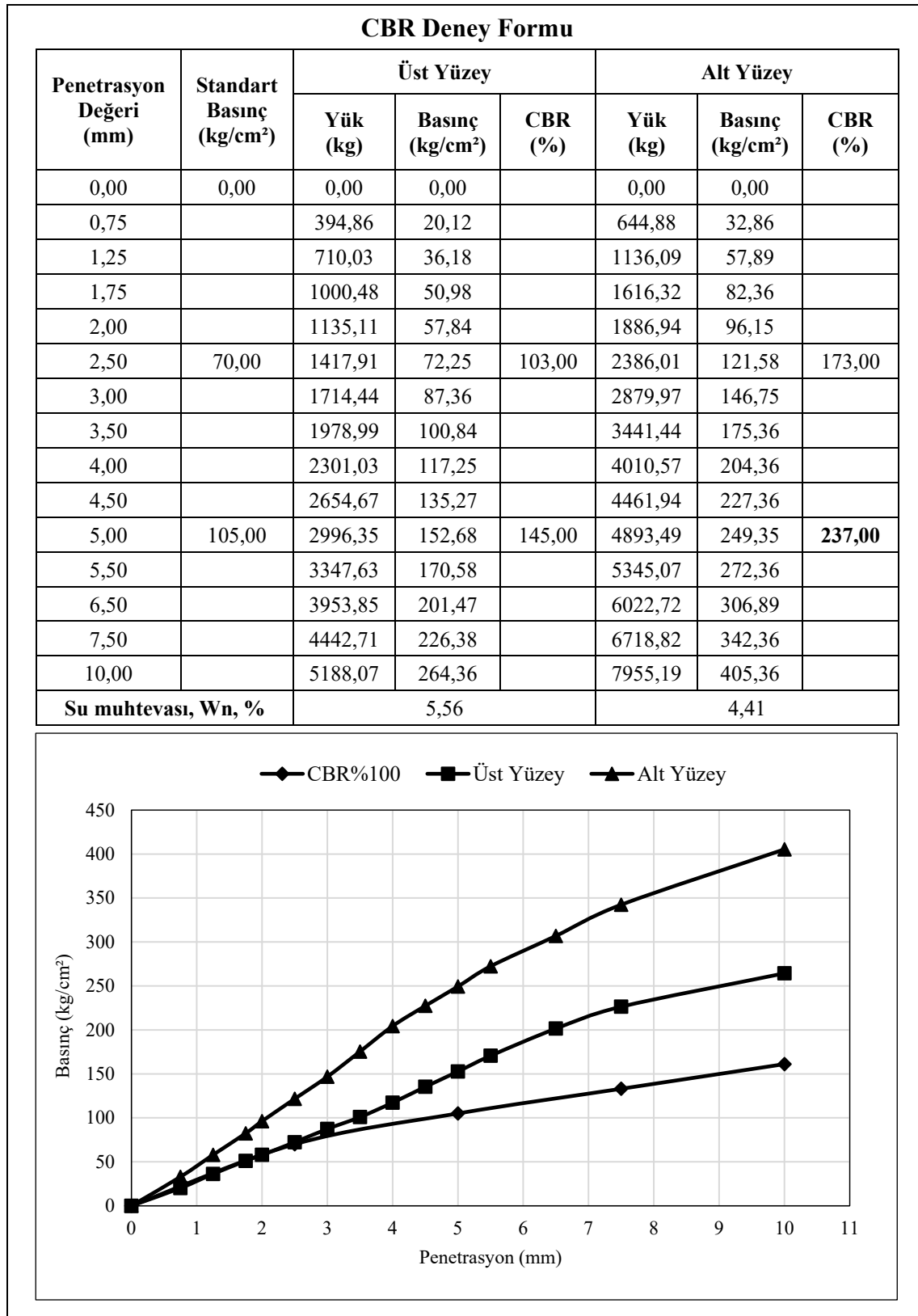


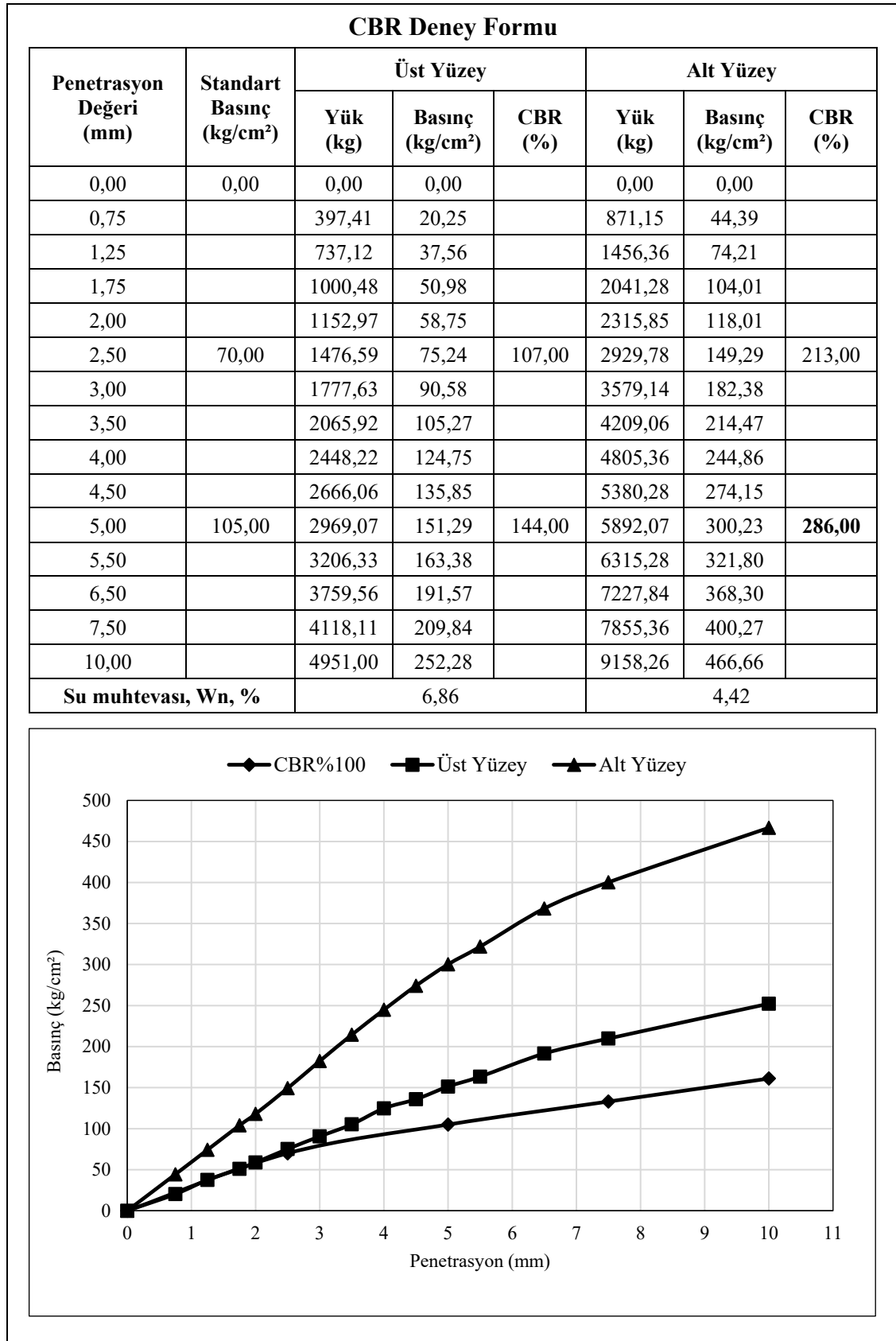
γ_k , kN/m³ : 22,80

W_{opt} , % : 4,55

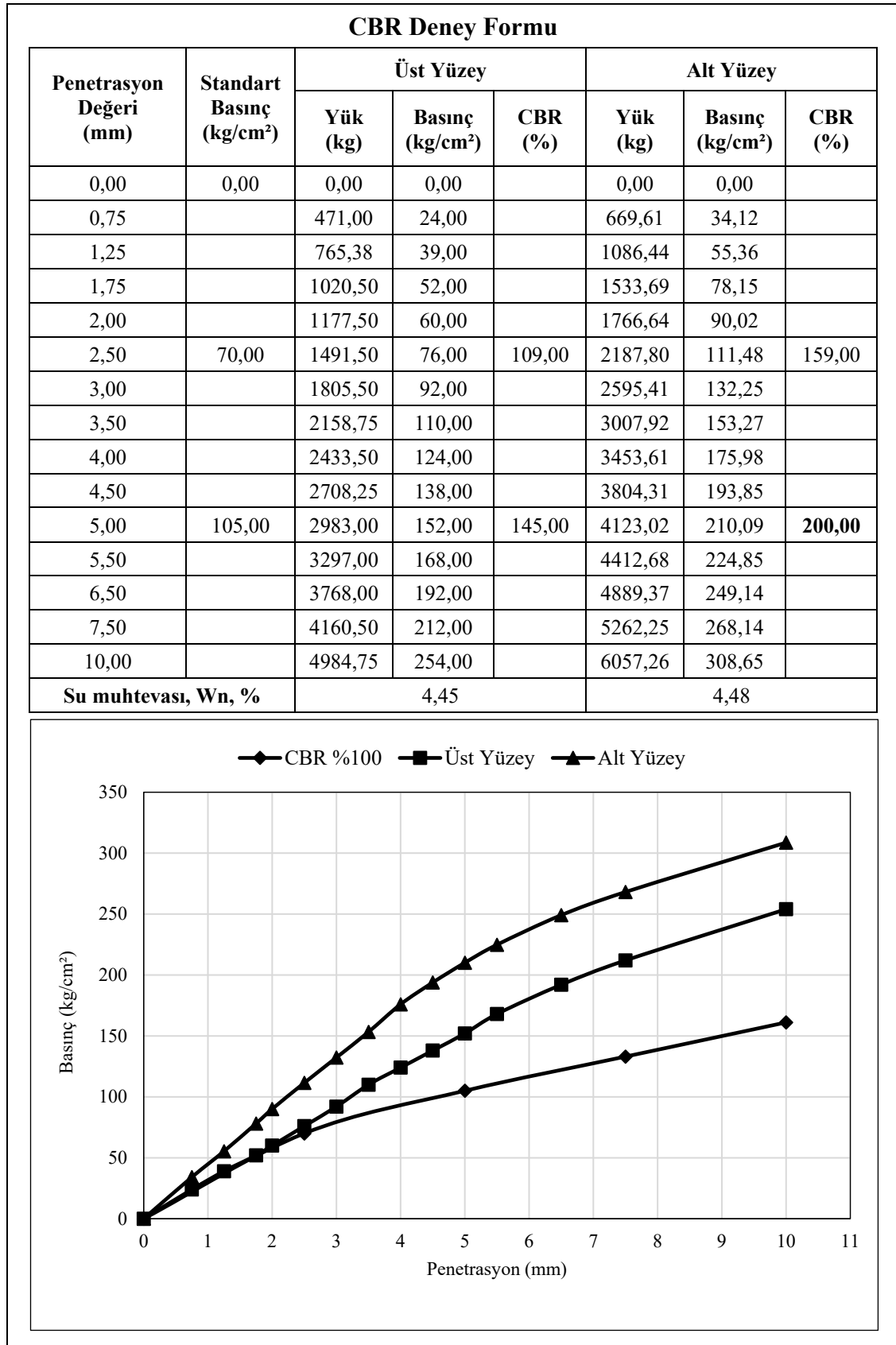
EK-9: CBR deneyi sayısal verileri (anlık).

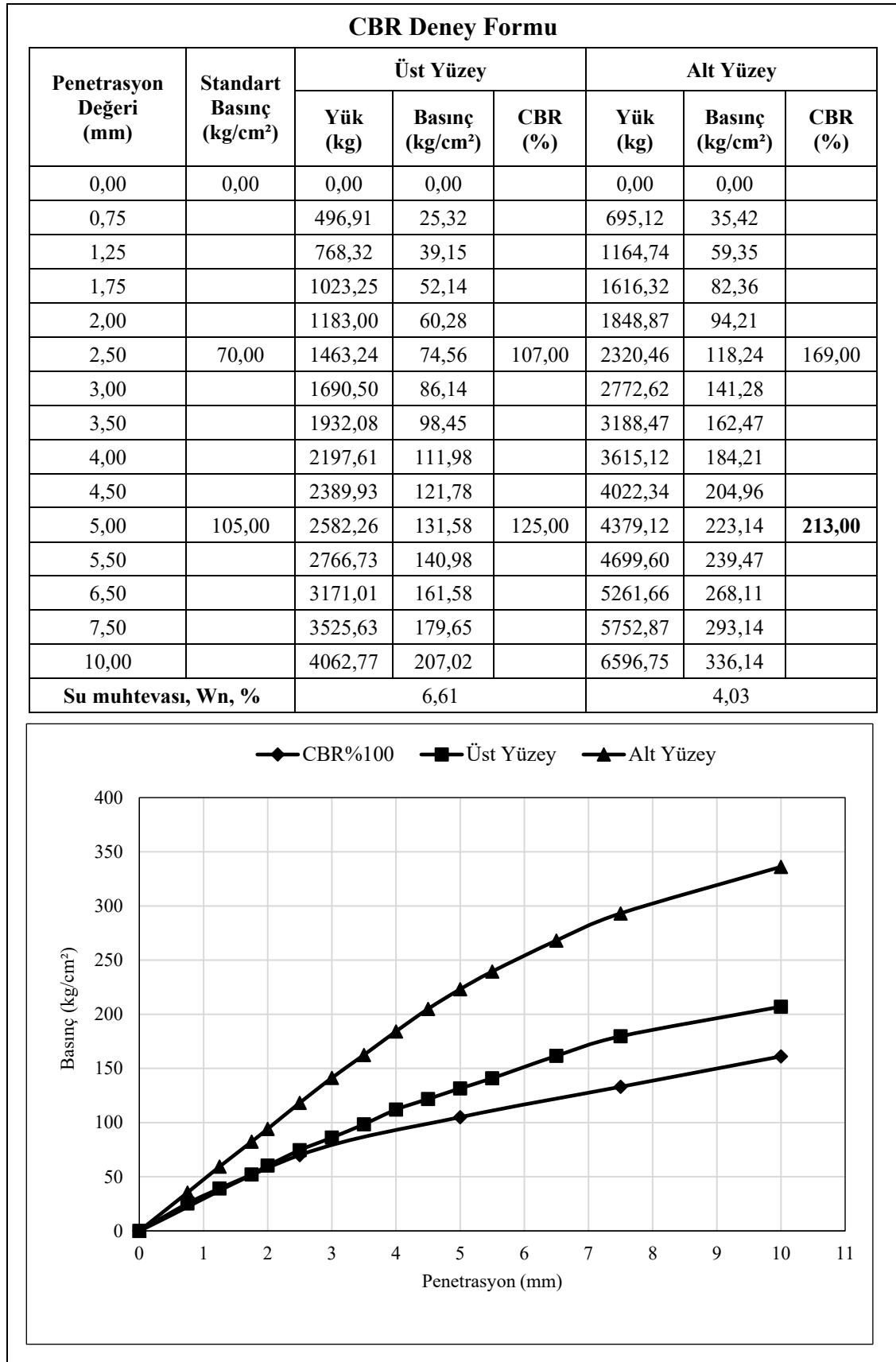
EK-9a: Karışım-1 kuru anlık CBR deneyi sayısal verileri.



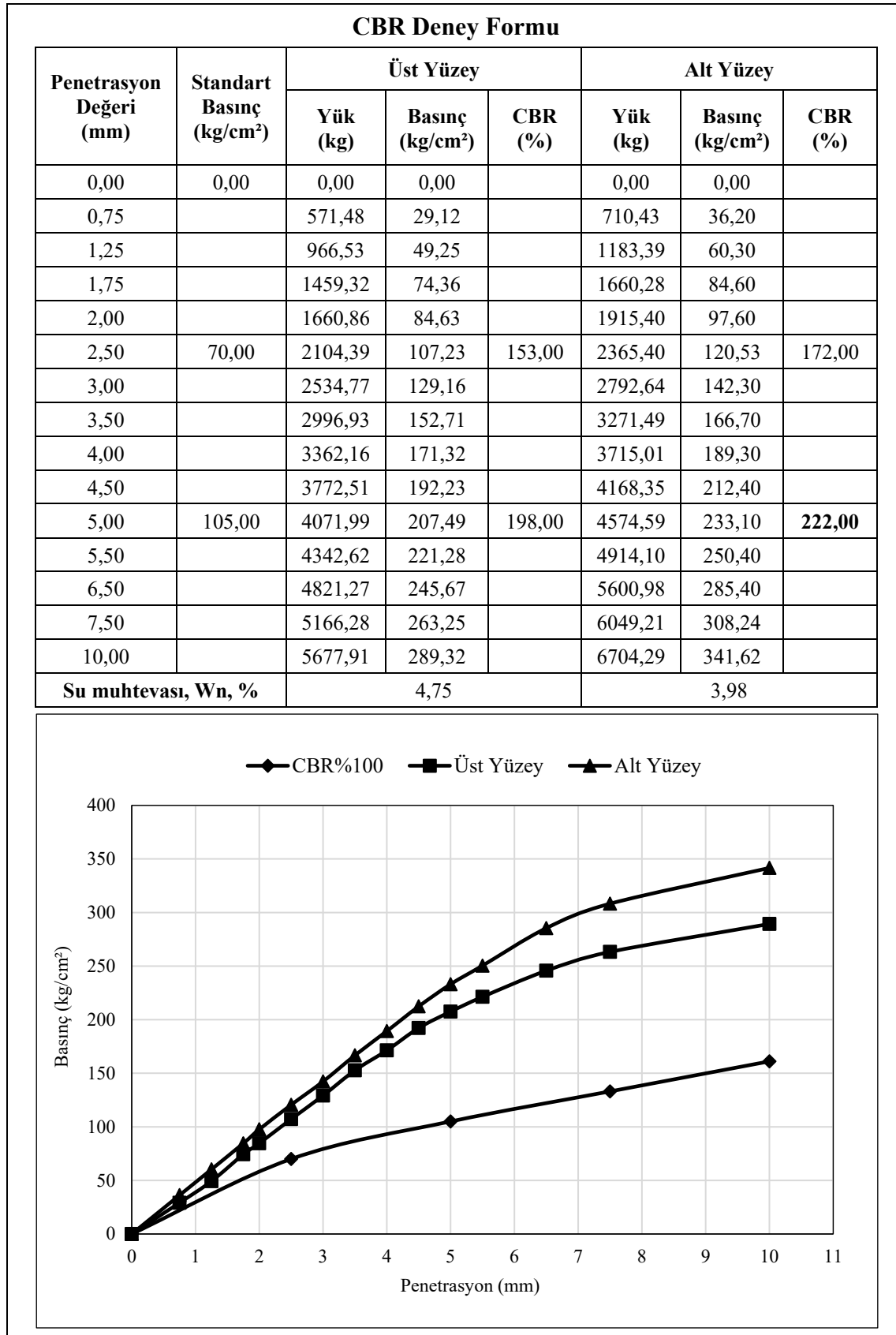
EK-9b: Karışım-1 yaş anlık CBR deneyi sayısal verileri.

EK-9c: Karışım-2 kuru anlık CBR deneyi sayısal verileri.

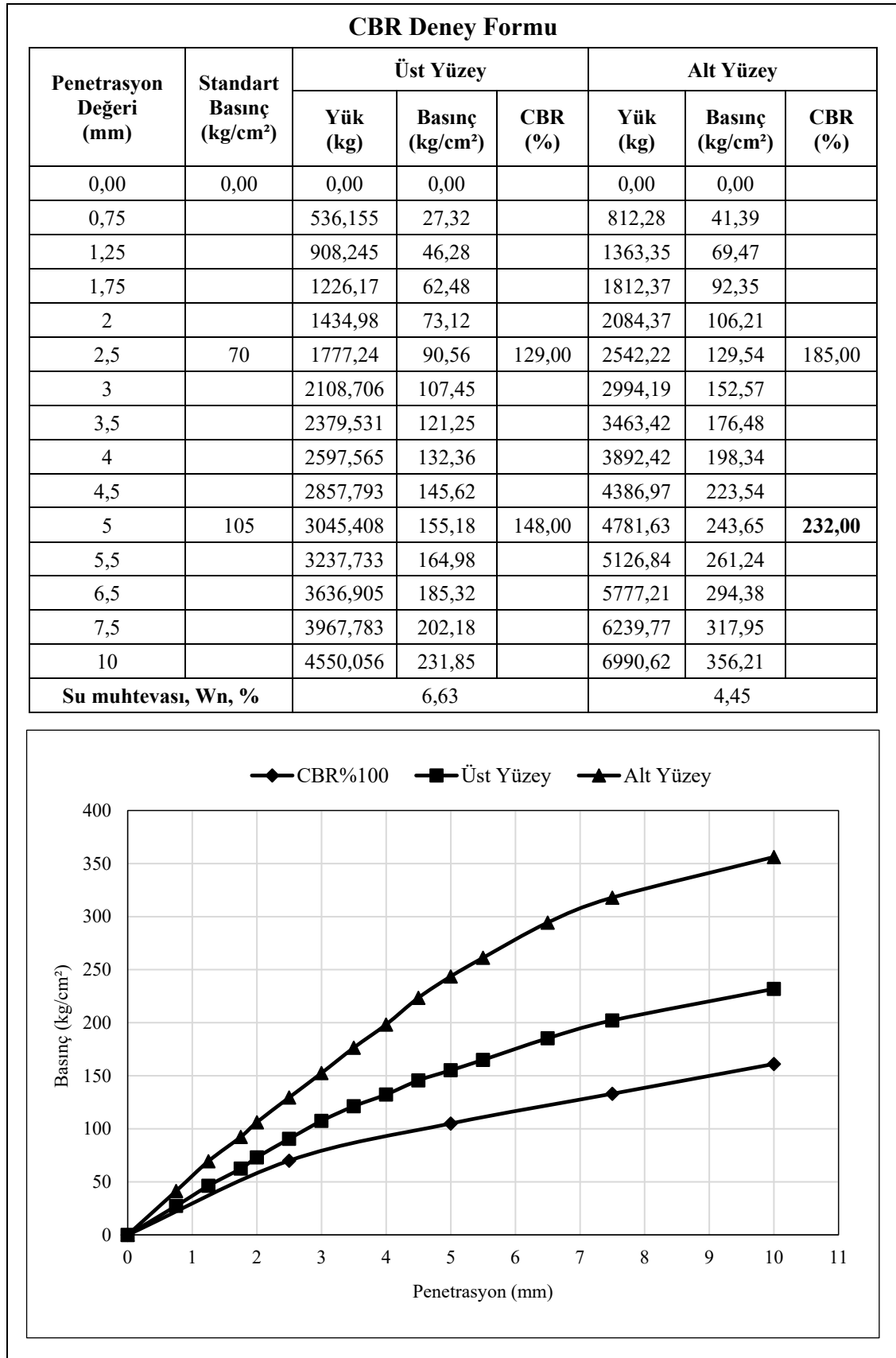


EK-9d: Karışım-2 yaş anlık CBR deneyi sayısal verileri.

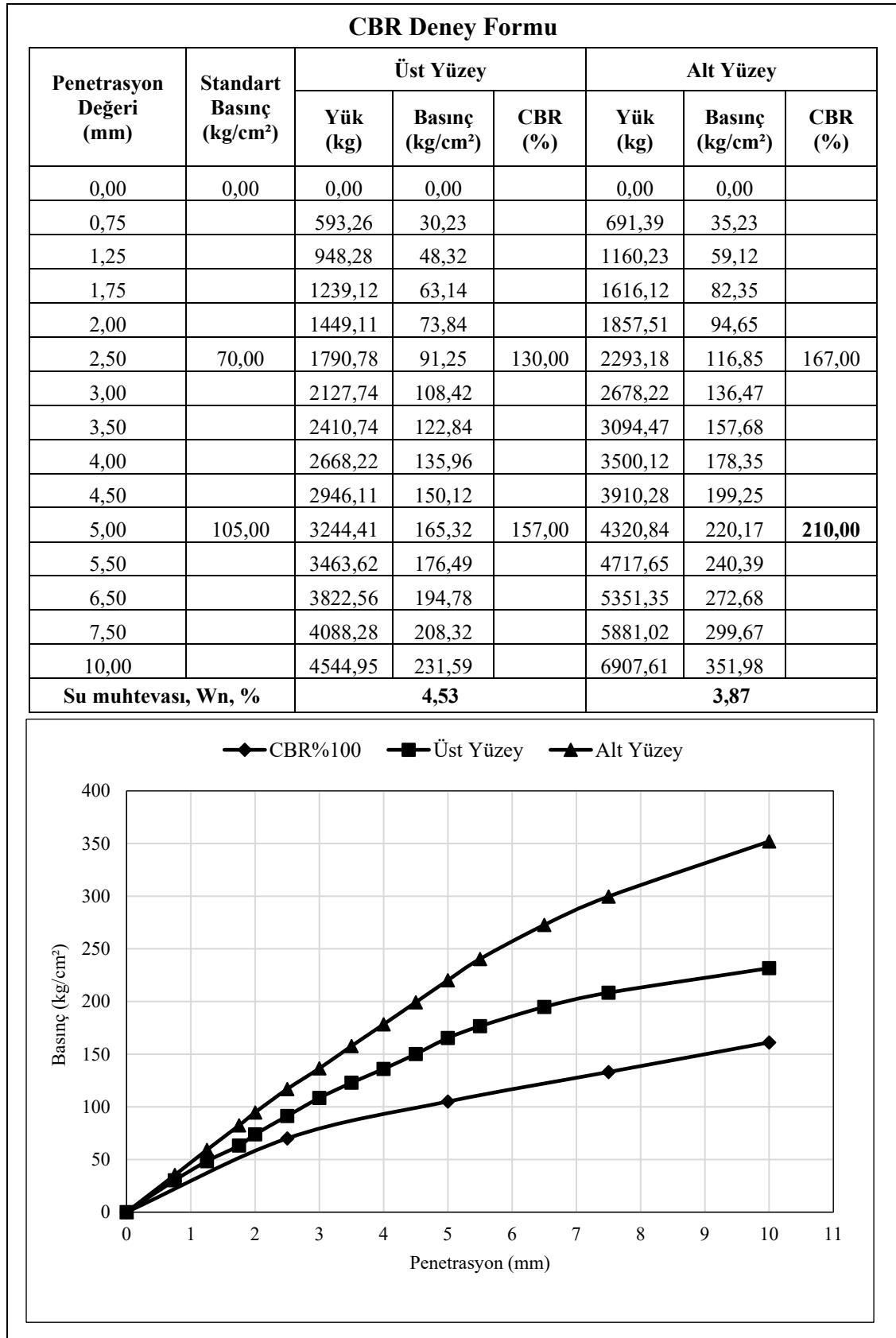
EK-9e: Karışım-3 kuru anlık CBR deneyi sayısal verileri.

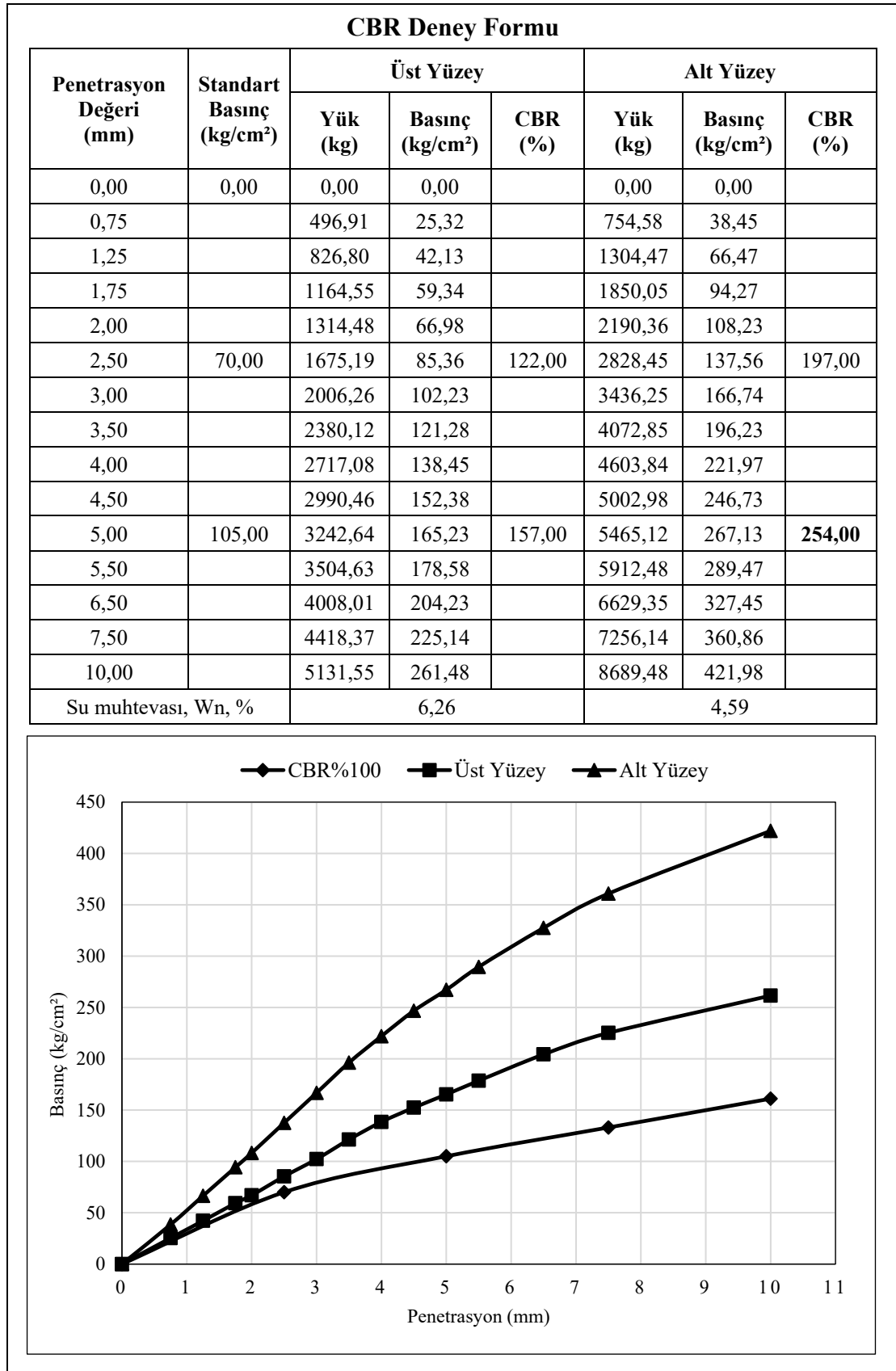


EK-9f: Karışım-3 yaş anlık CBR deneyi sayısal verileri.

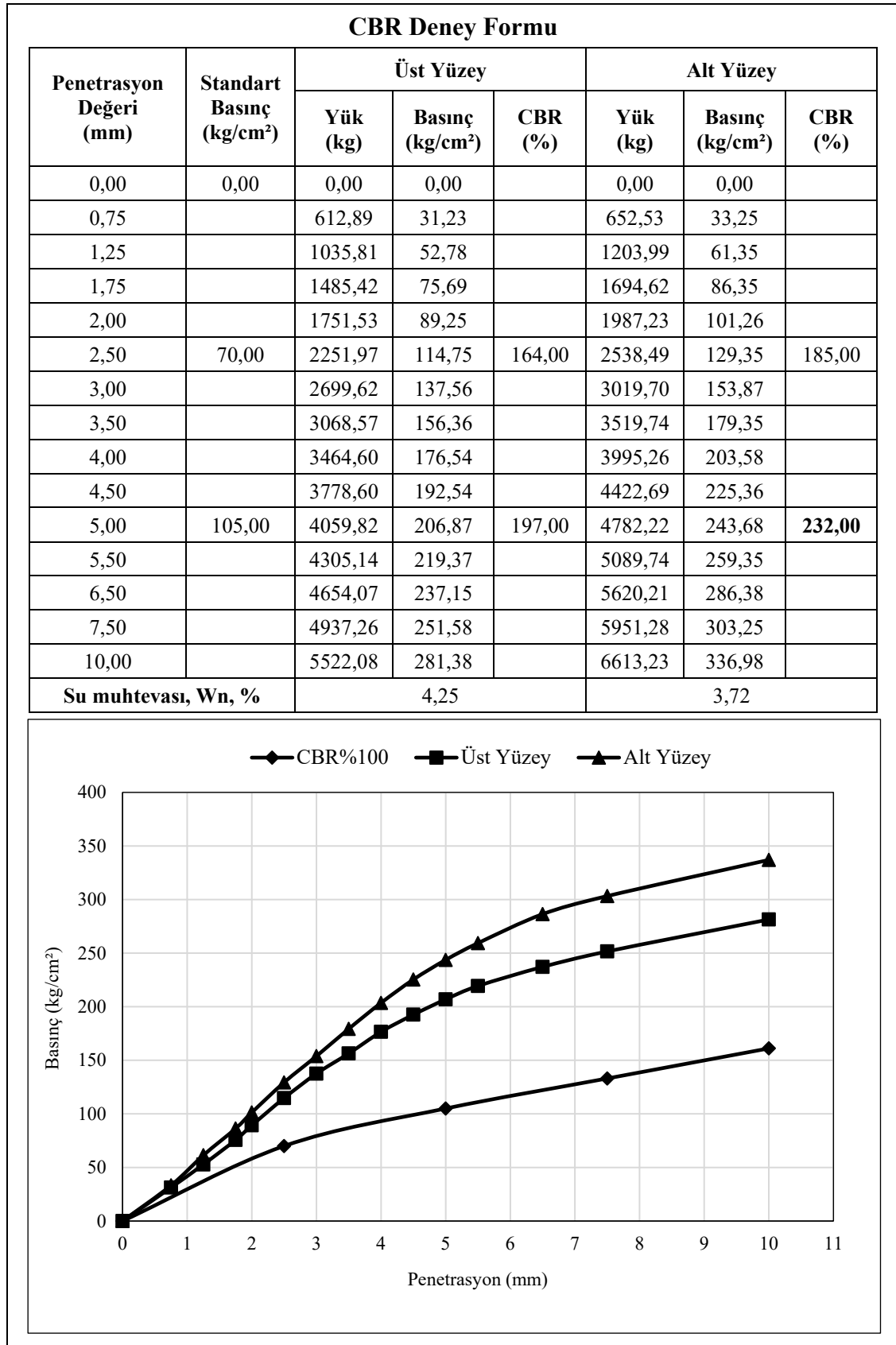


EK-9g: Karışım-4 kuru anlık CBR deneyi sayısal verileri.

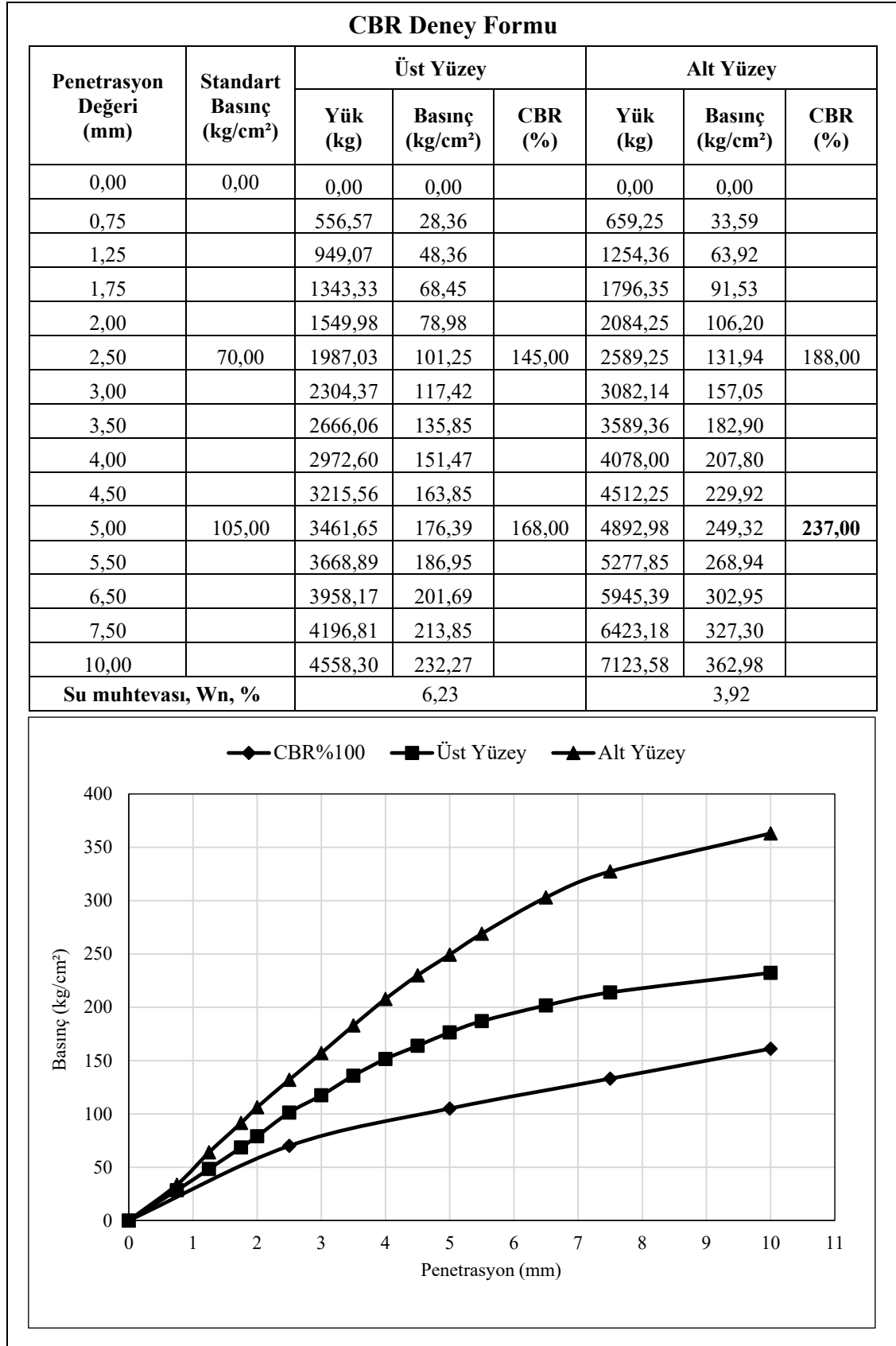


EK-9h: Karışım-4 yaş anlık CBR deneyi sayısal verileri.

EK-9j: Karışım-5 kuru anlık CBR deneyi sayısal verileri.

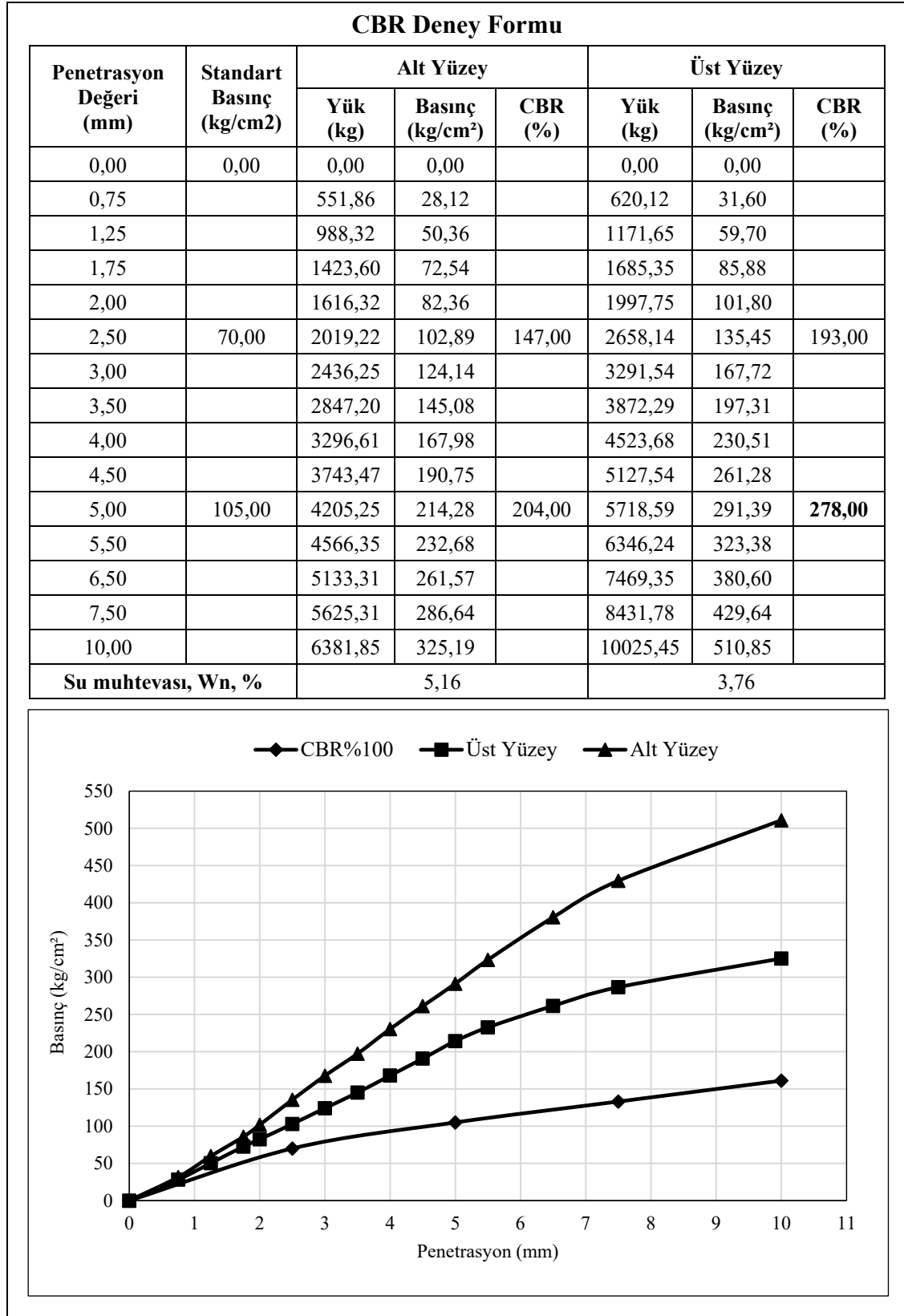


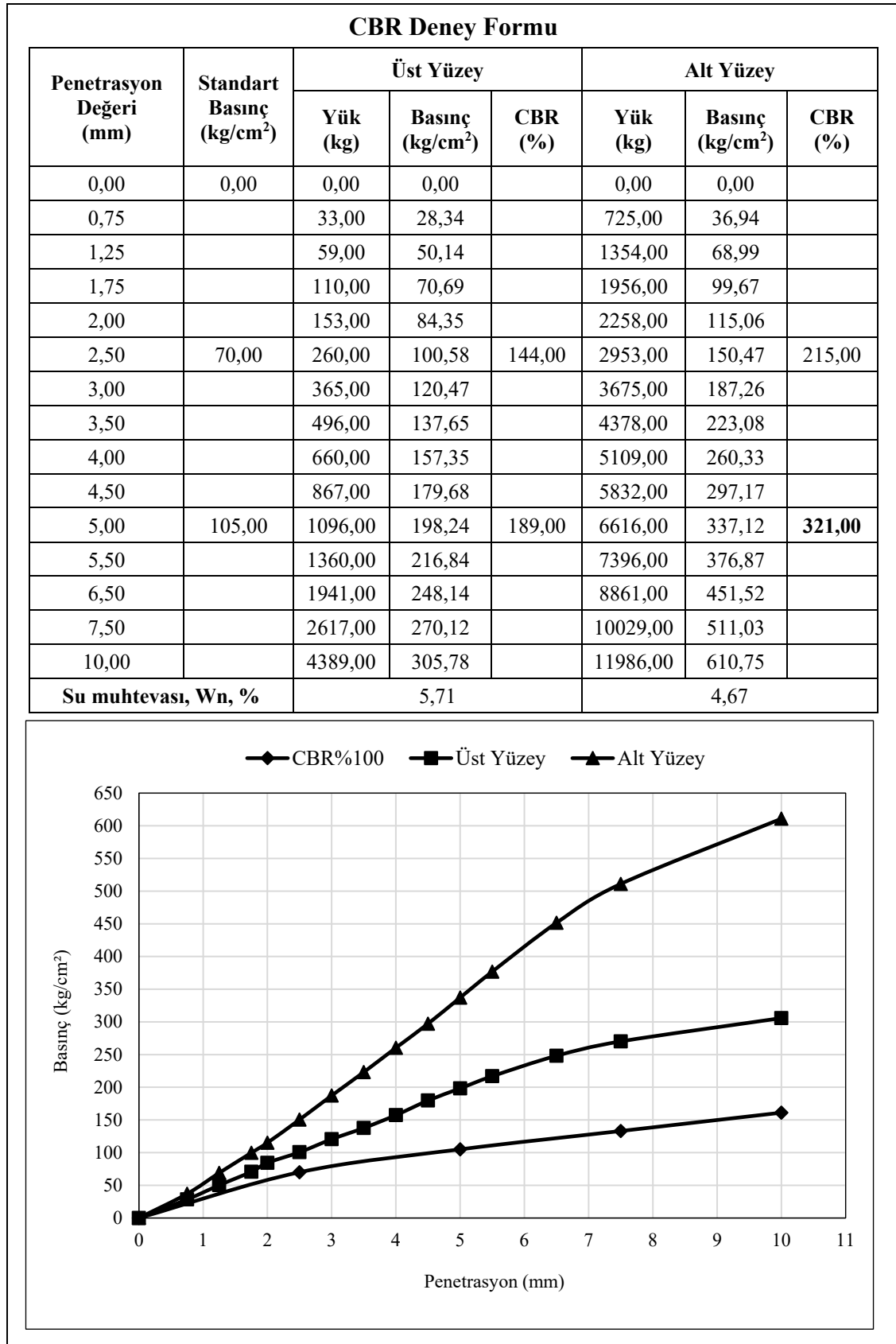
EK-9k: Karışım-5 yaş anlık CBR deneyi sayısal verileri.

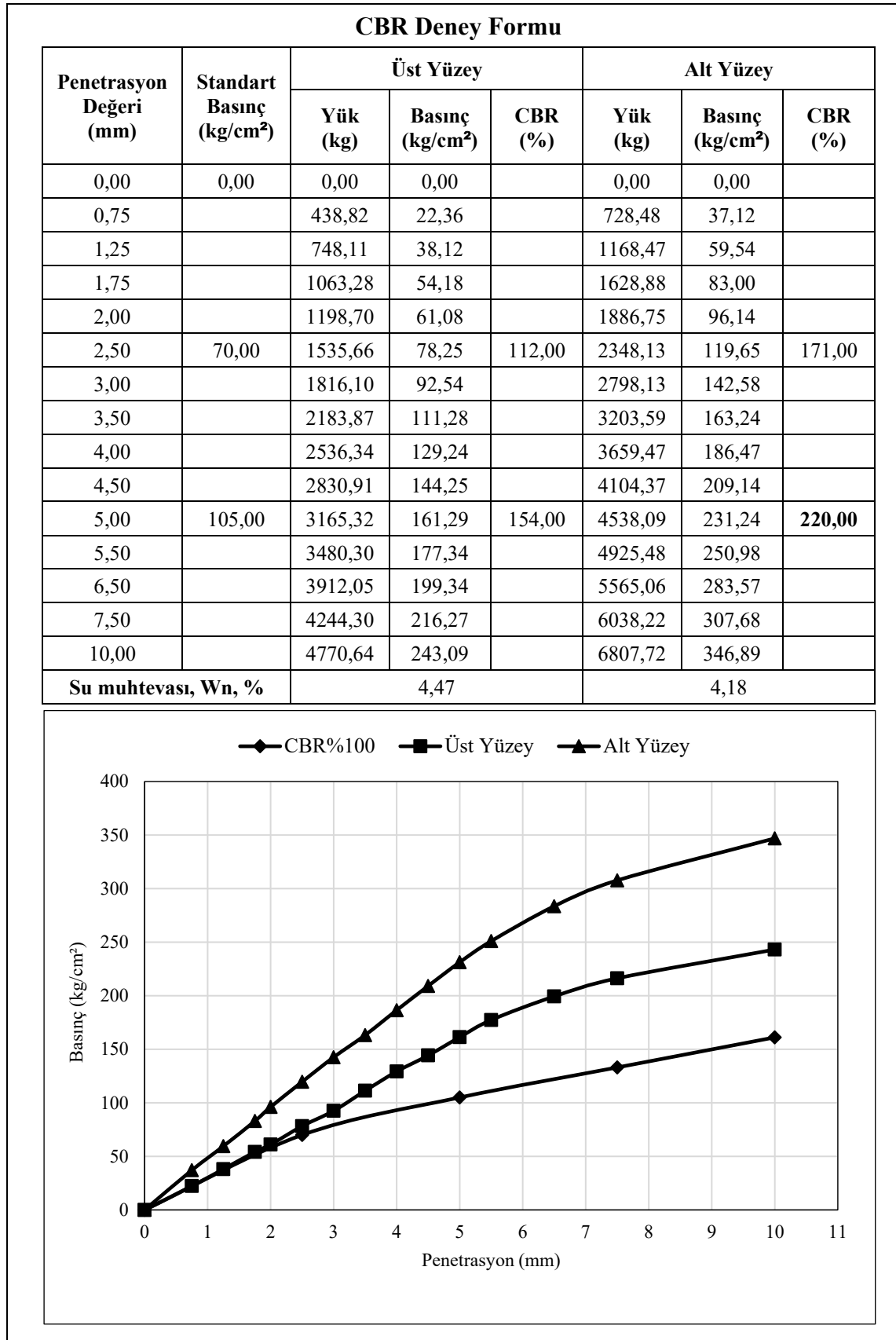


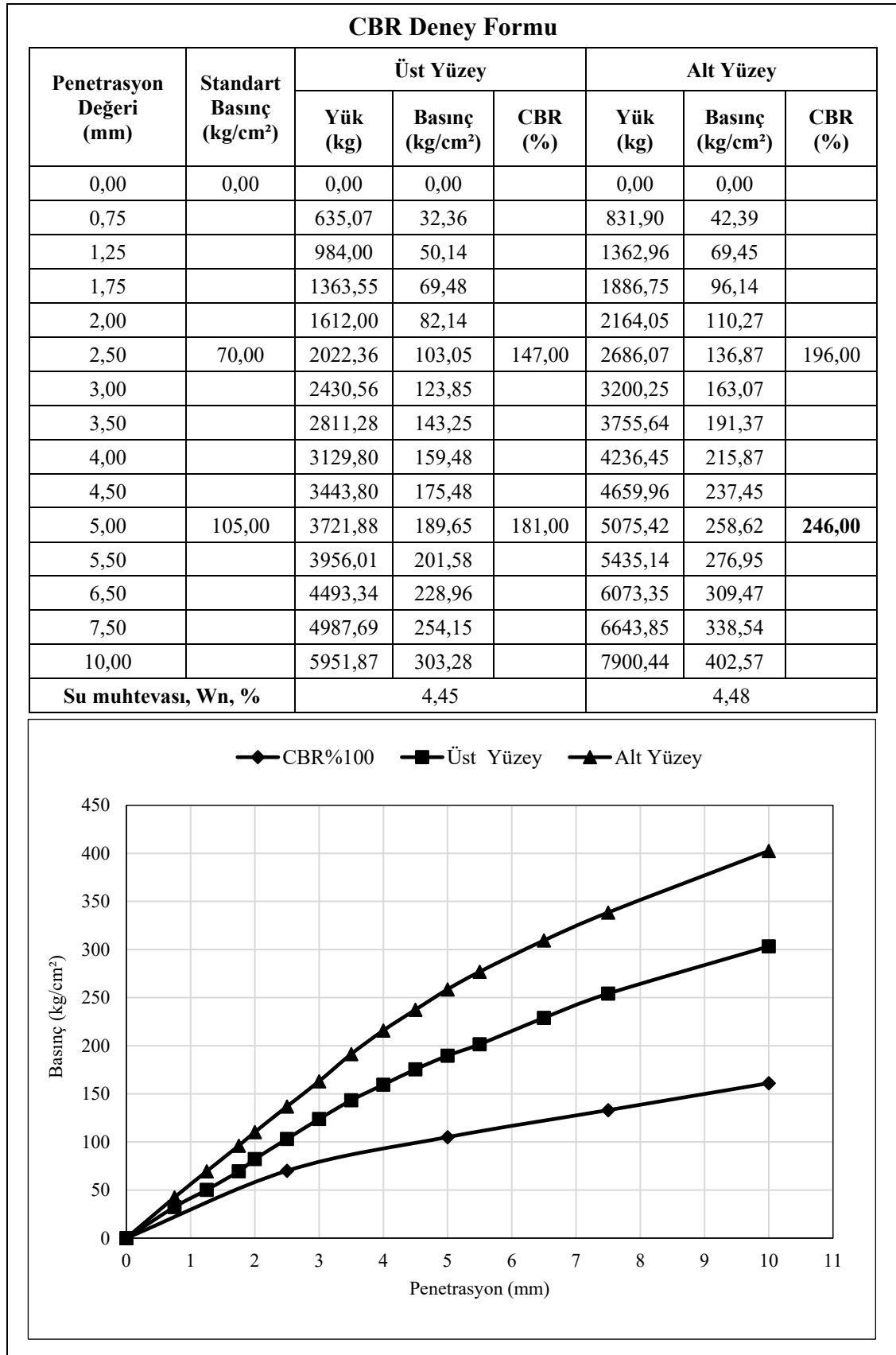
EK-10: CBR deneyi sayısal verileri (7 gün kür).

EK-10a: Karışım-1 kuru 7 günlük kür sonucu CBR deneyi sayısal verileri.

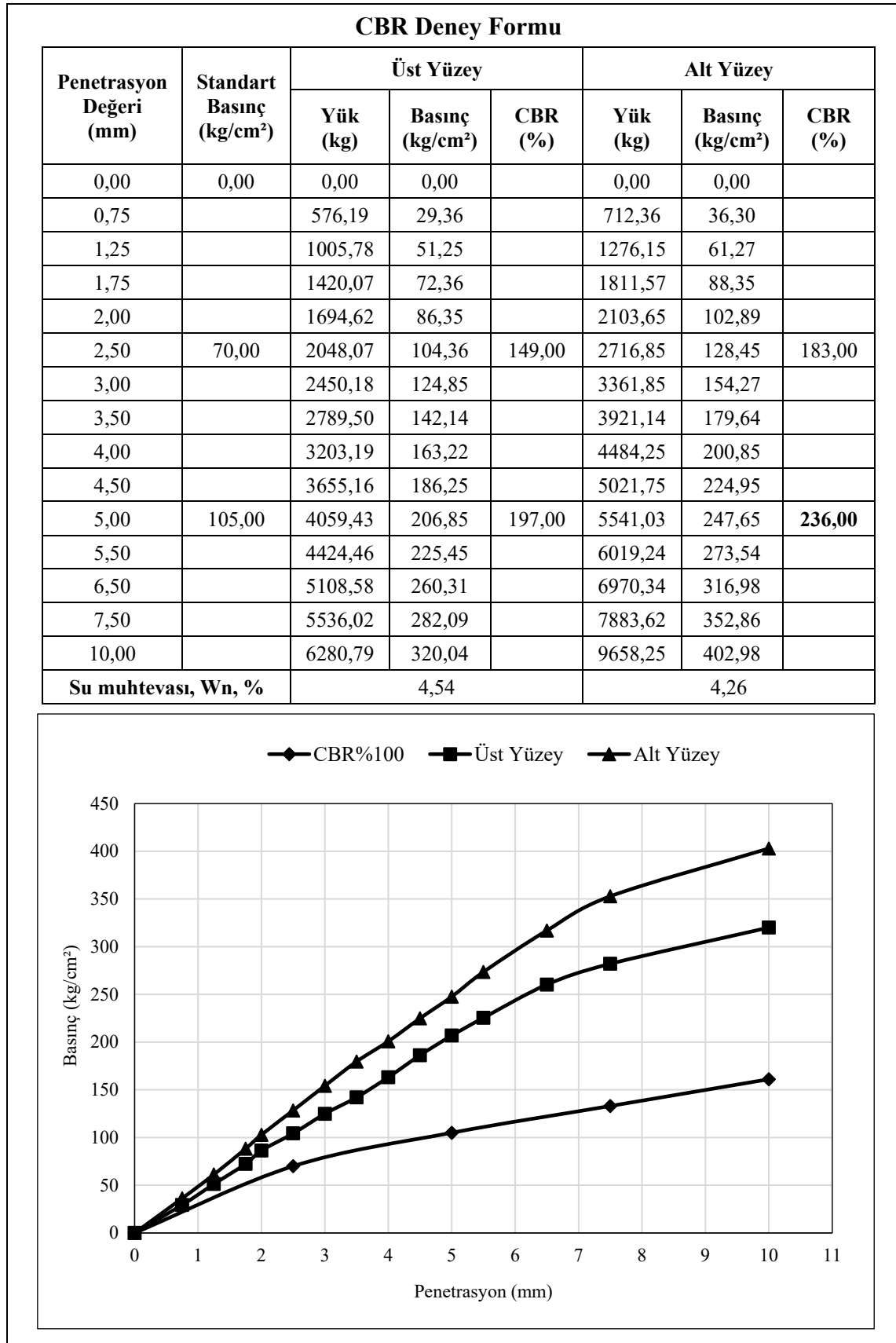


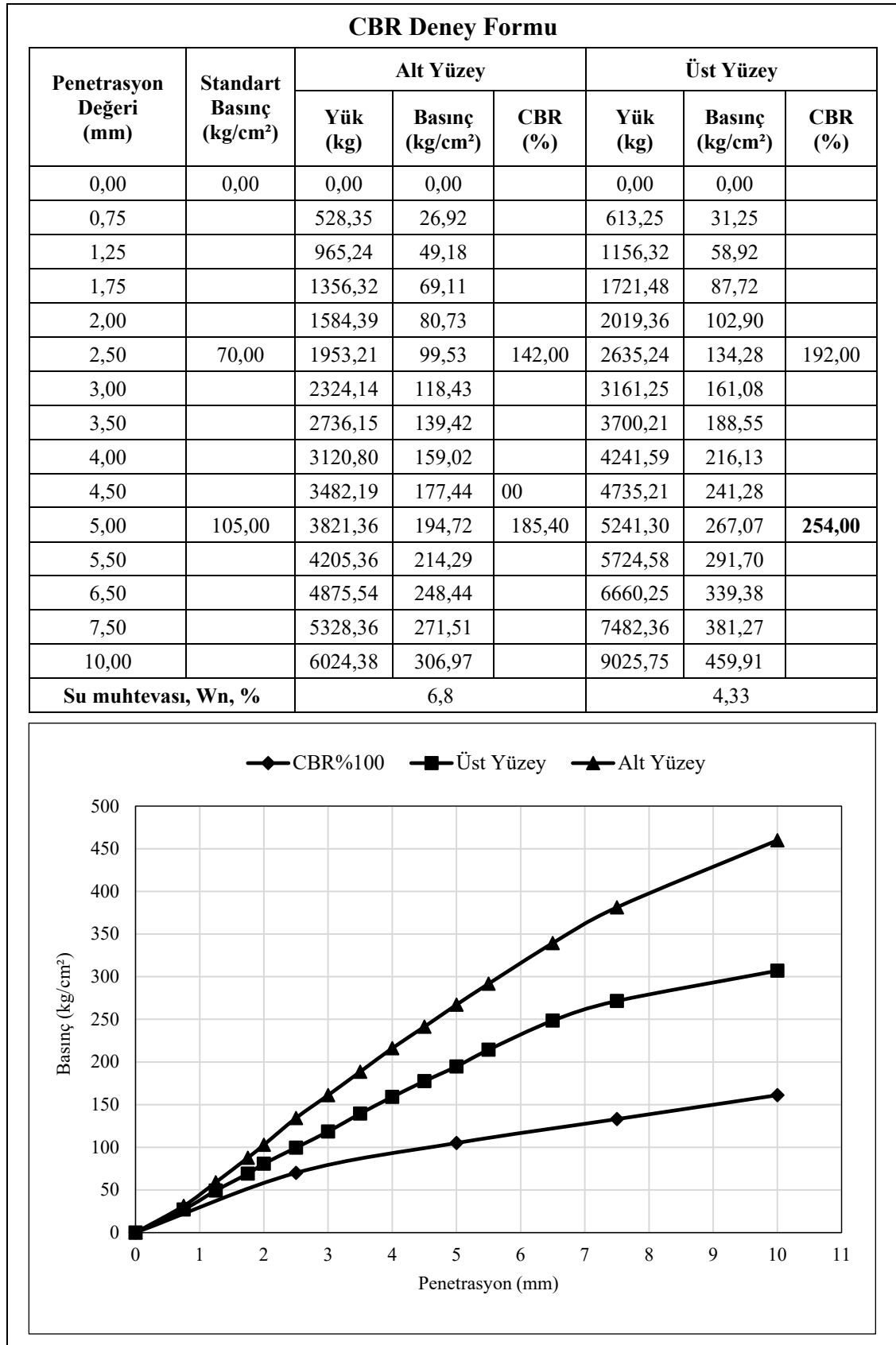
EK-10b: Karışım-1 yaş 7 günlük kür sonucu CBR deneyi sayısal verileri.

EK-10c: Karışım-2 kuru 7 günlük kür sonucu CBR deneyi sayısal verileri.

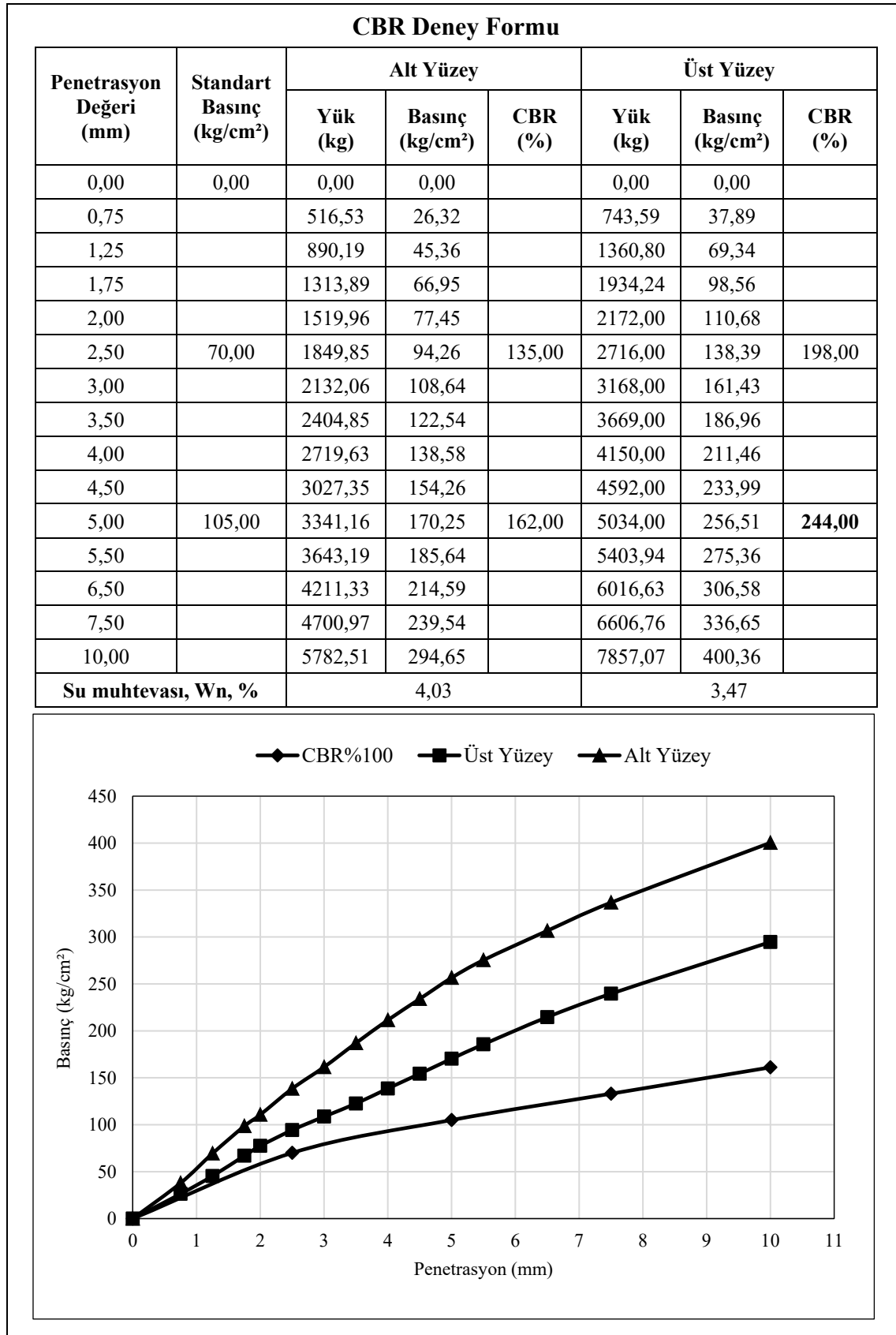
EK-10d: Karışım-2 yaş 7 günlük kür sonucu CBR deneyi sayısal verileri.

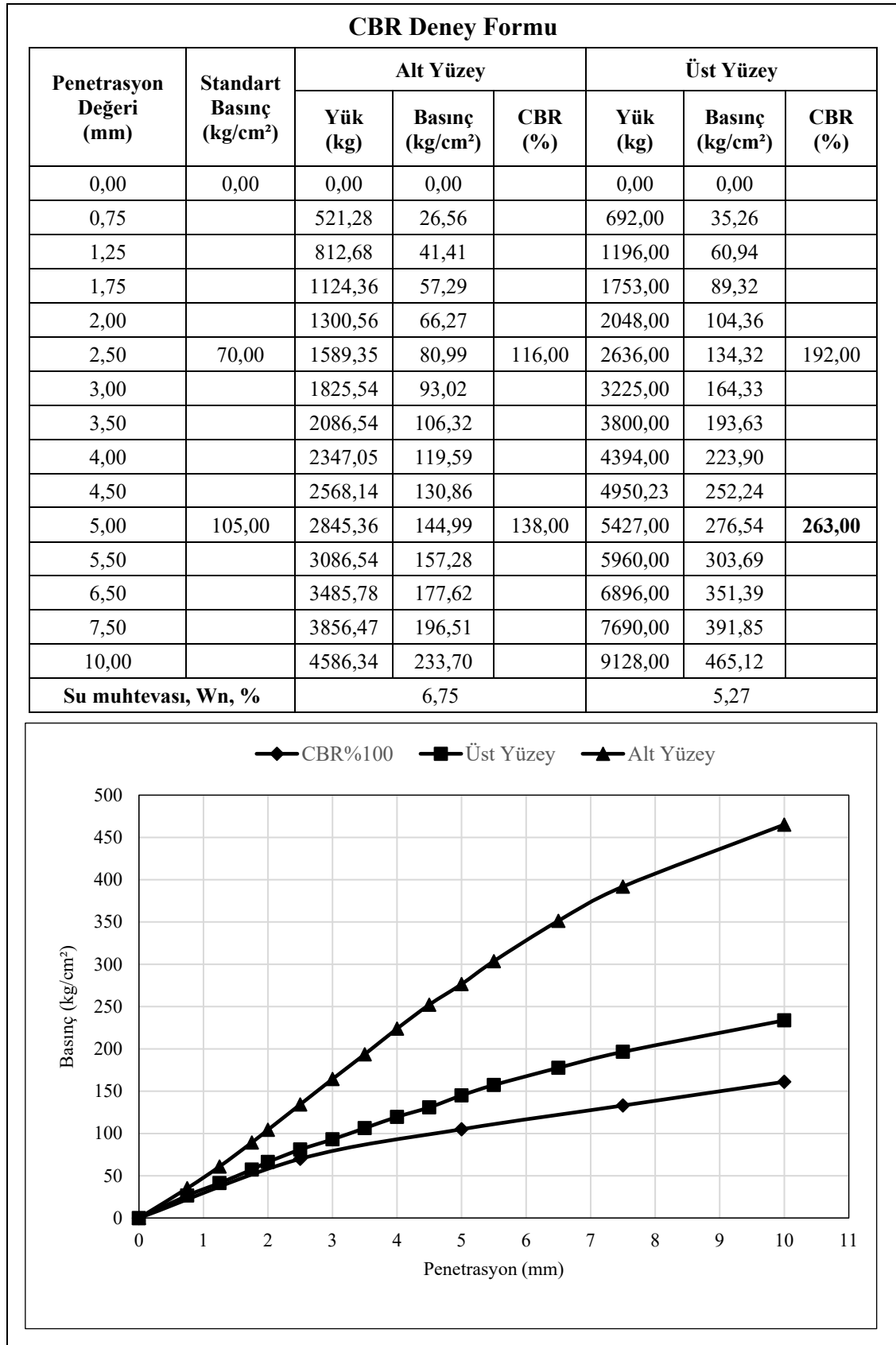
EK-10e: Karışım-3 kuru 7 günlük kür sonucu CBR deneyi sayısal verileri.

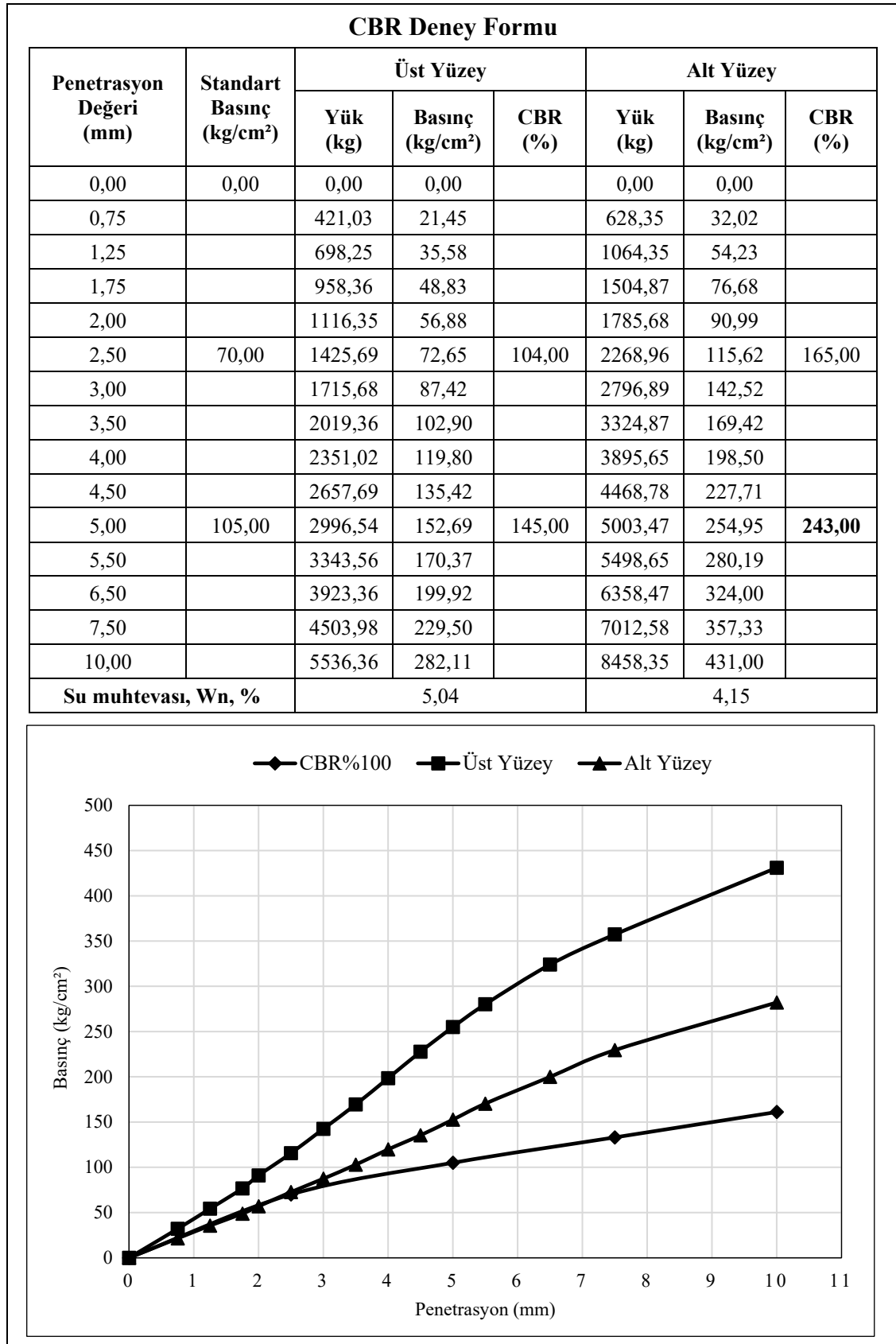


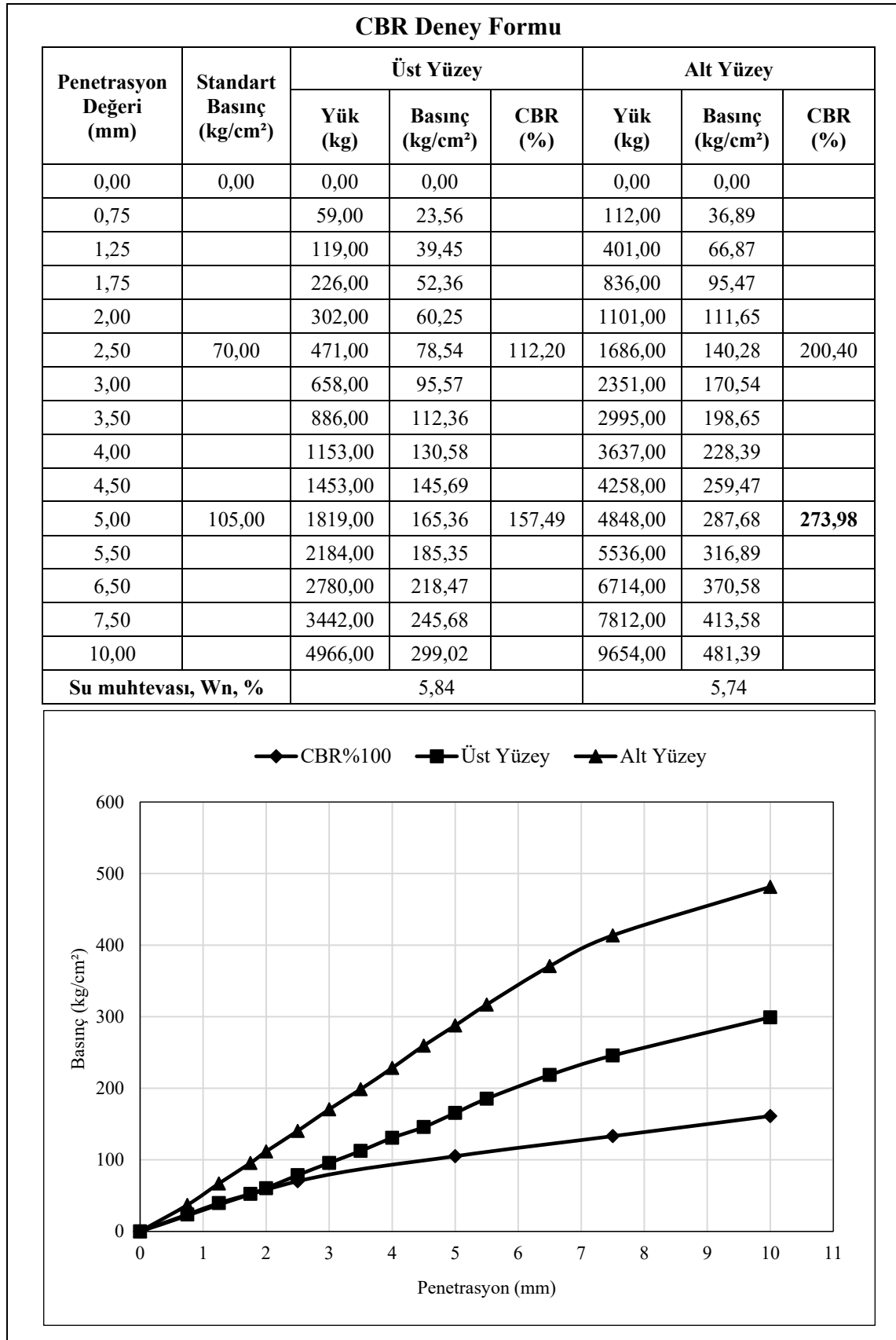
EK-10f: Karışım-3 yaş 7 günlük kür sonucu CBR deneyi sayısal verileri.

EK-10g: Karışım-4 kuru 7 günlük kür sonucu CBR deneyi sayısal verileri.



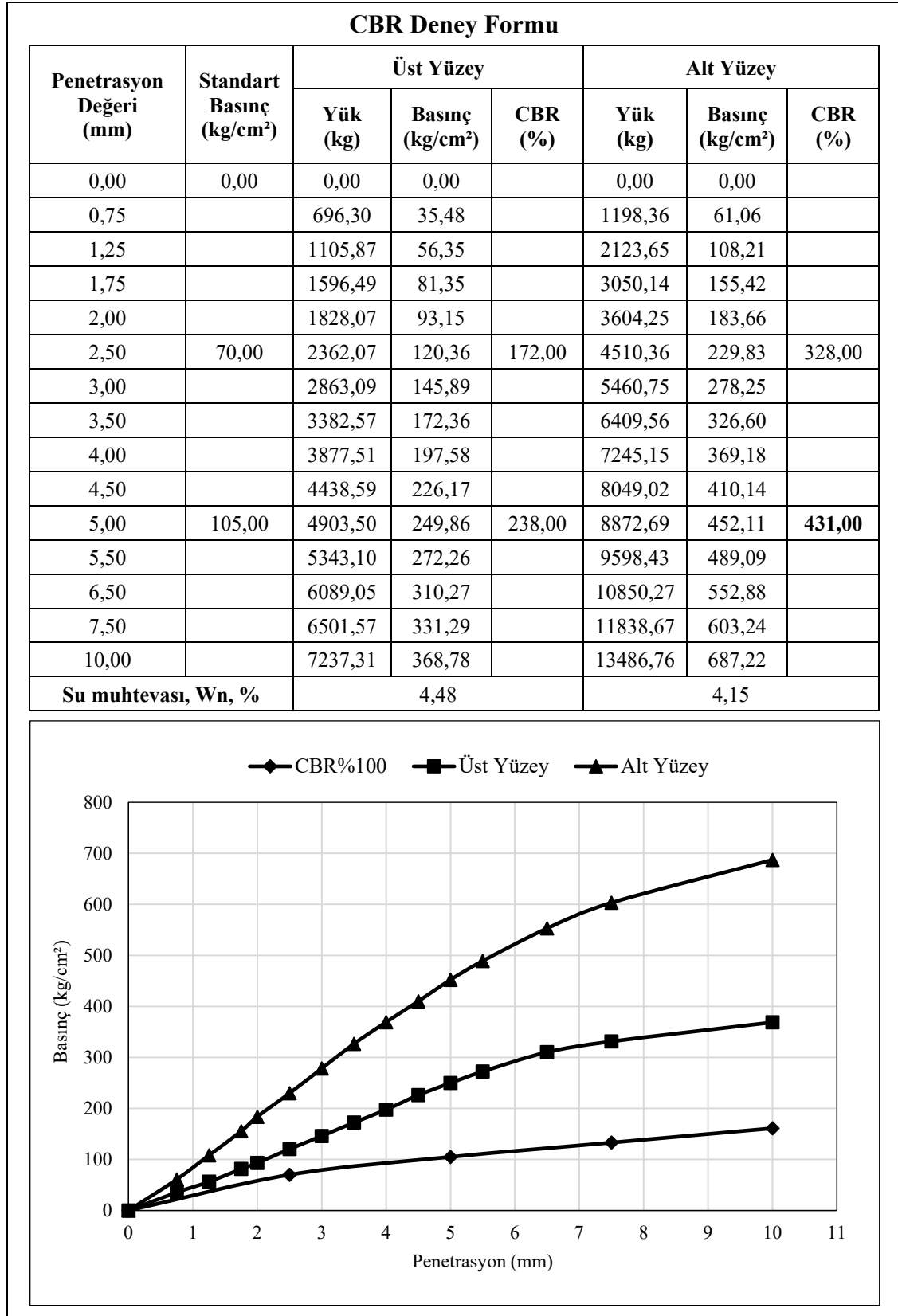
EK-10h: Karışım-4 yaş 7 günlük kür sonucu CBR deneyi sayısal verileri.

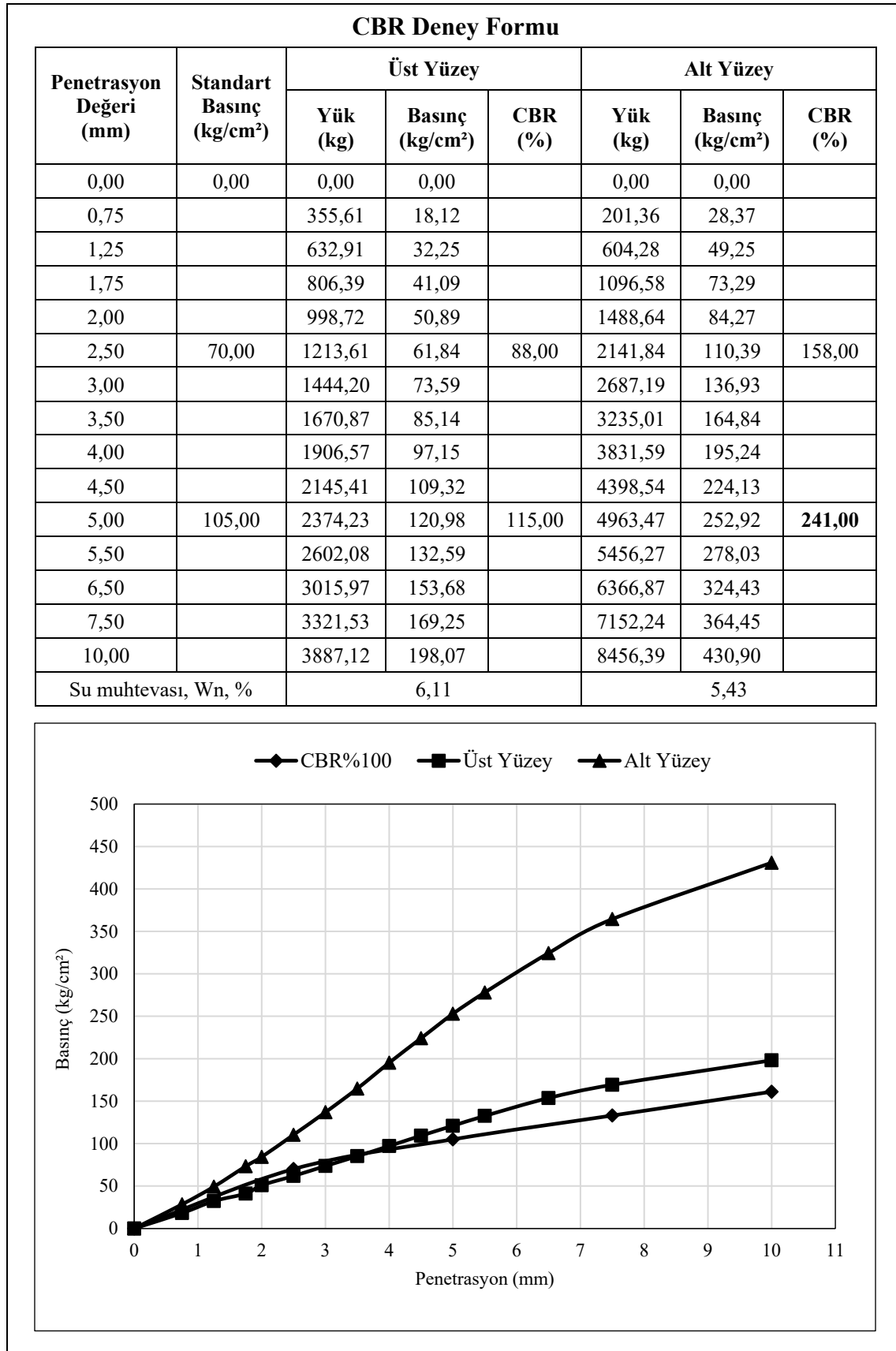
EK-10j: Karışım-5 kuru 7 günlük kür sonucu CBR deneyi sayısal verileri.

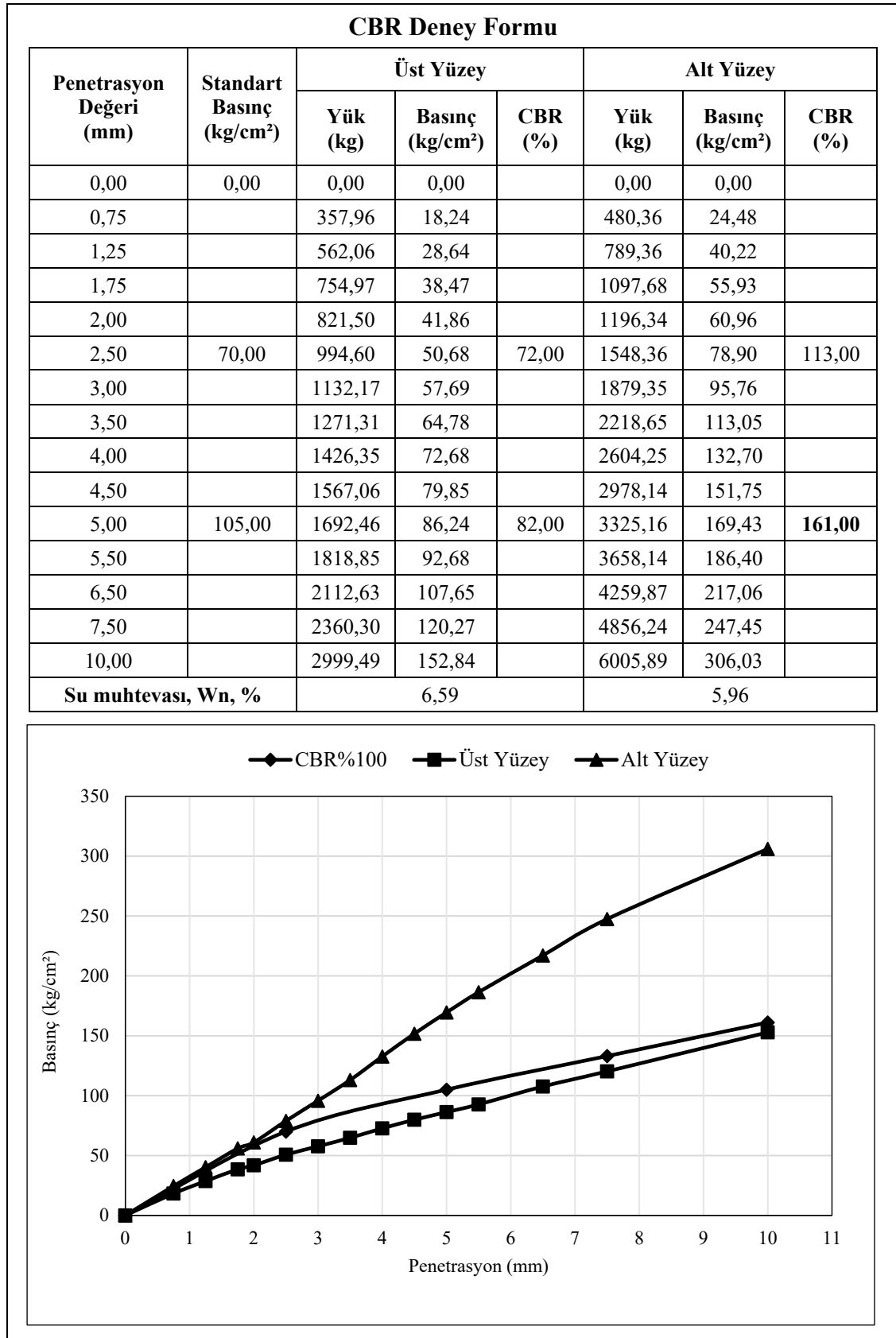
EK-10k: Karışım-5 yaş 7 günlük kür sonucu CBR deneyi sayısal verileri.

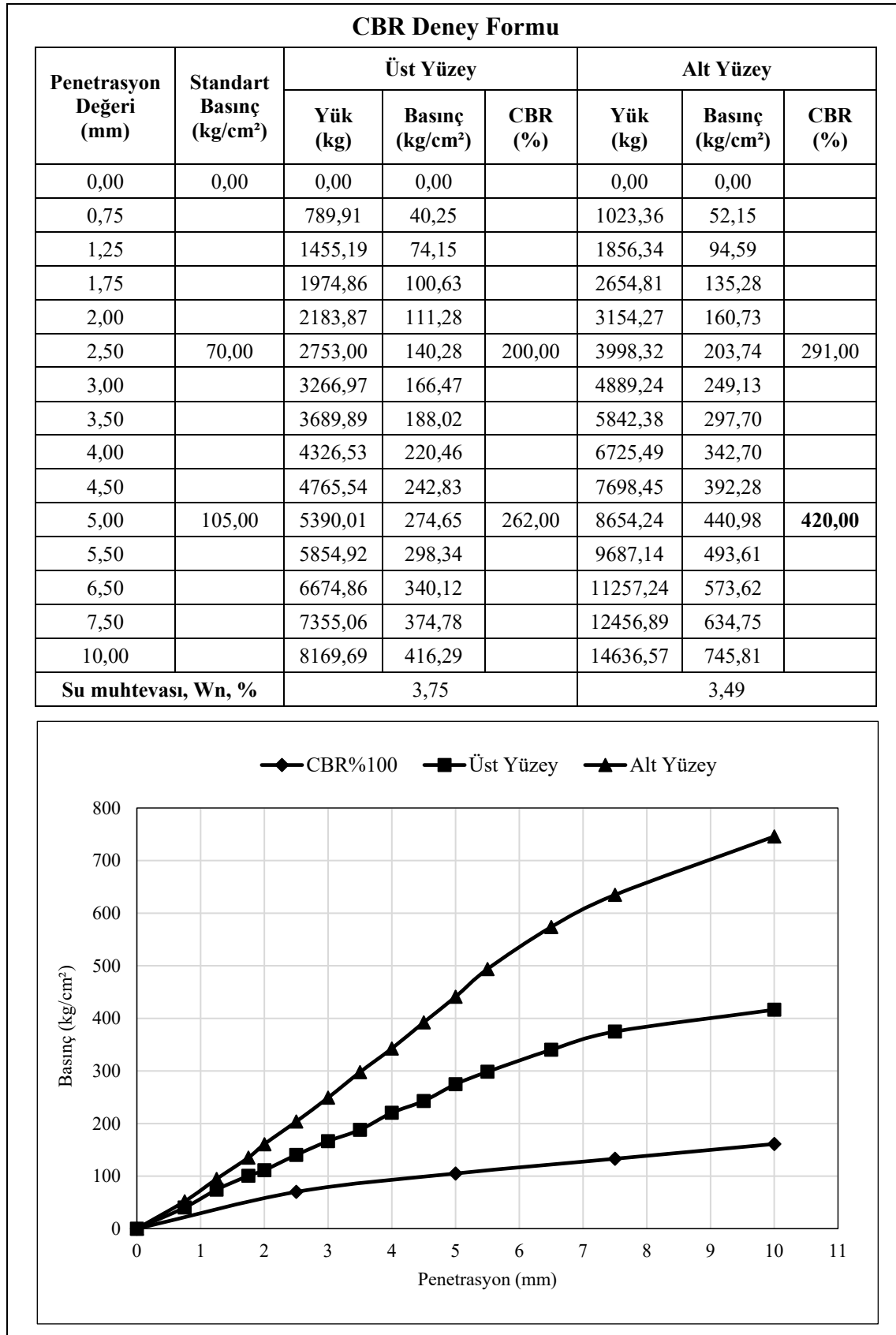
EK-11: Donma-çözünme deneyine ait sayısal veriler (anlık).

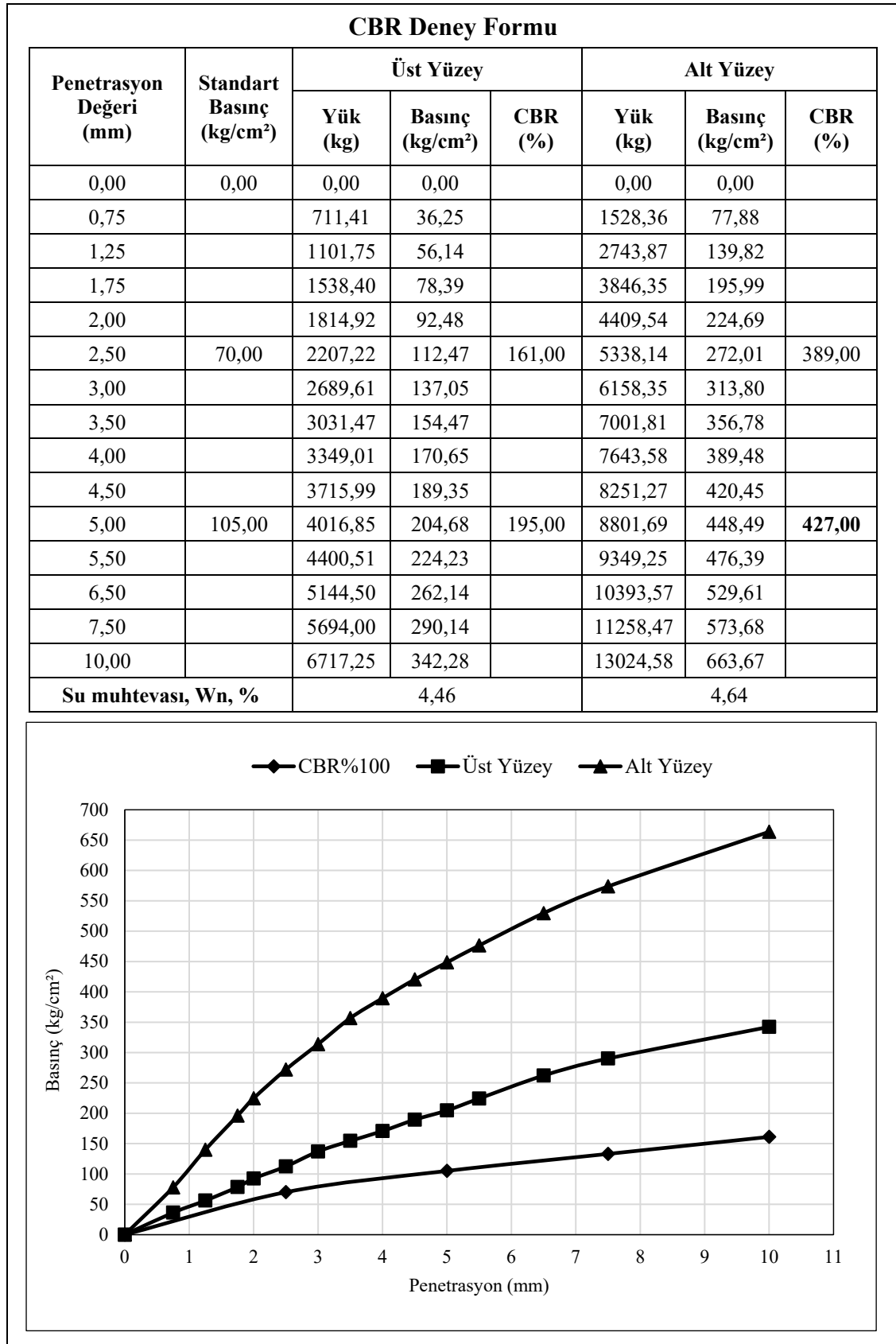
EK-11a: Karışım-1, 4 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (anlık).

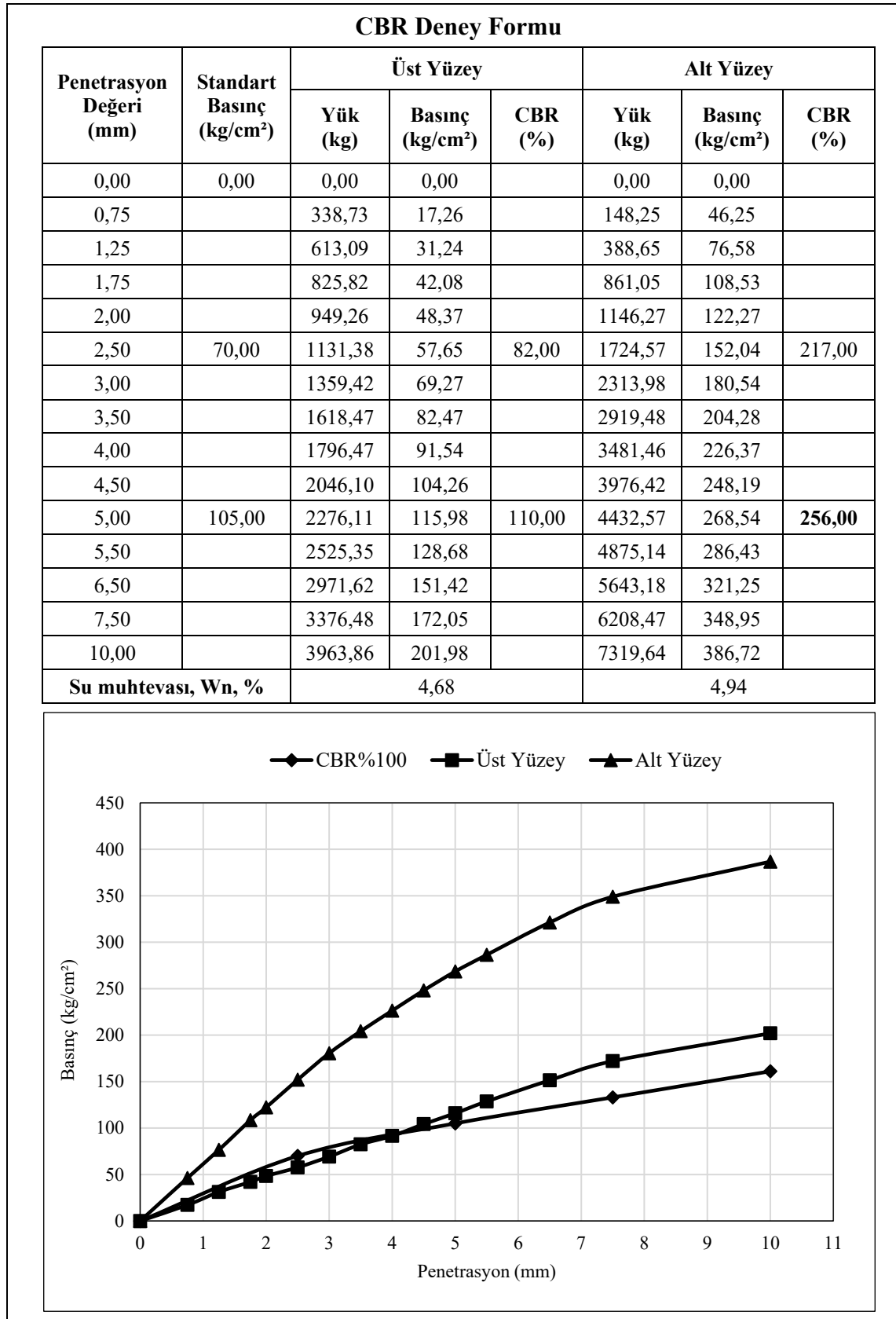


EK-11b: Karışım-1, 12 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (anlık).

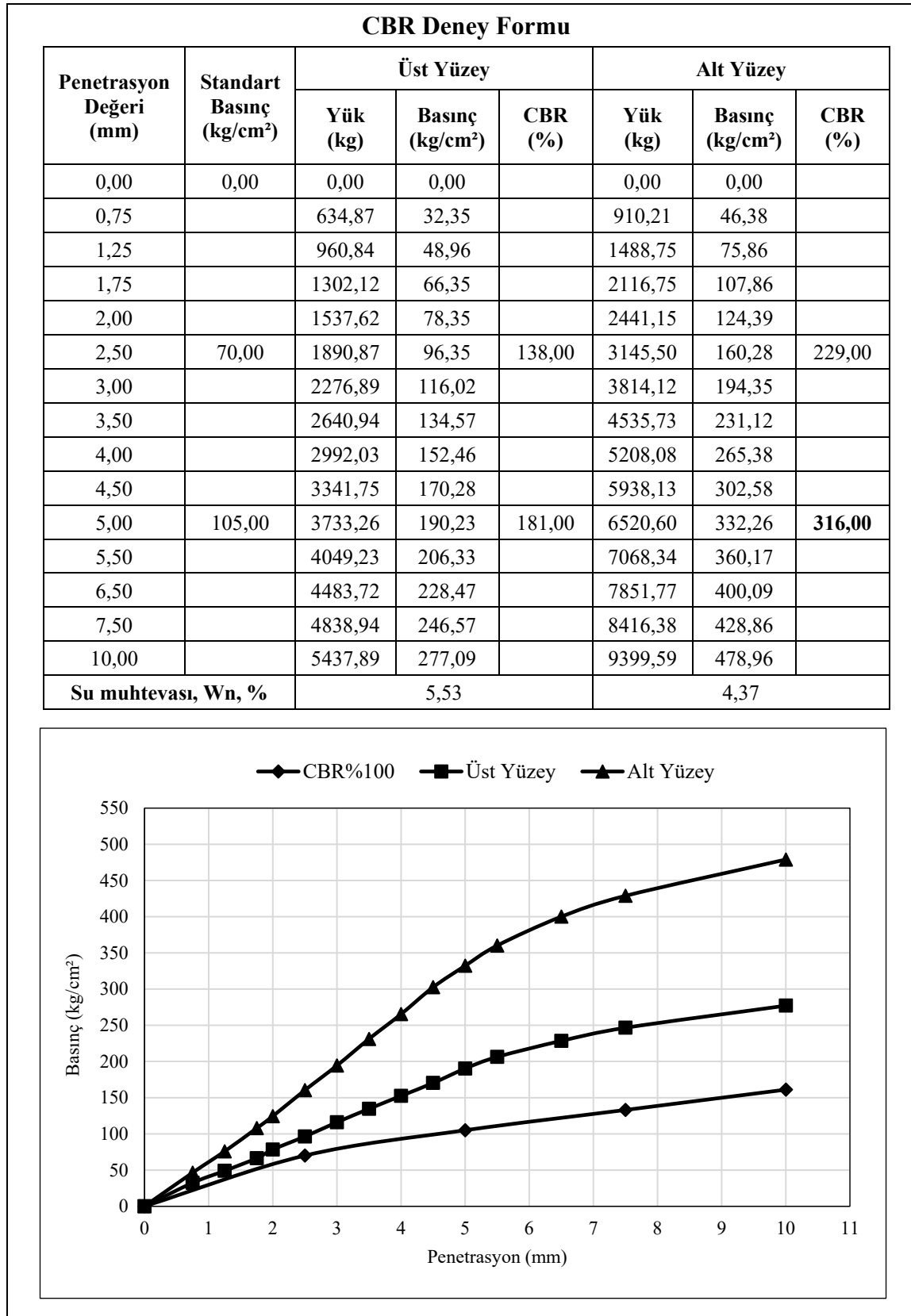
EK-11c: Karışım-1, 20 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (anlık).

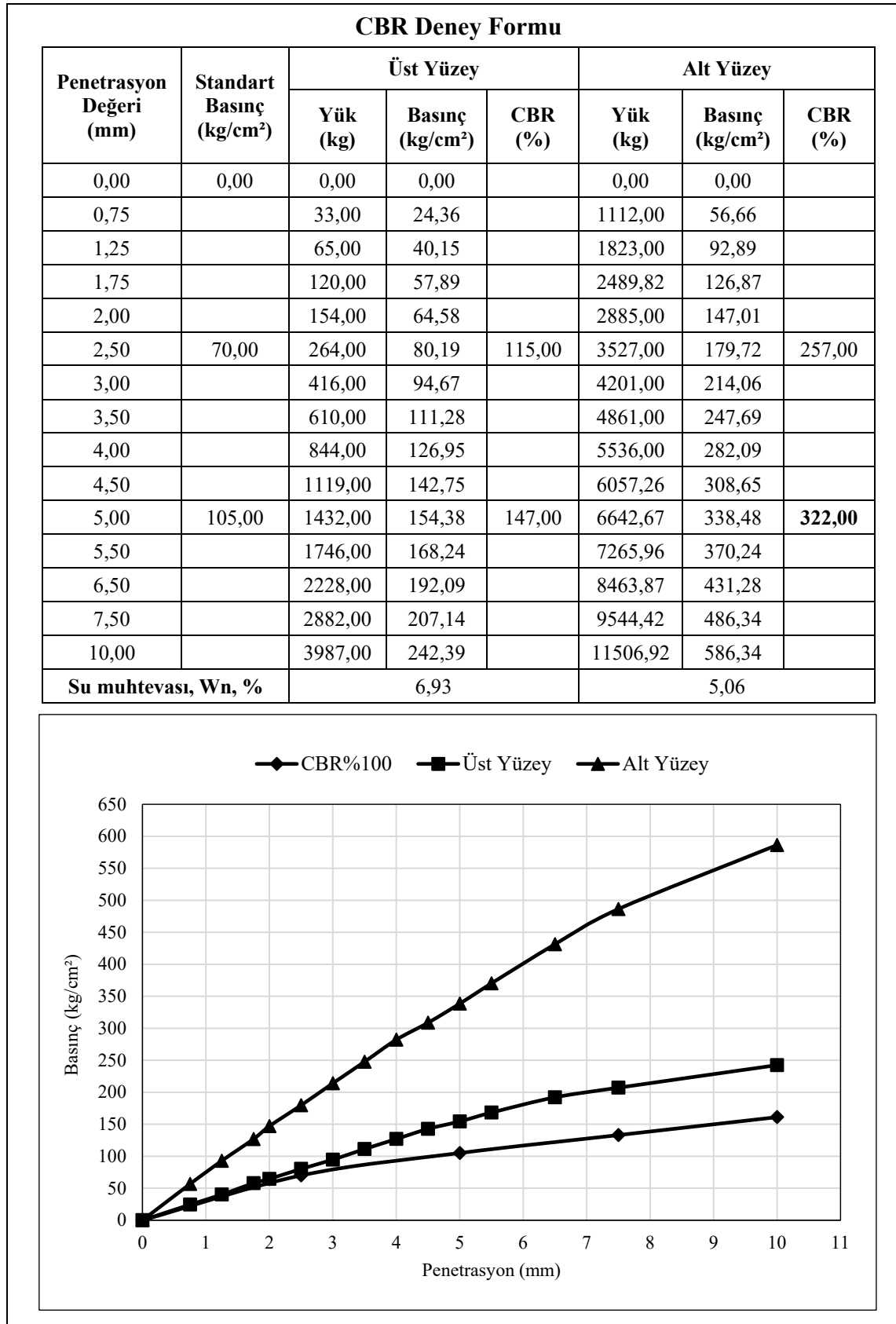
EK-11d: Karışım-2, 4 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (anlık).

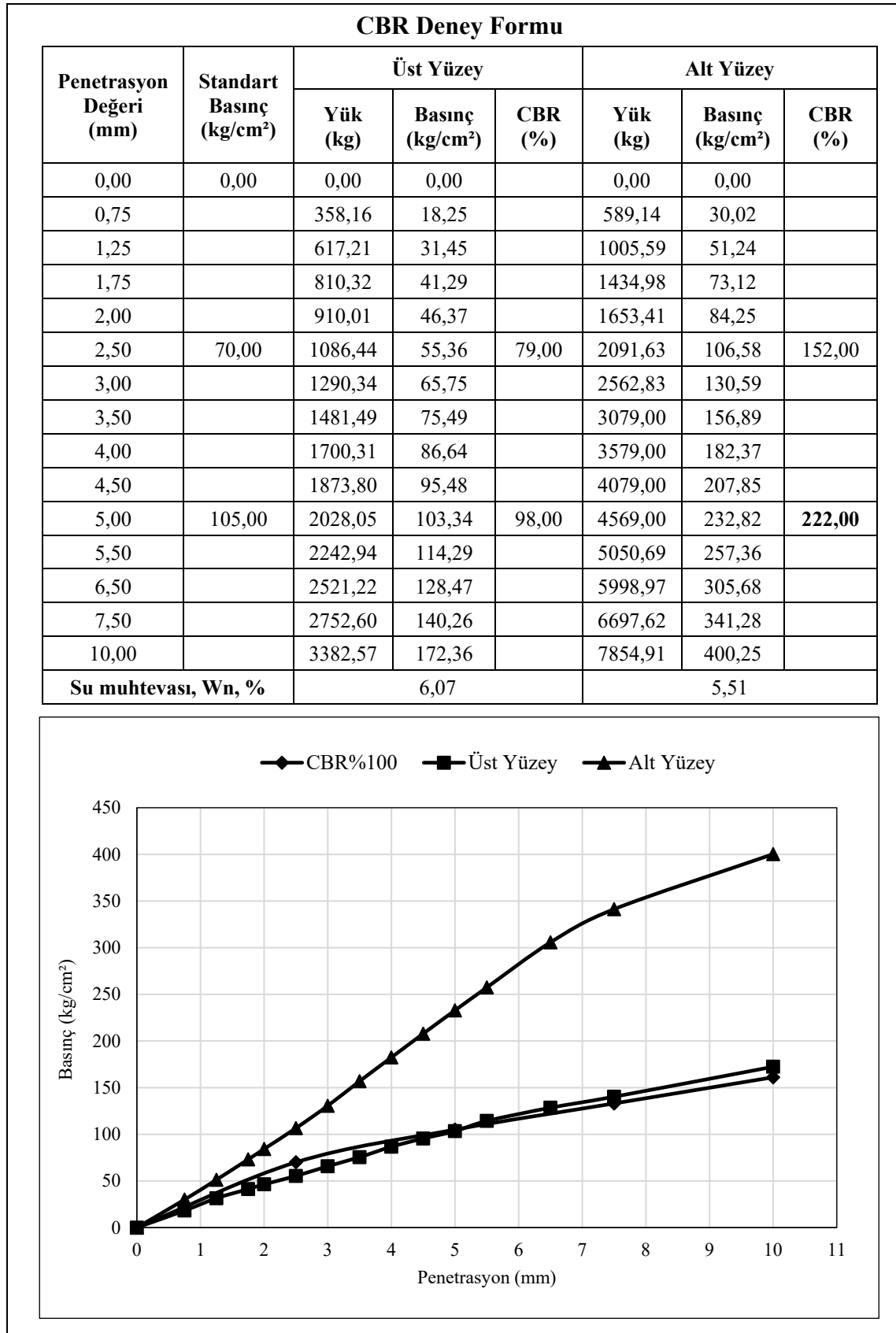
EK-11e: Karışım-2, 12 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (anlık).

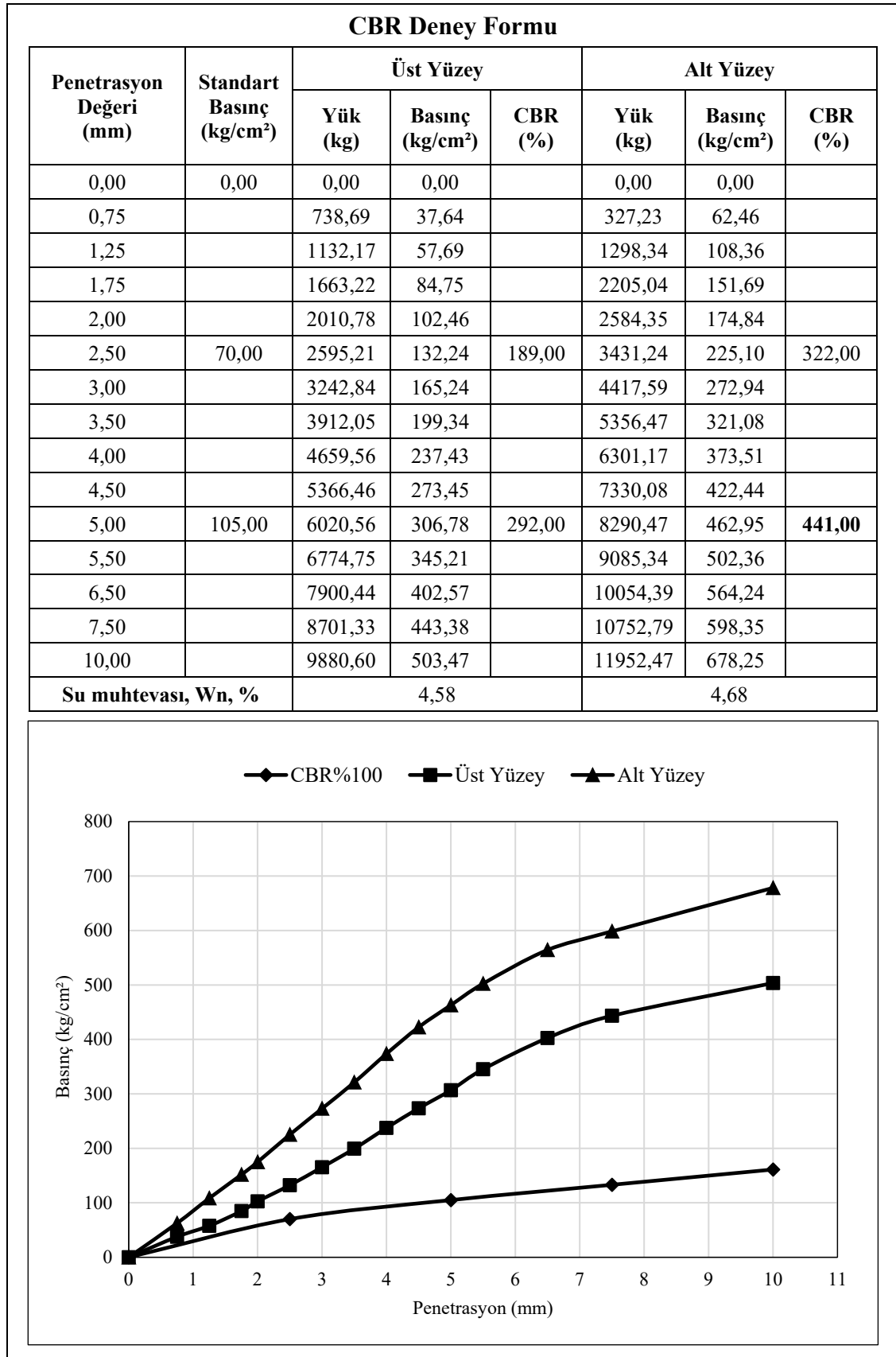
EK-11f: Karışım-2, 20 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (anlık).

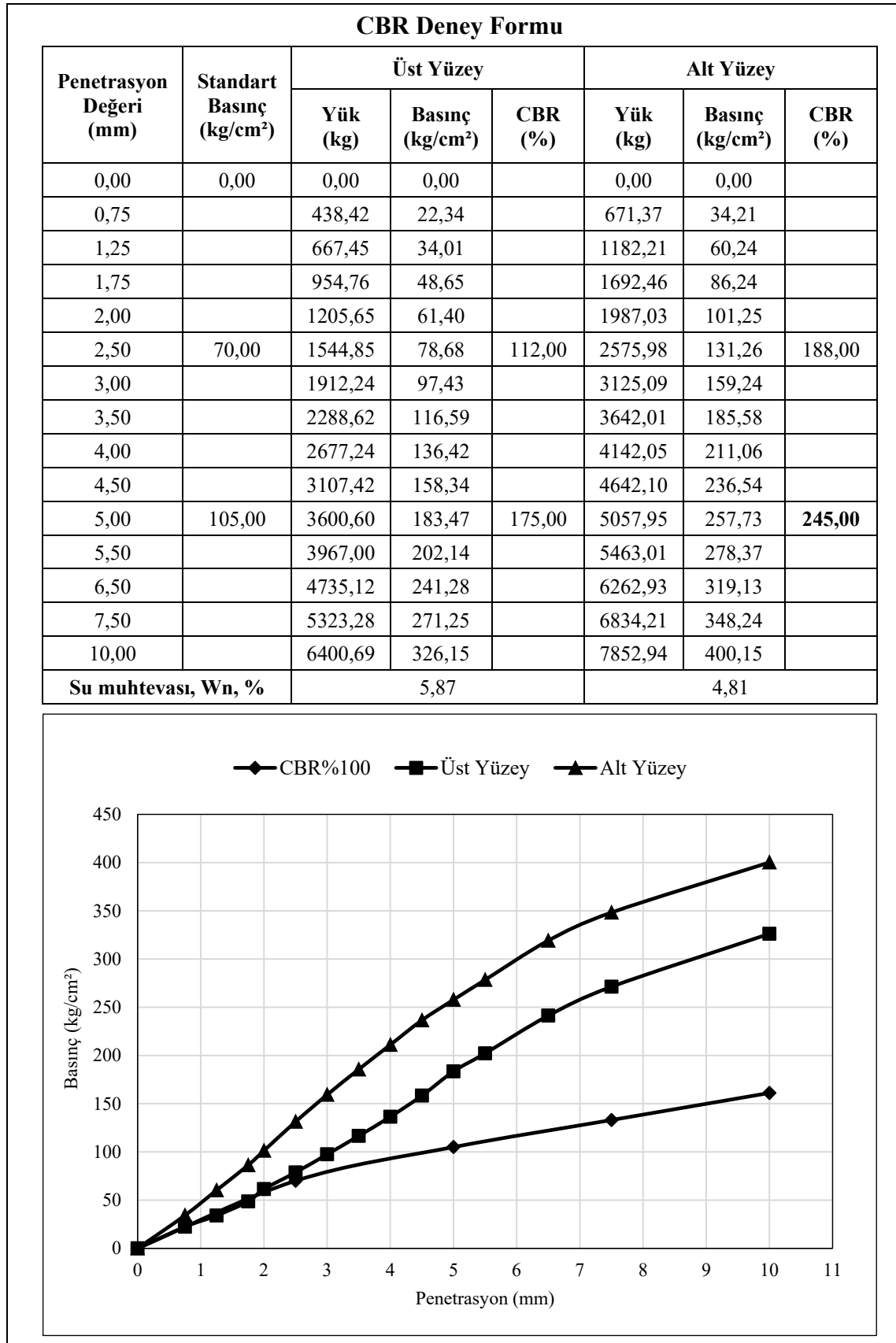
EK-11g: Karışım-3, 4 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (anlık).



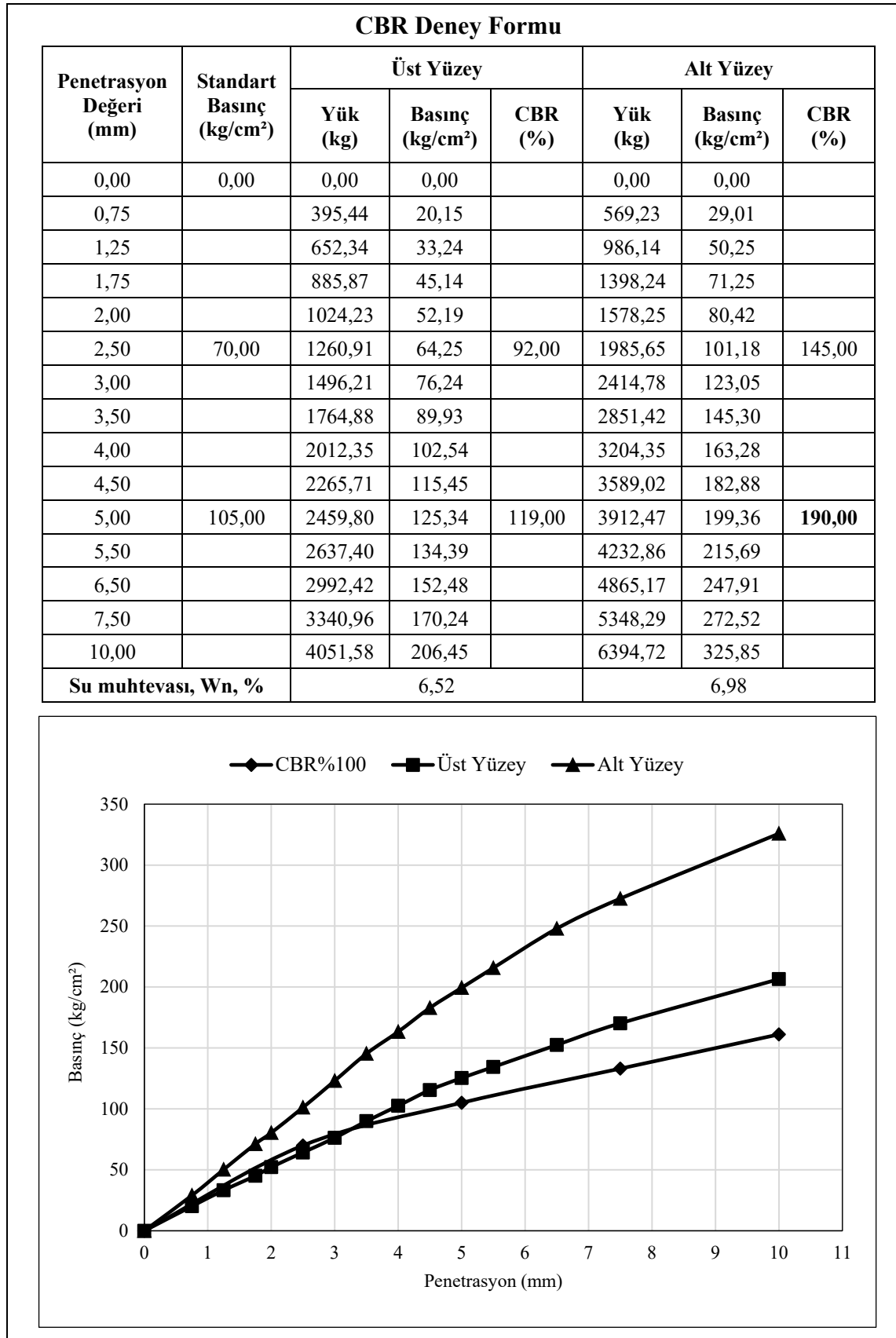
EK-11h: Karışım-3, 12 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (anlık).

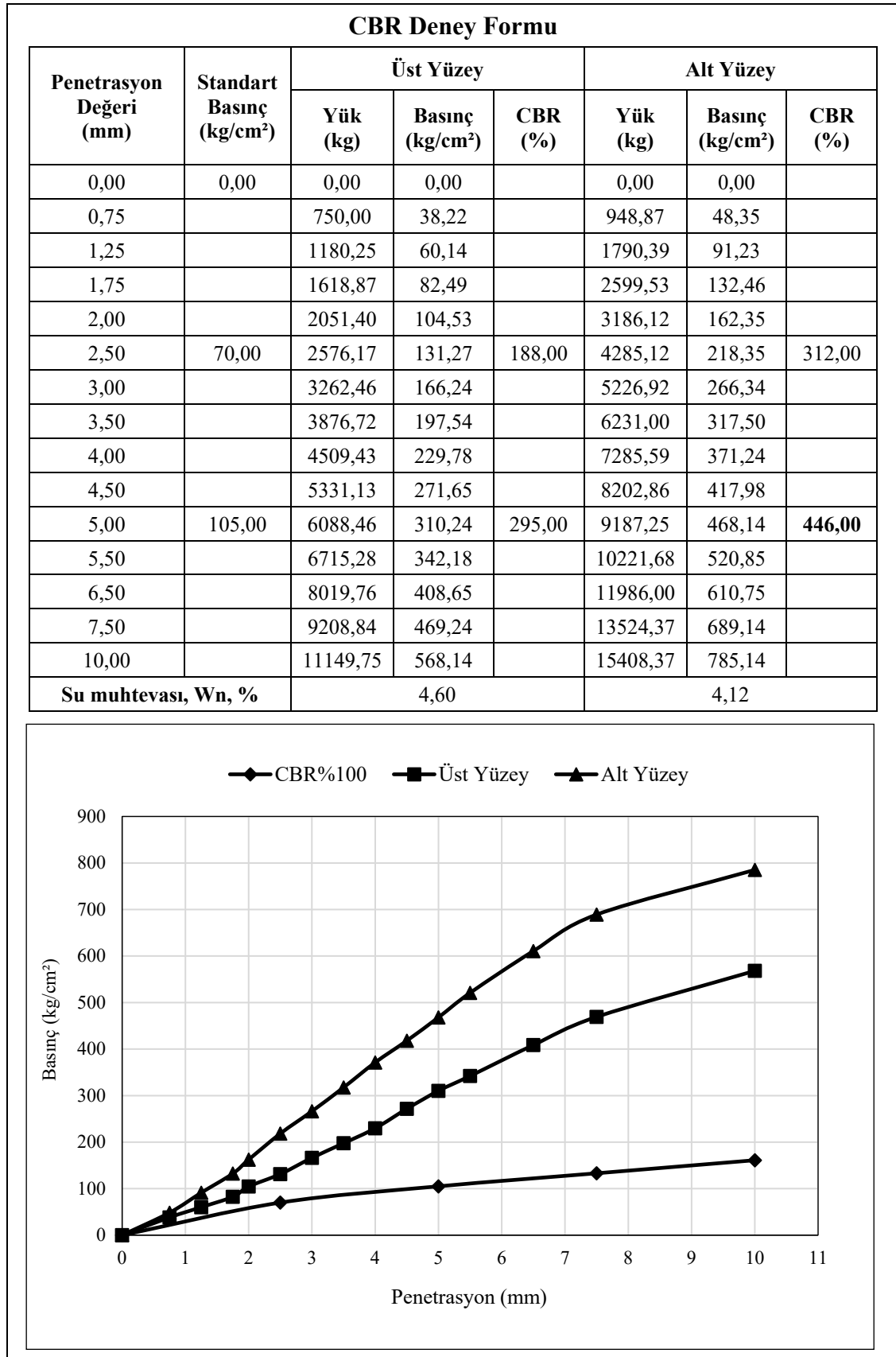
EK-11: Karışım-3, 20 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (anlık).

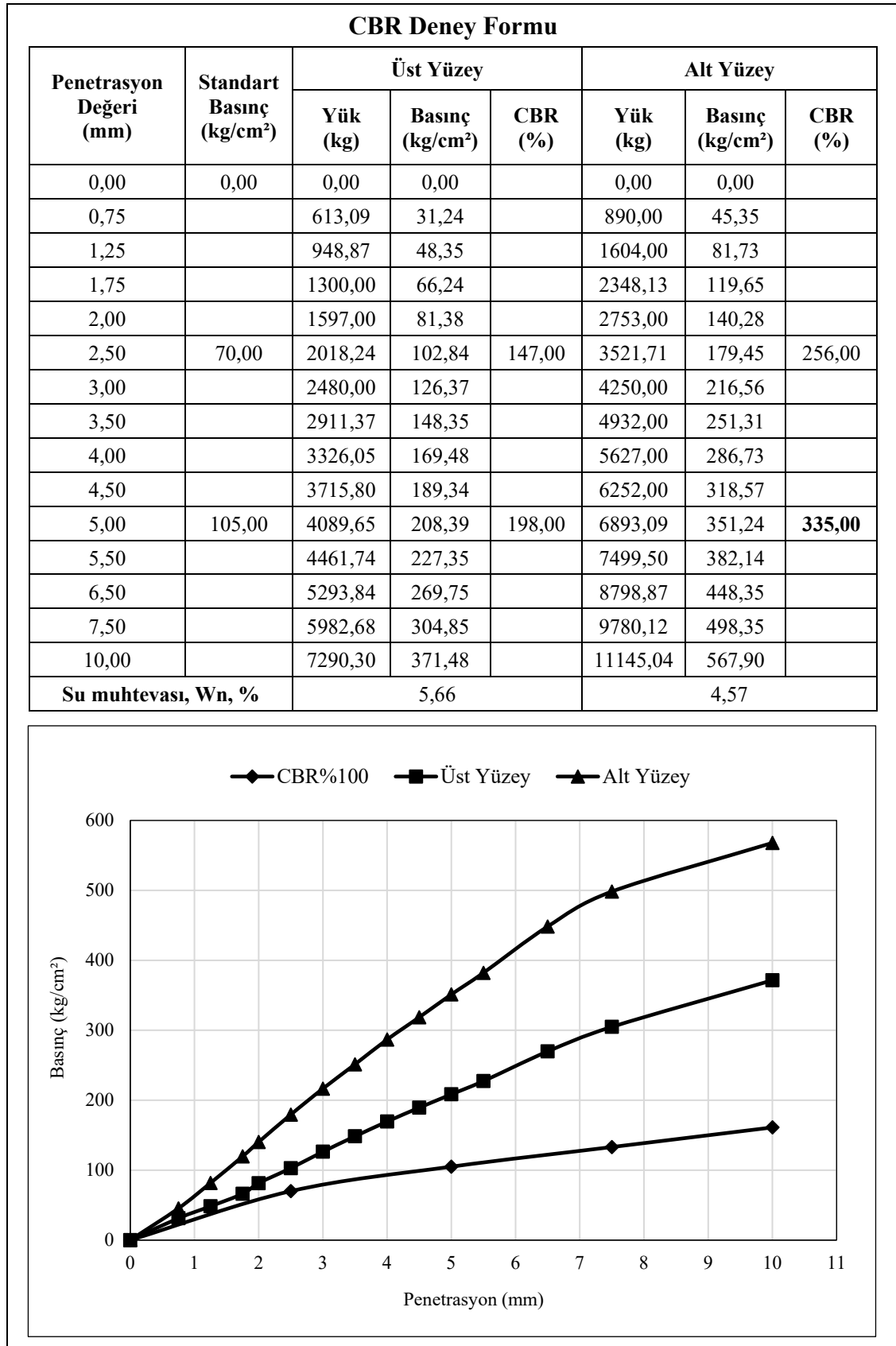
EK-11i: Karışım-4, 4 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (anlık).

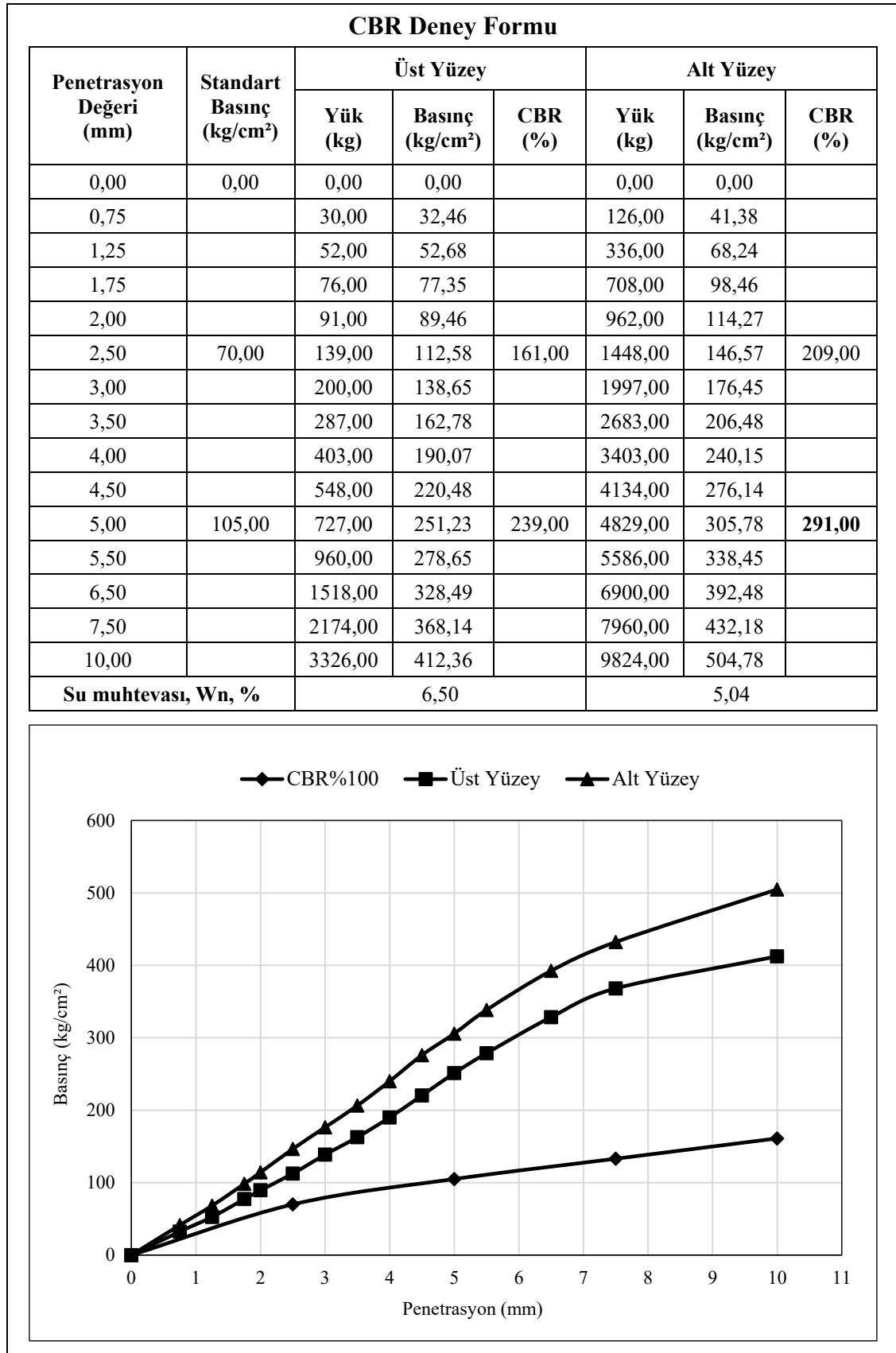
EK-11j: Karışım-4, 12 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (anlık).

EK-11k: Karışım-4, 20 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (anlık).



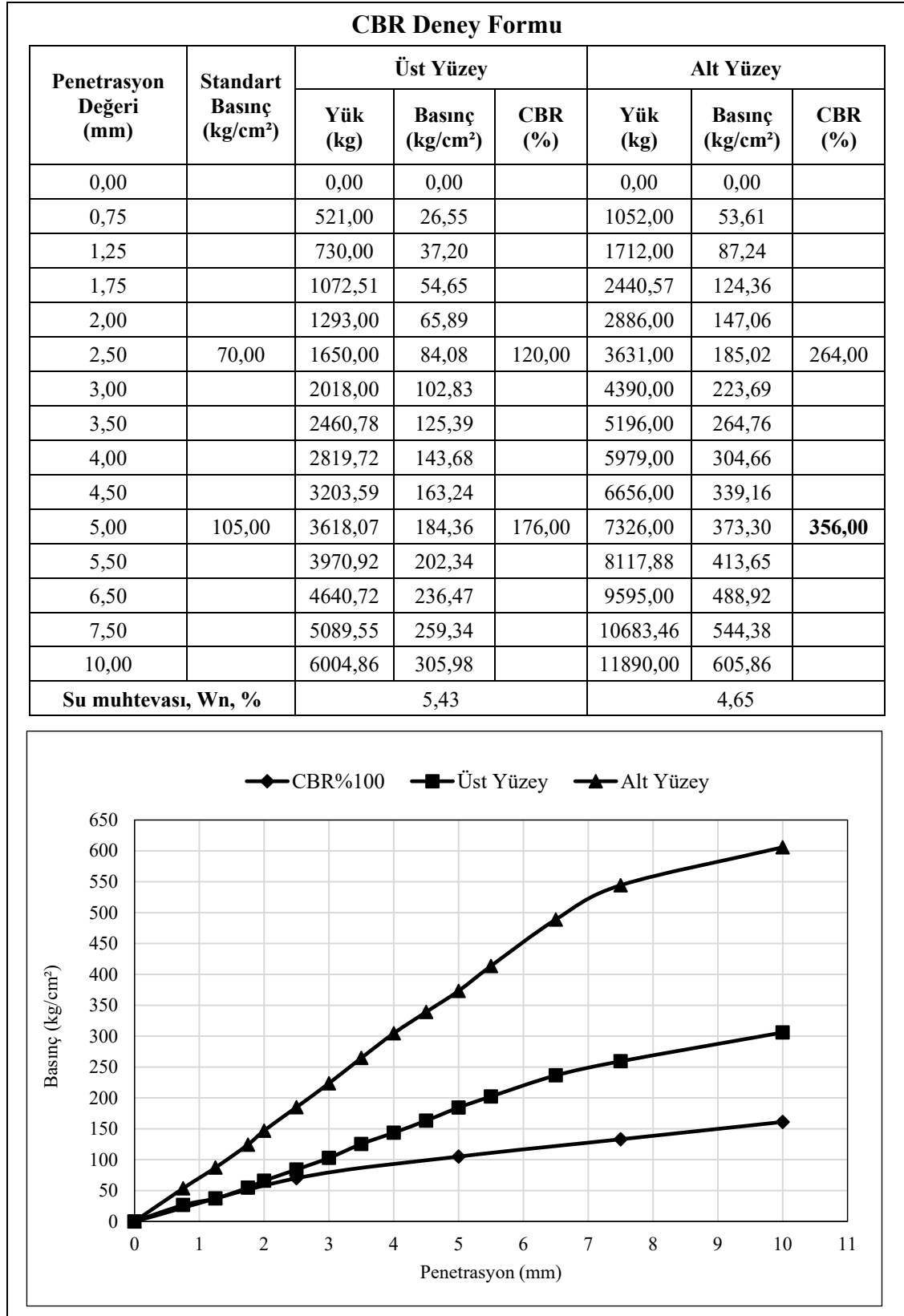
EK-111: Karışım-5, 4 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (anlık).

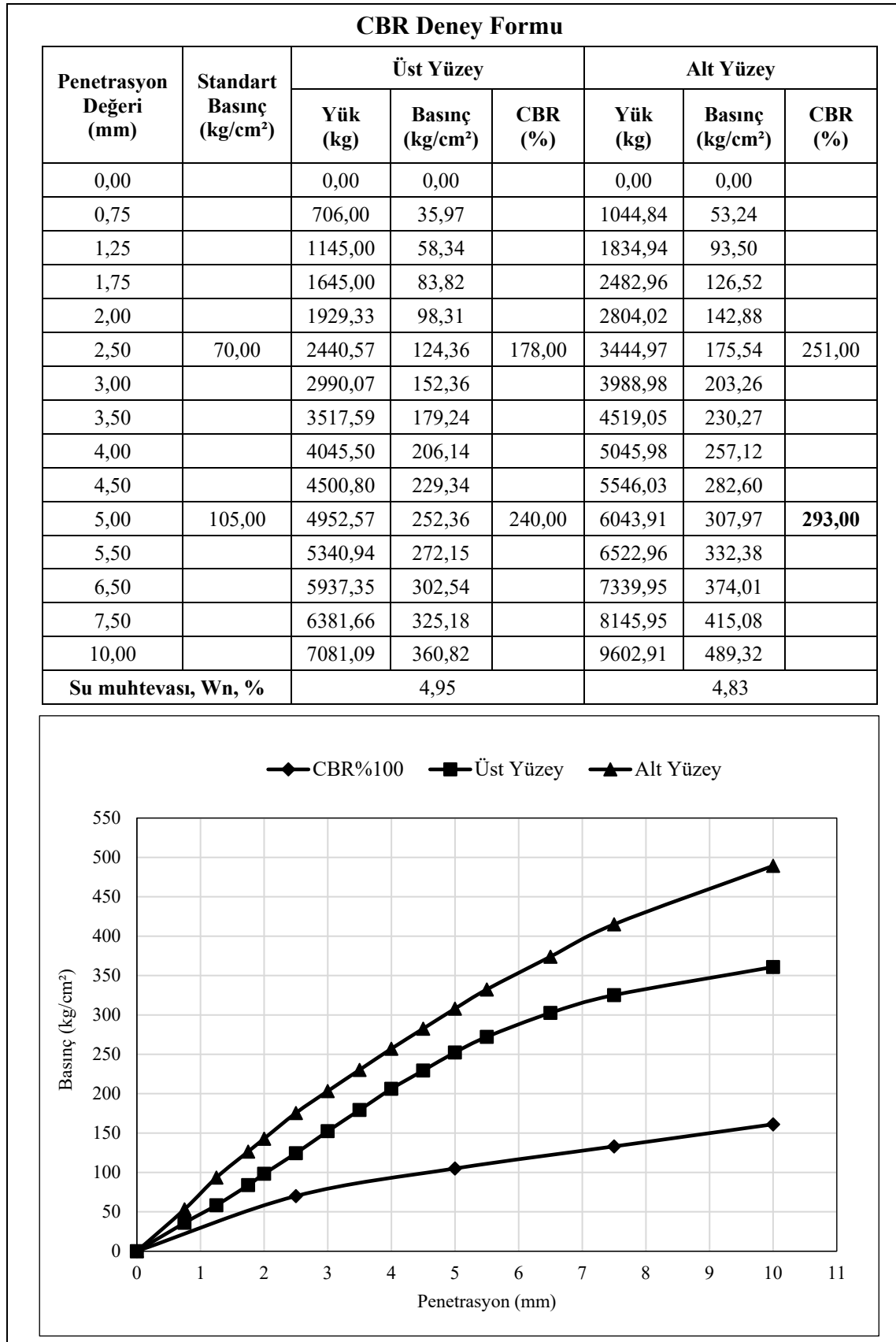
EK-11m: Karışım-5, 12 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (anlık).

EK-11n: Karışım-5, 20 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (anlık).

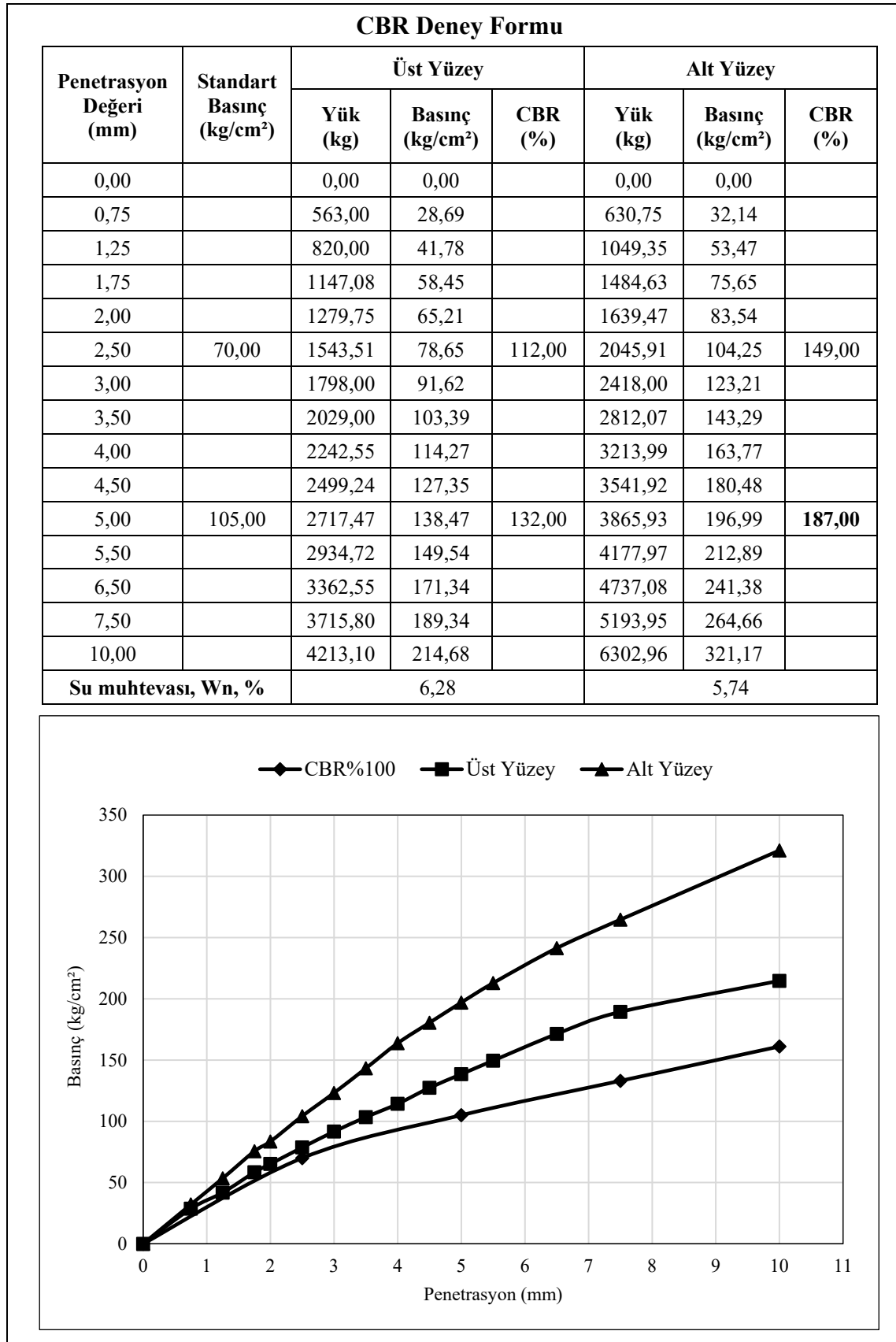
EK-12: Donma-çözünme deneyine ait sayısal veriler (7 gün kür).

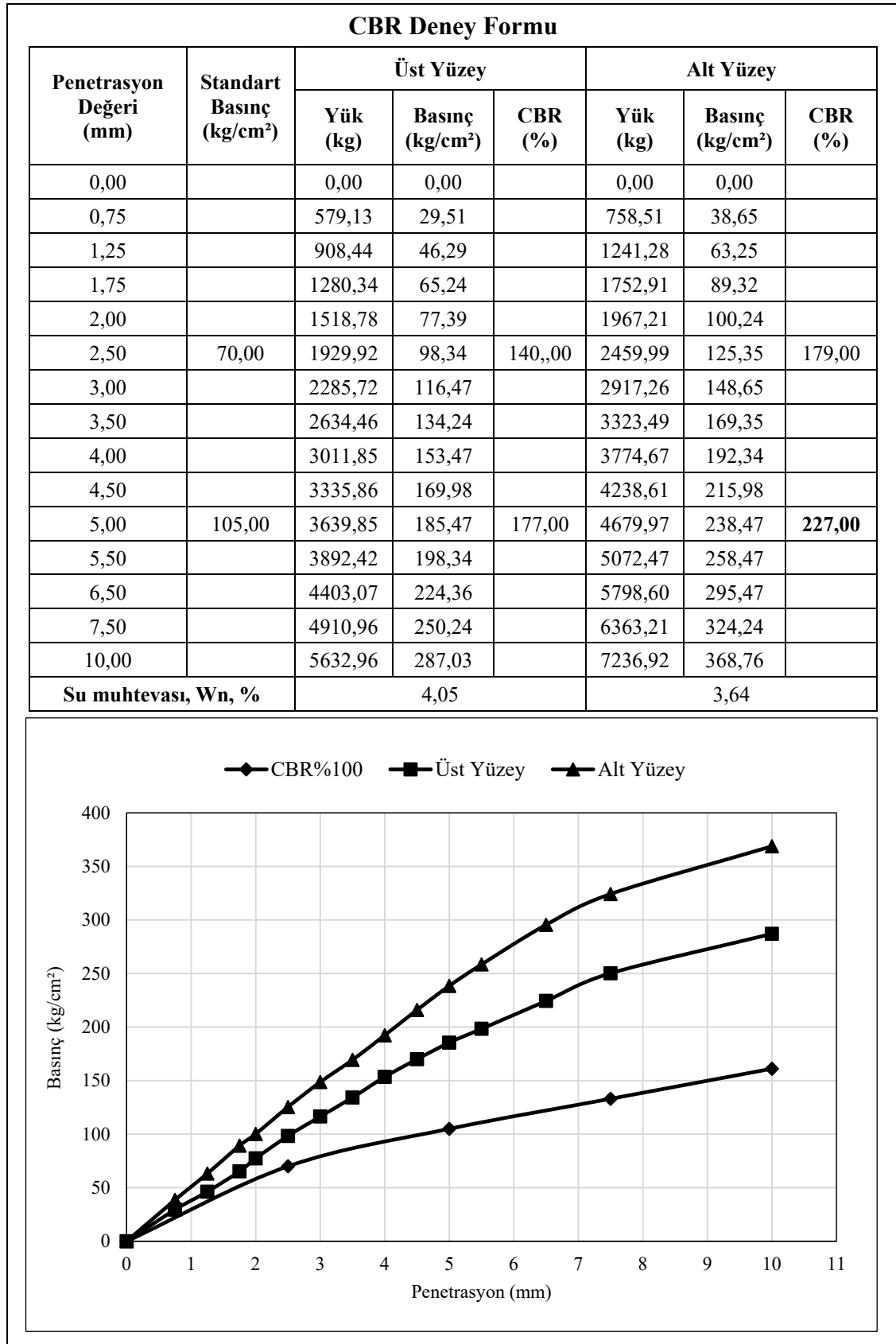
EK-12a: Karışım-1, 4 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (7 gün kür).



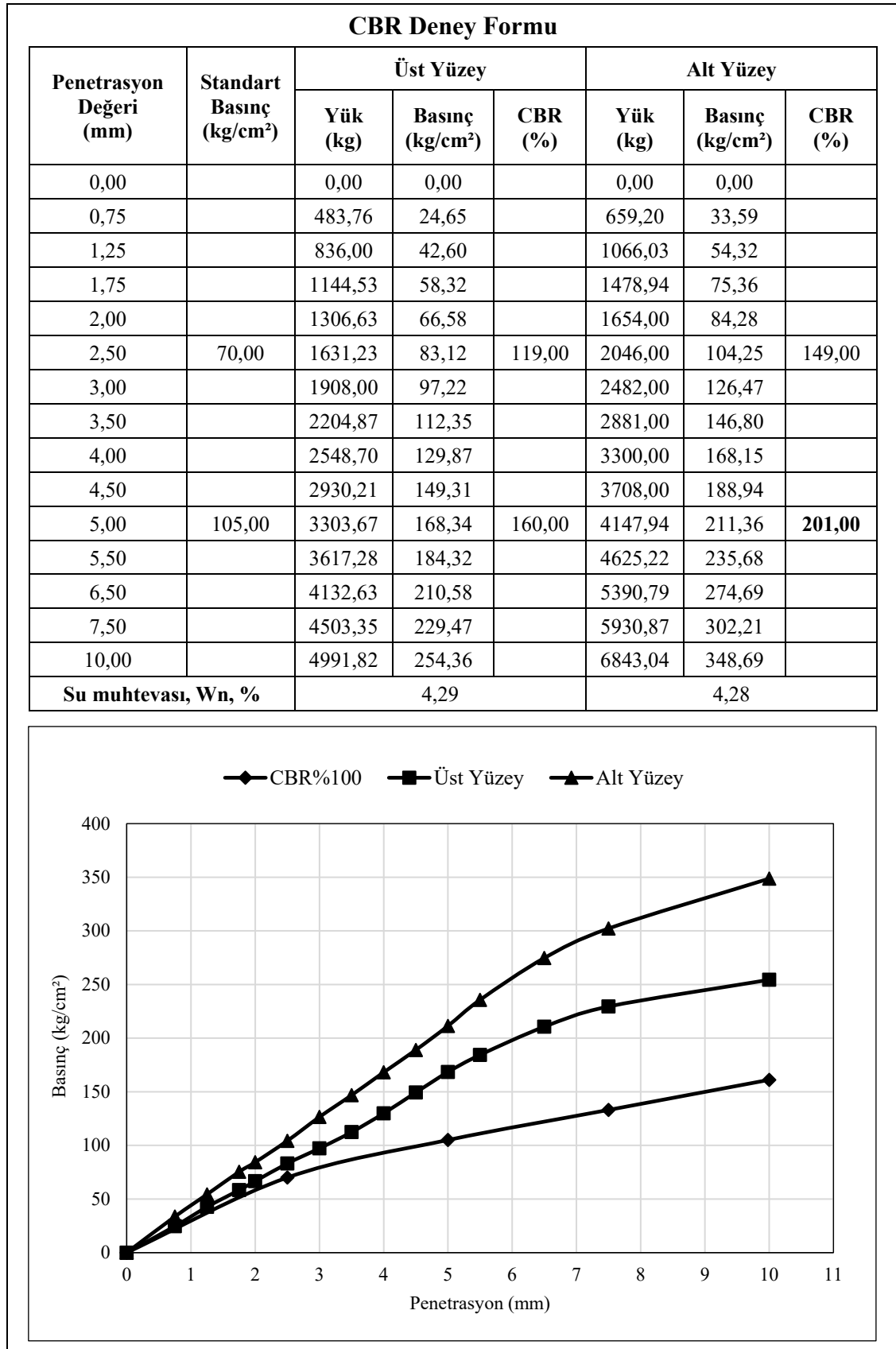
EK-12b: Karışım-1, 12 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (7 gün kür).

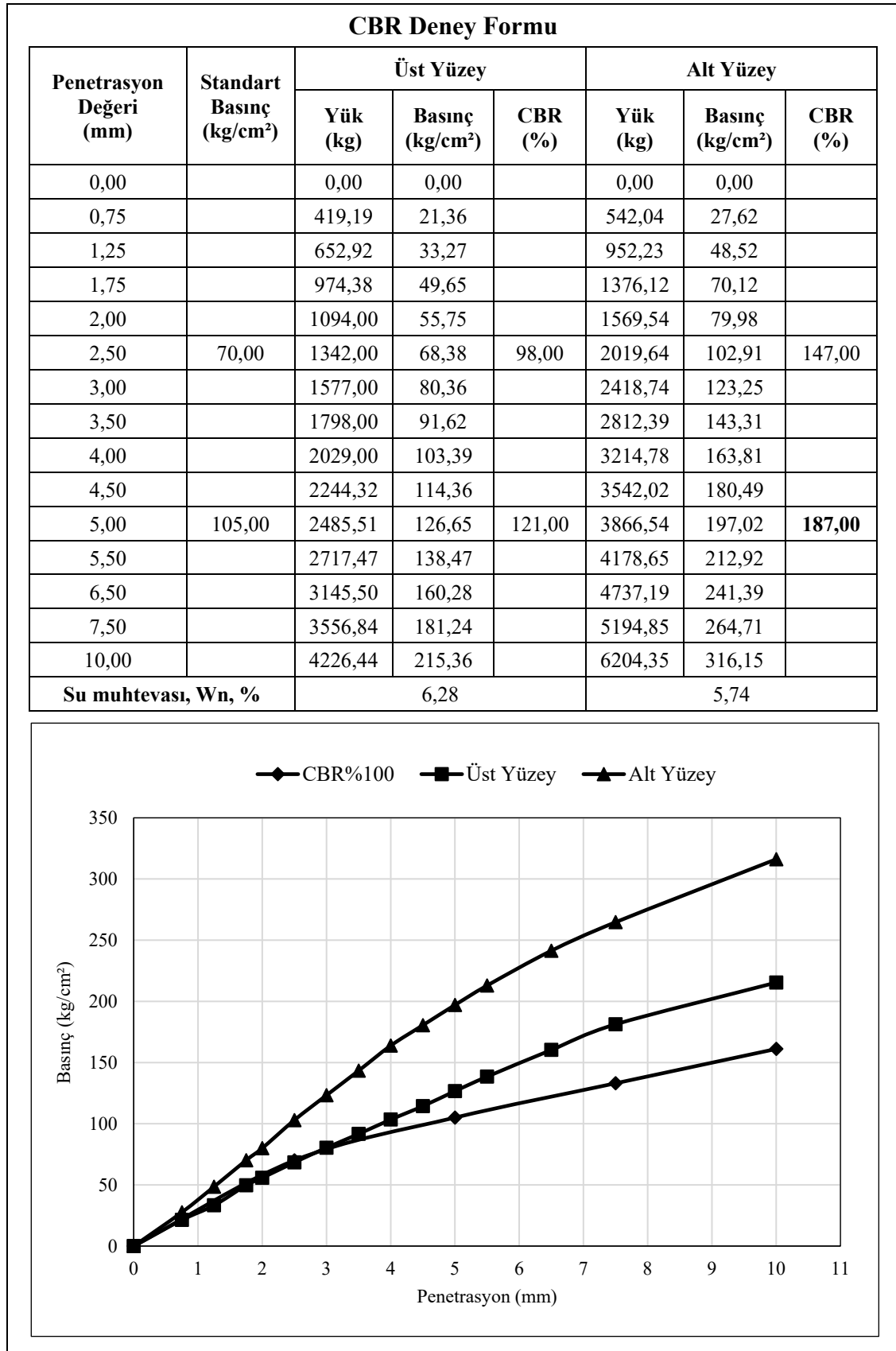
EK-12c: Karışım-1, 20 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (7 gün kür).



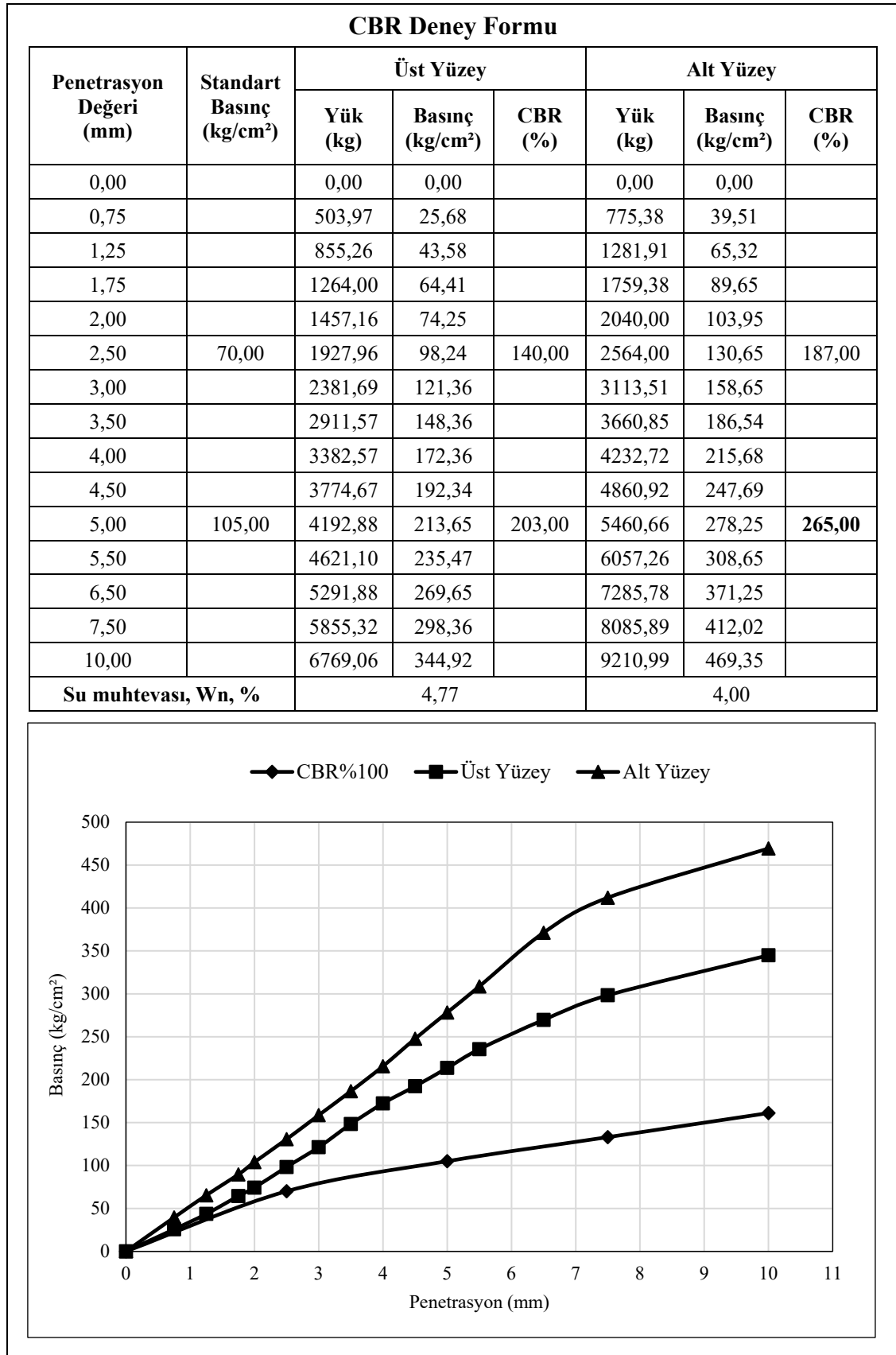
EK-12d: Karışım-2, 4 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (7 gün kür).

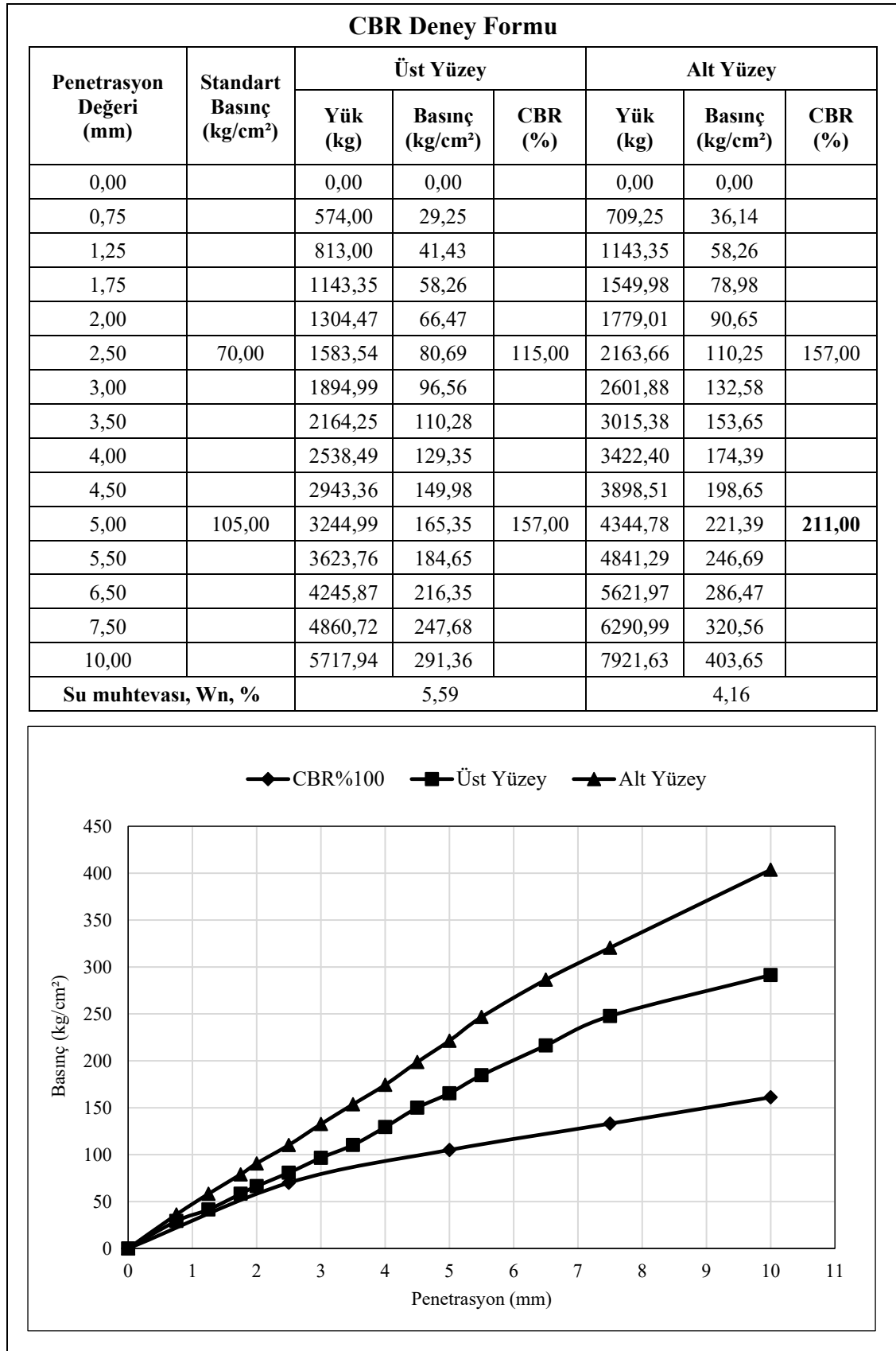
EK-12e: Karışım-2, 12 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (7 gün kür).

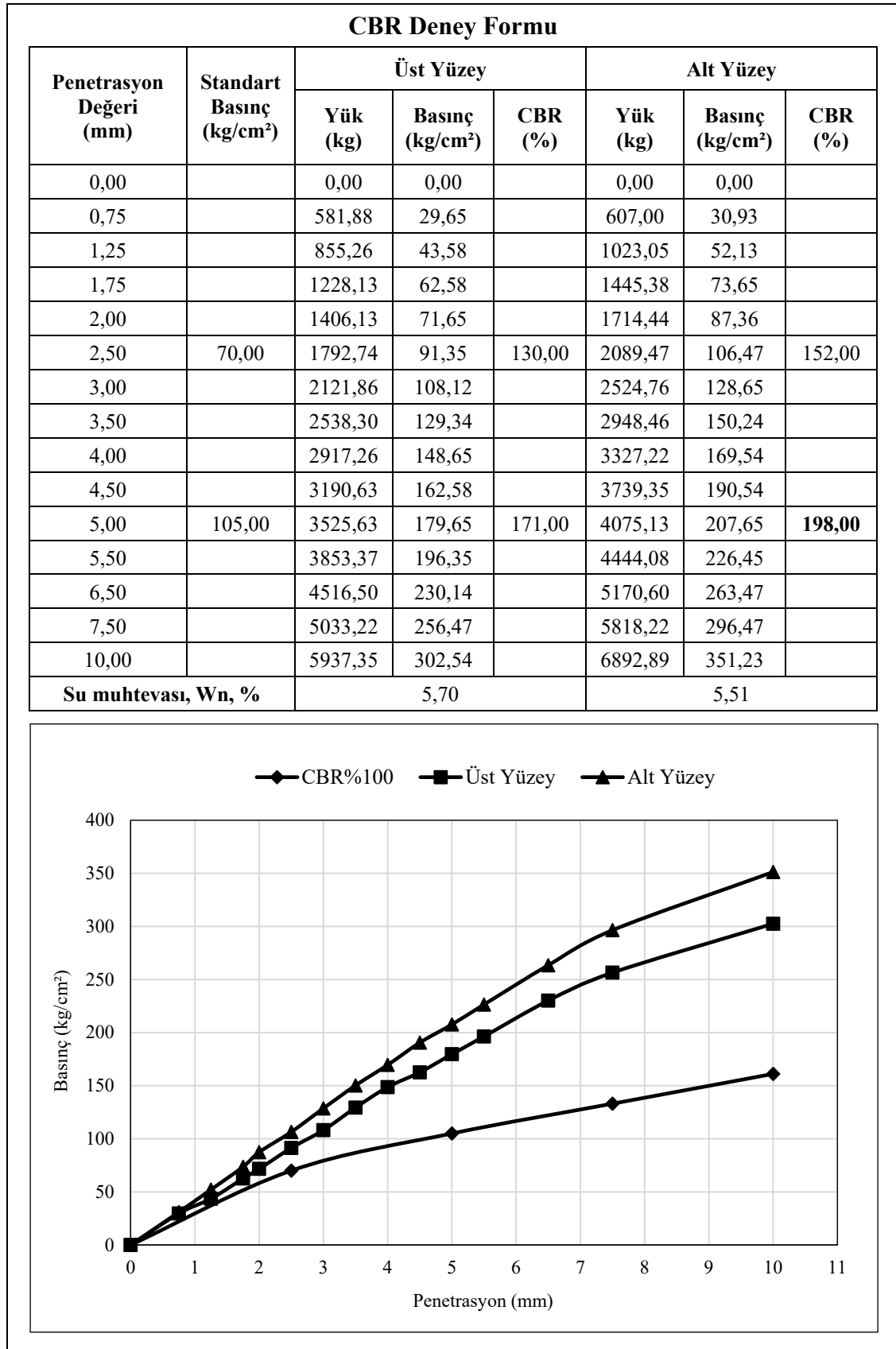


EK-12f: Karışım-2, 20 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (7 gün kür).

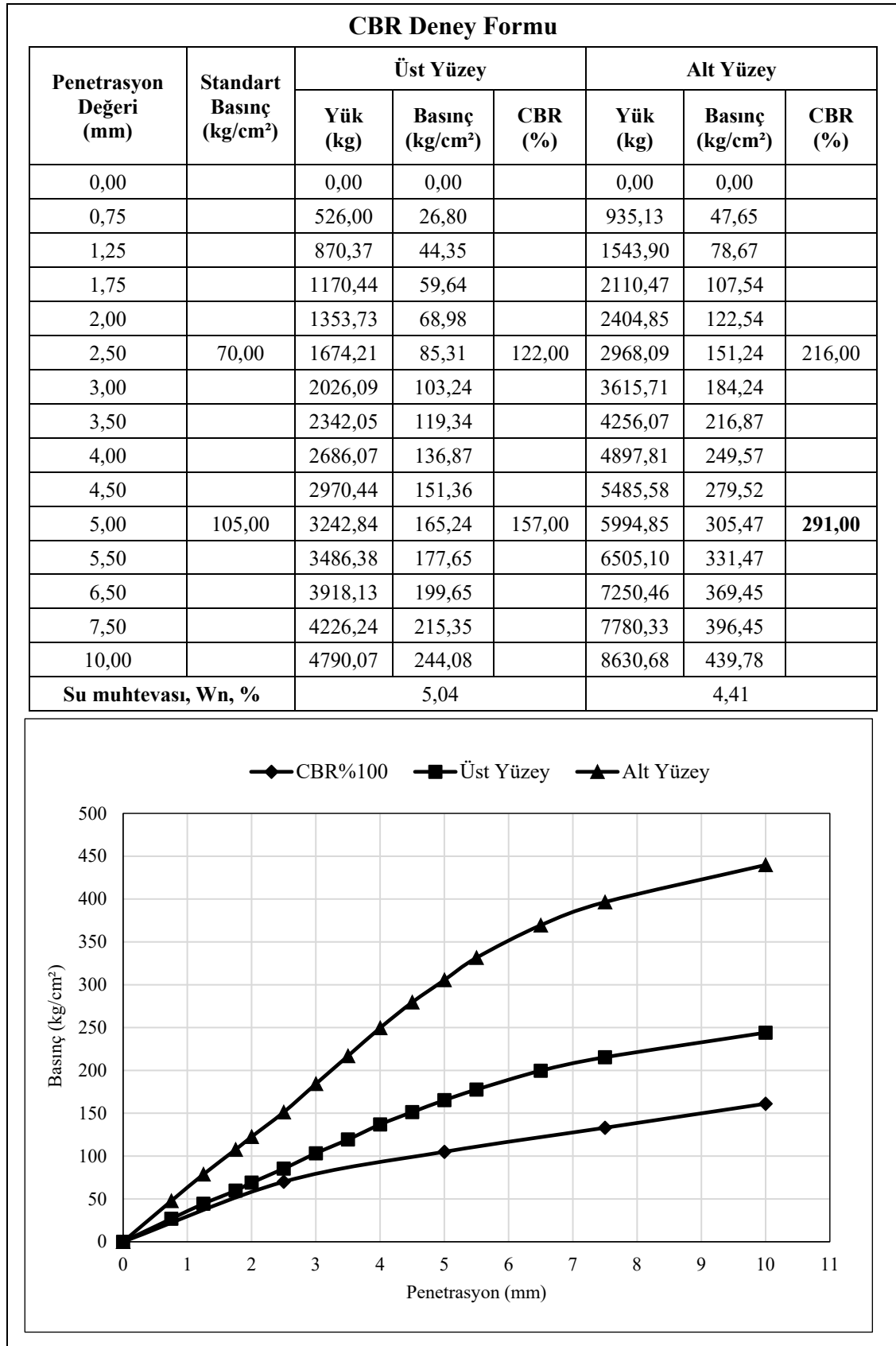
EK-12g: Karışım-3, 4 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (7 gün kür).



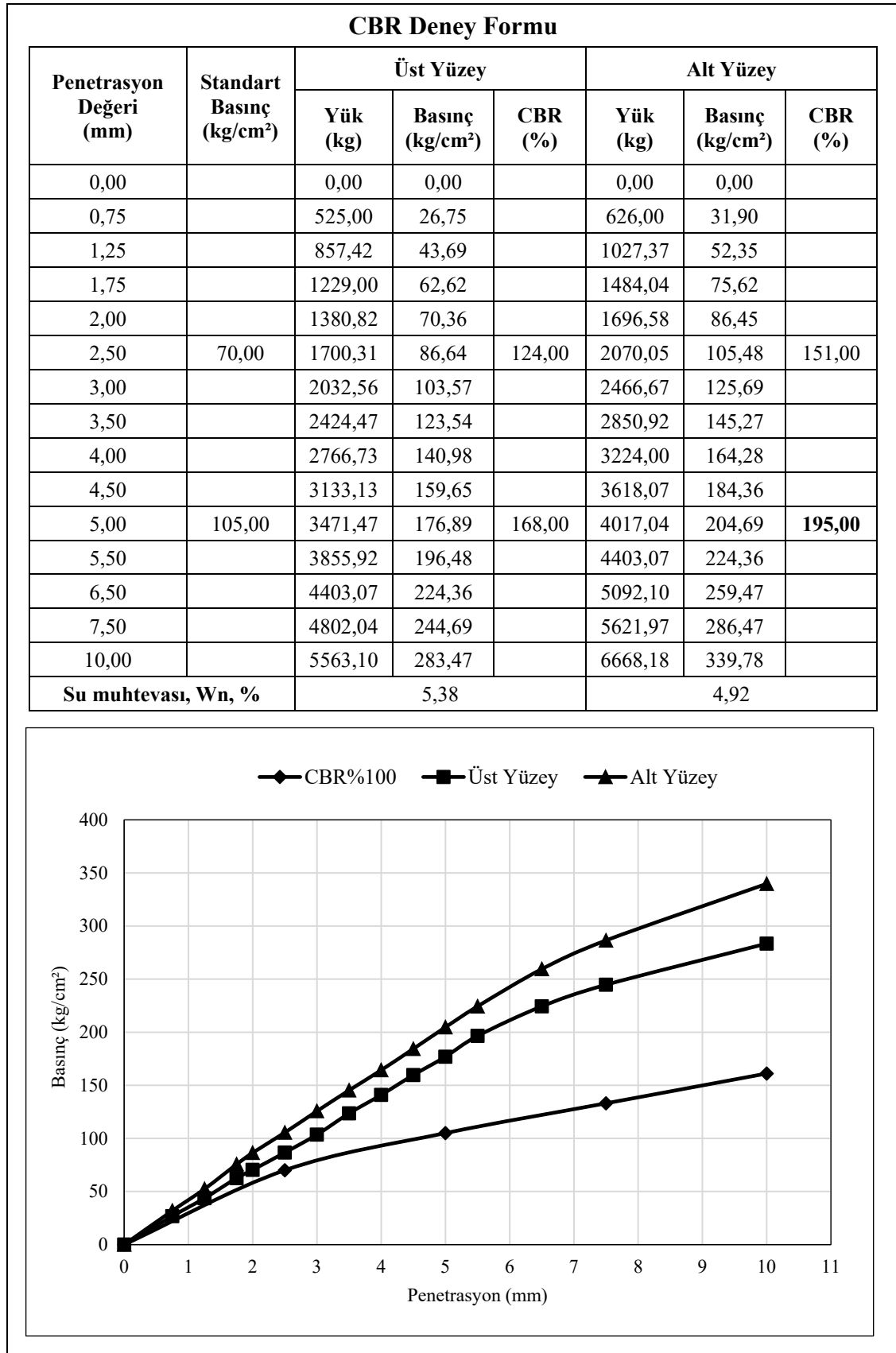
EK-12h: Karışım-3, 12 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (7 gün kür).

EK-121: Karışım-3, 20 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (7 gün kür).

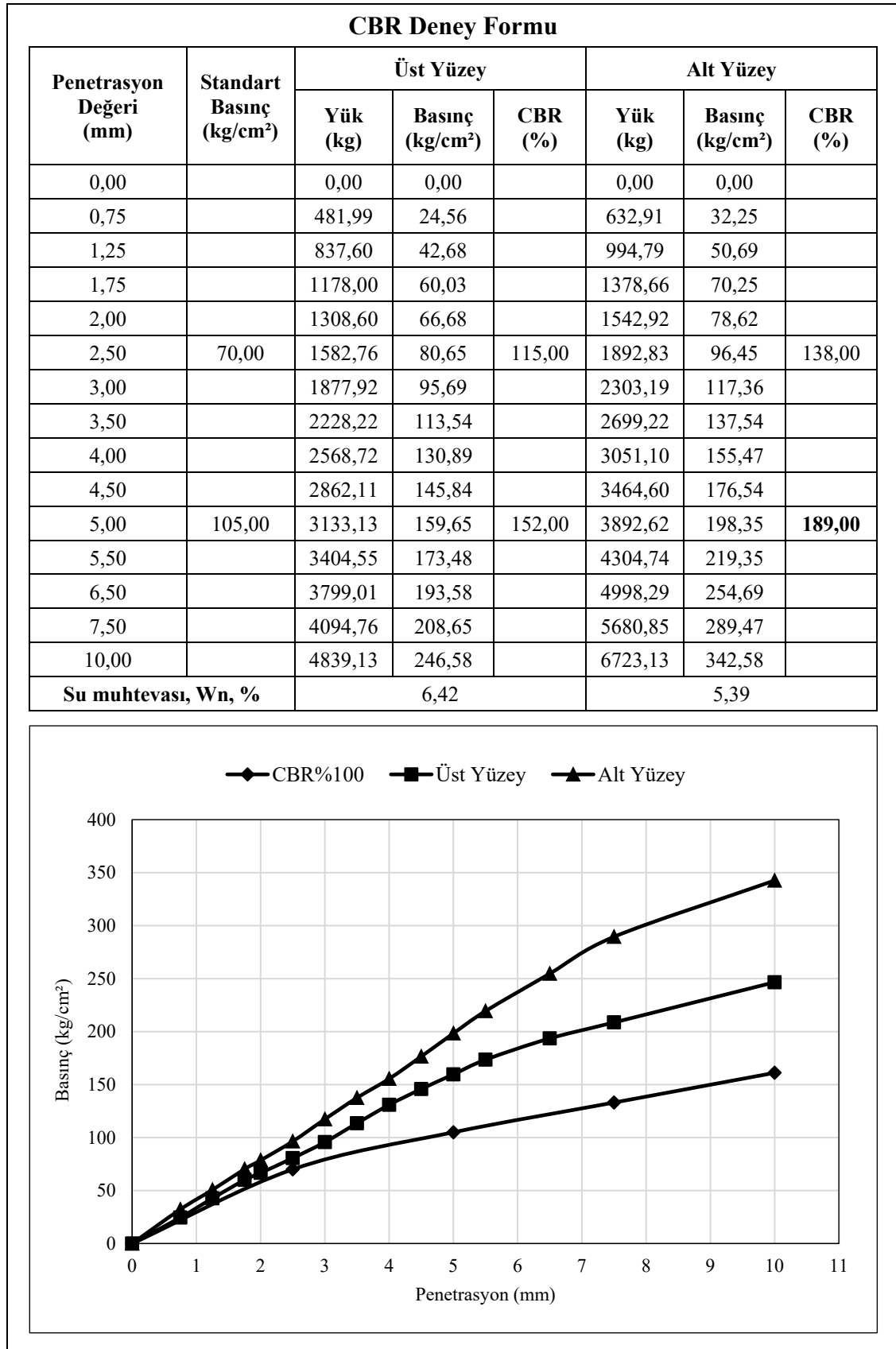
EK-12i: Karışım-4, 4 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (7 gün kür).

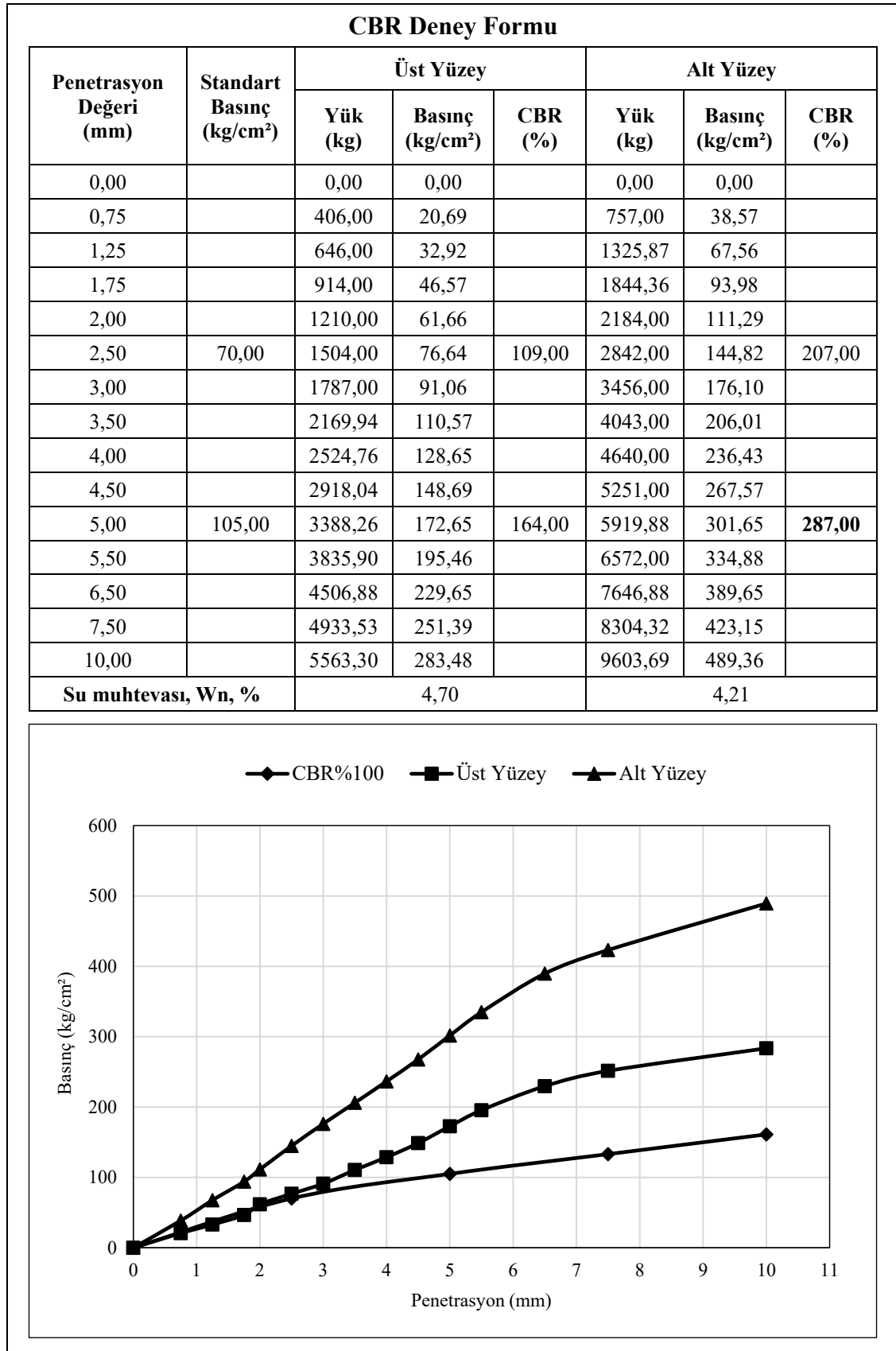


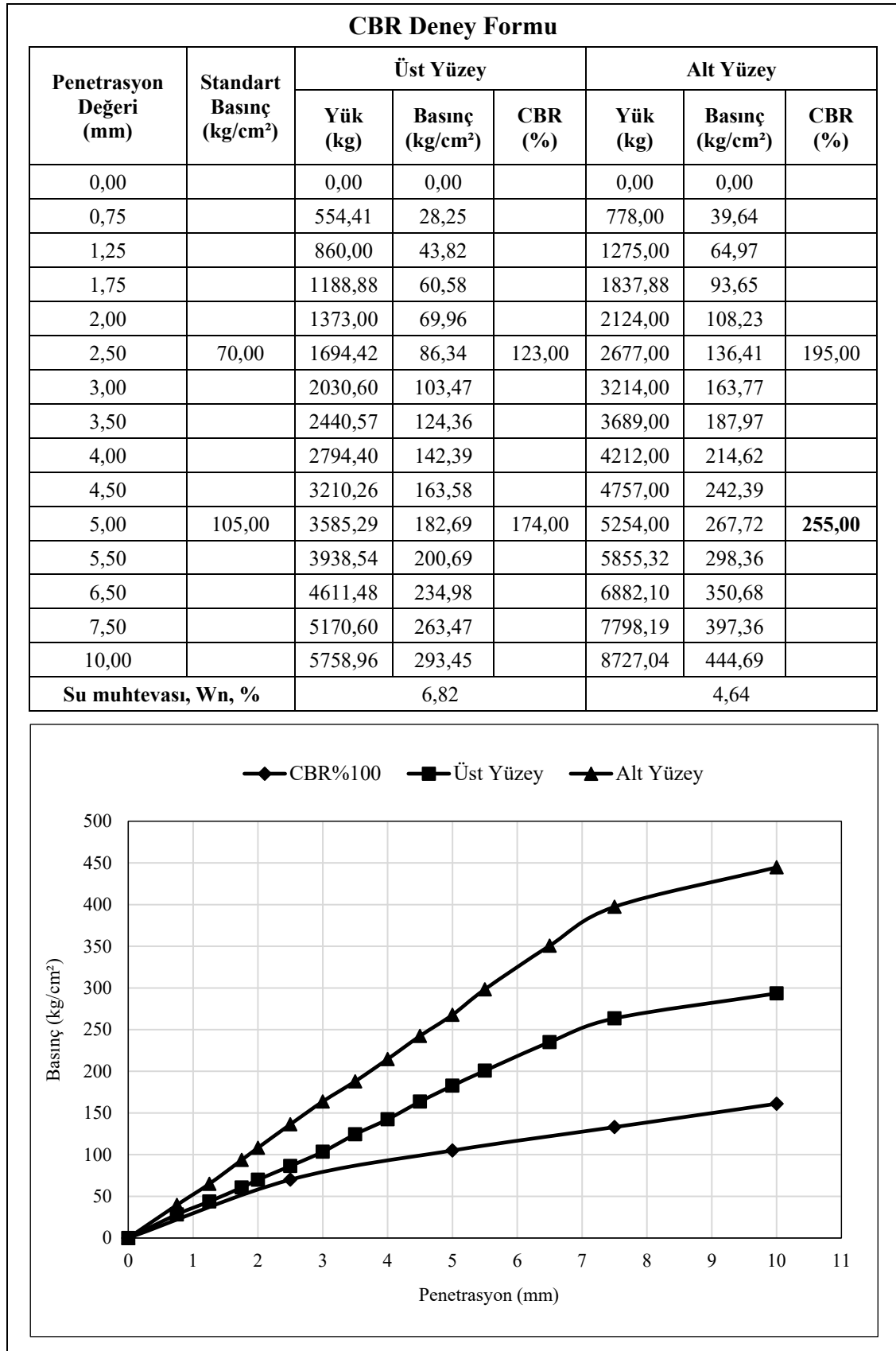
EK-12j: Karışım-4, 12 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (7 gün kür).



EK-12k: Karışım-4, 20 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (7 gün kür).



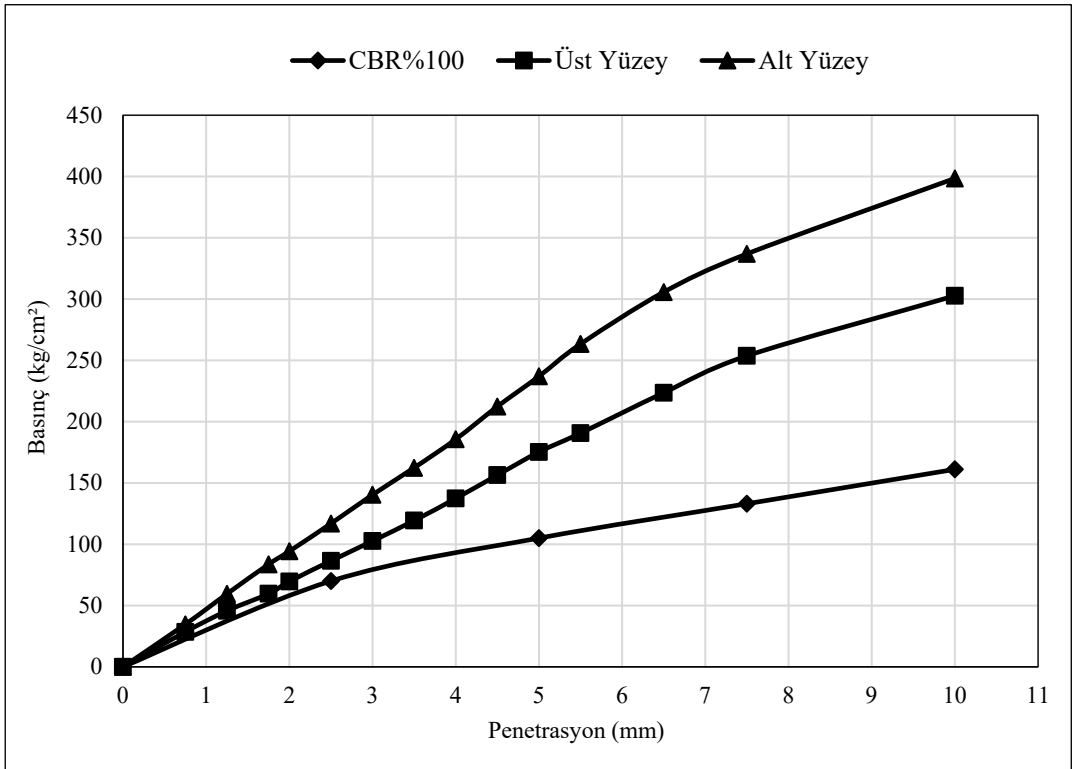
EK-121: Karışım-5, 4 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (7 gün kür).

EK-12m: Karışım-5, 12 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (7 gün kür).

EK-12n: Karışım-5, 20 çevirim donma-çözünme deneyi sayısal verileri (7 gün kür).

CBR Deney Formu

Penetrasyon Değeri (mm)	Standart Basınç (kg/cm ²)	Üst Yüzey			Alt Yüzey		
		Yük (kg)	Basınç (kg/cm ²)	CBR (%)	Yük (kg)	Basınç (kg/cm ²)	CBR (%)
0,00		0,00	0,00		0,00	0,00	
0,75		560,49	28,56		680,79	34,69	
1,25		896,67	45,69		1168,47	59,54	
1,75		1170,63	59,65		1641,44	83,64	
2,00		1366,49	69,63		1851,03	94,32	
2,50	70,00	1696,19	86,43	123,00	2293,97	116,89	167,00
3,00		2014,51	102,65		2755,15	140,39	
3,50		2341,66	119,32		3186,90	162,39	
4,00		2695,69	137,36		3643,38	185,65	
4,50		3069,94	156,43		4167,37	212,35	
5,00	105,00	3439,09	175,24	167,00	4650,73	236,98	226,00
5,50		3741,11	190,63		5168,24	263,35	
6,50		4387,76	223,58		5999,17	305,69	
7,50		4978,67	253,69		6611,47	336,89	
10,00		5940,29	302,69		7819,58	398,45	
Su muhtevası, Wn, %		6,70			4,91		



ÖZ GEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler

Adı Soyadı : Ahmet Neim KAHVECİ
Doğum Yeri ve Tarihi : Bayburt / 25.08.1983

Eğitim Durumu

Lisans Öğrenimi : İnşaat Mühendisliği, Karadeniz Teknik Üniversitesi
Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

İş Deneyimi

Çalıştığı Kurumlar :
-Cengiz Mapa Makyol Ortak Girişimi (2006-2007)
-Tunalar Teknik İnşaat (2008-2010)
-Albayrak İnşaat (2011-2013)
-Mapa İnşaat (2014-2018)

İletişim

Adres :Ertuğrulgazi Mahallesi Şehit Mesut Bilir Caddesi Uğurkent Sitesi
No:69 C Blok Kat:2 Daire:5 Bilecik/Merkez
Telefon : 0 (533) 659 51 69
E-Posta Adresi : ankahveci@gmail.com

Akademik Çalışmaları

-Kahveci, A. N., Ural, N., (2020). 'Atık Mermer Parçalarının Yol Temel Malzemesi Olarak Değerlendirilmesi'. ICAR Uluslararası Akademik Araştırmalar Kongresi, Bolu

Tarih:10/06/2020