

**T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KATKISININ KİL ZEMİNLERİN
STABİLİZASYONUNA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğba BİLGE

Balıkesir, Temmuz-2011

T.C.
BALIKESİR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KATKISININ KİL ZEMİNLERİN
STABİLİZASYONUNA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tuğba BİLGE

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Arzu OKUCU

Sınav Tarihi: 13.07.2011

Jüri Üyeleri: Yrd. Doç. Dr. Arzu OKUCU (BAÜ)

Yrd. Doç. Dr. Nurhayat DEĞİRMENCİ (BAÜ)

Yrd. Doç. Dr. Banu YAĞCI (BAÜ)

Enstitü Yönetim Kurulunun tarih sayılı oturumunun
nolu kararı ile Mezun olmuştur.

Balıkesir, Temmuz-2011

“ Bu alışmada Balıkesir Üniversitesi Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından BAP 2010/01 Kodlu proje ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanan bu çalışmayı yürüten, her konuda ve çalışma süresince ilgi ve desteğini esirgemeyen, Danışman Hocam Sayın Yard. Doç. Dr. Arzu OKUCU'ya ve İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı Hocam, Sayın Prof. Dr. Turgut ÖZDEMİR'e minnet ve şükran borçluyum.

Tez aşamamda yardımlarını esirgemeyen Araş. Gör. Süleyman UZUNER'e teşekkür ederim. Deneysel çalışmalarda ve verilerin değerlendirilmesinde yardımlarını esirgemeyen Araş. Gör. Eyyüb KARAKAN ve İstanbul Teknik Üniversitesi'nde Zemin Laboratuvarlarında çalışan görevlilere teşekkür ederim.

Malzeme teminindeki katkılarından dolayı Gürler Beton A.Ş.'ye, Eti Maden İşletmeleri'ne, Erdemir Ereğli Demir Çelik Fabrikası'na ve Süd-Chemie (Tr) Madencilik San. ve Tic. A.Ş.'ye maddi desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında büyük pay sahibi olan babam Salim BİLGE'ye, annem Asiye BİLGE'ye ve tüm aileme, Yük. Müh. Özgür ERGÜN'e, İnş. Müh. Günce Gözde GEZGİNCİ'ye, İnş. Müh. Egemen GÜNDÜZ'e ve diğer tüm dostlarıma teşekkür ederim.

Balıkesir, 2011

Tuğba BİLGE

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLOLAR LİSTESİ	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
2. STABİLİZASYON	3
3. ZEMİNLERİN KATKI MALZEMELERİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ VE KULLANILAN KATKI MALZEMELERİ	6
3.1 Yüksek Fırın Cürufu	8
3.2 Kireç	12
3.3 Uçucu Kül	14
3.4 Zeolit	19
4. KİL ZEMİNLER	21
4.1 Bentonit Kili	22
4.1.1 Bentonitin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri	23
4.1.2 Bentonitin Tanınması	24

5. KONU İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR	28
6. YAPILAN DENEYLER VE UYGULANAN METODLAR	34
6.1 Özgül Yoğunluk	35
6.2 Likit Limit ve Plastik Limit Deneyi	38
6.2.1 Likit Limit Deneyi	39
6.2.2 Plastik Limit Deneyi	40
6.3 Tane Çapı Dağılımı ve Zemin Sınıflandırması	44
6.3.1 Hidrometre Deneyi	44
6.3.2 Zemin Sınıflandırması	46
6.4 Kompaksiyon Deneyi	48
6.5 Serbest Basınç Deneyi	50
7. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME	54
7.1 Karışımların Özgül Yoğunluk Deney Sonuçları	54
7.2 Karışımların Kıvam Limitleri	61
7.3 Karışımların Tane Çapı Dağılımı	68
7.4 Karışımların Zemin Sınıflandırması	75
7.5 Karışımların Kompaksiyon Özellikleri	76
7.6 Karışımların Serbest Basınç Deney Sonuçları	90
8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	99
KAYNAKLAR	102

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

<u>Simge Adı</u>	<u>Tanımı / Birimi</u>
ASTM	: American Society for Testing and Materials
TS	: Türk standartları
YFC	: Yüksek fırın cürufu
UK	: Uçucu kül
TSE	: Türk standartları enstitüsü
Ip	: Plastisite indisi
Gs	: Özgül yoğunluk
w _{opt}	: Optimum su muhtevası (%)
γ _k	: Kuru birim hacim ağırlığı (kN/m ³)
ρ _k	: Kuru yoğunluk (Mg/m ³)
TS EN	: Türk standartları euro norm
W ₁	: Piknometre ağırlığı (g)
W ₂	: Piknometre+numune ağırlığı (g)
W ₃	: Piknometre+numune+su ağırlığı (g)
W ₄	: Piknometre+su ağırlığı (g)
w _L	: Likit limit değeri (%)
w _p	: Plastik limit değeri (%)
w ₁	: Kap ağırlığı (g)
w ₂	: Kap+ıslak numune ağırlığı (g)
w ₃	: Kap+kuru numune ağırlığı (g)
Φ	: İçsel sürtünme açısı

ŞEKİLLER LİSTESİ

<u>Sekil No</u>	<u>Sekil Adı</u>	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1	Stabilizasyon Yöntemleri	4
Şekil 6.1	Özgül yoğunluk deney seti	37
Şekil 6.2	Likit limit deney seti	40
Şekil 6.3	Plastik limit deney seti	42
Şekil 6.4	Hidrometre deney seti	45
Şekil 6.5	Plastisite kartı	47
Şekil 6.6	Kompaksiyon deney seti	49
Şekil 6.7	Tek eksenli basınç aleti	51
Şekil 6.8	Kırılmadan sonra numunelerin durumu	52
Şekil 7.1	Karışımların özgül yoğunluk grafiği	54
Şekil 7.2	1-2-3-4 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği	56
Şekil 7.3	1-2-3-4-5-6-7 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği	56
Şekil 7.4	1-2-3-4-8-9-10 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği	57
Şekil 7.5	1-2-3-4-11-12-13 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği	57
Şekil 7.6	1-2-3-4-14-15-16 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği	58
Şekil 7.7	1-2-3-4-17-18-19 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği	58
Şekil 7.8	1-8-9-10-11-12-13 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği	59
Şekil 7.9	1-14-15-16-17-18-19 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği	59
Şekil 7.10	2-5-8-11-14-17 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği	60
Şekil 7.11	3-6-9-12-15-18 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği	60

Şekil 7.12	4-7-10-13-16-19 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği	61
Şekil 7.13	Likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği	62
Şekil 7.14	1-2-3-4 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği	63
Şekil 7.15	1-2-3-4-5-6-7 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği	64
Şekil 7.16	1-2-3-4-8-9-10 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği	64
Şekil 7.17	1-2-3-4-11-12-13 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği	65
Şekil 7.18	1-2-3-4-14-15-16 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği	65
Şekil 7.19	1-2-3-4-17-18-19 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği	66
Şekil 7.20	1-8-9-10-11-12-13 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği	66
Şekil 7.21	1-14-15-16-17-18-19 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği	67
Şekil 7.22	2-5-8-11-14-17 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği	67
Şekil 7.23	3-6-9-12-15-18 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği	68
Şekil 7.24	4-7-10-13-16-19 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği	68
Şekil 7.25	Hidrometre tane çapı dağılım grafiği	69
Şekil 7.26	1-2-3-4 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı	70
Şekil 7.27	1-2-3-4-5-6-7 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı	71
Şekil 7.28	1-2-3-4-8-9-10 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı	71

Şekil 7.29	1-2-3-4-11-12-13 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı	72
Şekil 7.30	1-2-3-4-14-15-16 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı	72
Şekil 7.31	1-2-3-4-17-18-19 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı	73
Şekil 7.32	1-8-9-10-11-12-13 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı	73
Şekil 7.33	1-14-15-16-17-18-19 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı	74
Şekil 7.34	2-5-8-11-14-17 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı	74
Şekil 7.35	3-6-9-12-15-18 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı	75
Şekil 7.36	4-7-10-13-16-19 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı	75
Şekil 7.37	Karışımların optimum su içeriği grafiği	76
Şekil 7.38	1-2-3-4 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği	78
Şekil 7.39	1-2-3-4-5-6-7 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği	78
Şekil 7.40	1-2-3-4-8-9-10 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği	79
Şekil 7.41	1-2-3-4-11-12-13 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği	79
Şekil 7.42	1-2-3-4-14-15-16 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği	80
Şekil 7.43	1-2-3-4-17-18-19 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği	80
Şekil 7.44	1-8-9-10-11-12-13 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği	81
Şekil 7.45	1-14-15-16-17-18-19 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği	81
Şekil 7.46	2-5-8-11-14-17 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği	82

Şekil 7.47	3-6-9-12-15-18 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği	82
Şekil 7.48	4-7-10-13-16-19 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği	83
Şekil 7.49	Karışımların kuru birim hacim ağırlık grafiği	83
Şekil 7.50	1-2-3-4 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği	85
Şekil 7.51	1-2-3-4-5-6-7 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği	85
Şekil 7.52	1-2-3-4-8-9-10 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği	86
Şekil 7.53	1-2-3-4-11-12-13 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği	86
Şekil 7.54	1-2-3-4-14-15-16 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği	87
Şekil 7.55	1-2-3-4-17-18-19 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği	87
Şekil 7.56	1-8-9-10-11-12-13 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği	88
Şekil 7.57	1-14-15-16-17-18-19 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği	88
Şekil 7.58	2-5-8-11-14-17 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği	89
Şekil 7.59	3-6-9-12-15-18 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği	89
Şekil 7.60	4-7-10-13-16-19 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği	90
Şekil 7.61	Serbest basınç dayanım grafiği	91
Şekil 7.62	1-2-3-4 No'lu numunelerin serbest basınç dayanım grafiği	93
Şekil 7.63	1-2-3-4-5-6-7 No'lu numunelerin serbest basınç dayanım grafiği	94
Şekil 7.64	1-2-3-4-8-9-10 No'lu numunelerin serbest basınç dayanım grafiği	94

Şekil 7.65	1-2-3-4-11-12-13 No'lu numunelerin serbest basınç dayanım grafiği	95
Şekil 7.66	1-2-3-4-14-15-16 No'lu numunelerin serbest basınç dayanım grafiği	95
Şekil 7.67	1-2-3-4-17-18-19 No'lu numunelerin serbest basınç dayanım grafiği	96
Şekil 7.68	1-8-9-10-11-12-13 No'lu numunelerin serbest basınç dayanım grafiği	96
Şekil 7.69	1-14-15-16-17-18-19 No'lu numunelerin serbest basınç dayanım grafiği	97
Şekil 7.70	2-5-8-11-14-17 No'lu numunelerin serbest basınç dayanım grafiği	97
Şekil 7.71	3-6-9-12-15-18 No'lu numunelerin serbest basınç dayanım grafiği	98
Şekil 7.72	4-7-10-13-16-19 No'lu numunelerin serbest basınç dayanım grafiği	98

TABLolar LİSTESİ

<u>Tablo No</u>	<u>Tablo Adı</u>	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1	Stabilizasyon metodları	7
Tablo 3.2	Zemin cinsine göre tavsiye edilen stabilizasyon metodu	8
Tablo 3.3	Erdemir yüksek fırın cürufu analiz raporu	11
Tablo 3.4	Çalışma kapsamında kullanılan sönmüş kirecin özellikleri	14
Tablo 3.5	Uçucu külün analiz raporu	18
Tablo 3.6	Zeolitin analiz raporu	20
Tablo 4.1	Bentonit kilinin kimyasal özellikleri	26
Tablo 4.2	Bentonit kilinin geoteknik özellikleri	27
Tablo 6.1	Kullanılan katkı oranları	35
Tablo 6.2	Karışımların özgül yoğunlukları	38
Tablo 6.3	LEONARDS (1962) Plastisite indisi sınıflaması	42
Tablo 6.4	Karışımların kıvam limitleri ve plastisite indisleri	43
Tablo 6.5	Hidrometre deney sonuçları	46
Tablo 6.6	Karışımların zemin sınıfları	48
Tablo 6.7	Karışımların optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlıkları	50
Tablo 6.8	Karışımların serbest basınç deneyi sonucu kayma dayanımları	53

ÖZET

YÜKSEK FIRIN CÜRUFU KATKISININ KİL ZEMİNLERİN STABİLİZASYONUNA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Tuğba BİLGE

**Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı**

(Yüksek Lisans Tezi / Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Arzu OKUCU)

Balıkesir, 2011

Bu yüksek lisans çalışmasının amacı killi zeminlerin katkı malzemeleriyle iyileştirilmesinin araştırılmasıdır. Çalışmanın amacı doğrultusunda katkı malzemesi olarak yüksek fırın cürufu, uçucu kül, kireç ve zeolit kullanılmıştır. Yüksek fırın cürufunun bentonit kilinde iyileştirme malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Bu çalışmada bentonit kiline %10 kireç, %5-10-15 oranlarında yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve zeolit ilave edilmiştir. Numuneler homojen olarak karıştırıldıktan sonra özgül yoğunluk, kıvam limitleri, hidrometre, kompaksiyon ve serbest basınç deneyi uygulanmıştır. Deneysel çalışmalar sonunda, CH sınıfı yüksek plastisiteli killi zeminlerde yüksek fırın cürufu, kireç, uçucu kül ve zeolitın stabilizasyonda alternatif çözüm olarak kullanılabileceği belirlenmiştir. Kürde bekletilen numunelerde en yüksek mukavemeti %100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit göstermiştir.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: Stabilizasyon, Bentonit, Yüksek Fırın Cürufu, Kireç, Uçucu Kül, Zeolit

ABSTRACT

A STUDY OF THE EFFECT OF BLAST FURNACE SLAG IN CLAY STABILIZATION

Tuğba BİLGE

**Balikesir University, Institute of Science, Department of
Civil Engineering**

(Master Thesis / Supervisor:Asistant Prof.Dr.Arzu OKUCU)

Balikesir, 2011

The aim of this thesis is to research improving of clayey soils with additive materials. Blast furnace slag, fly ash, lime and zeolite were used as additives in accordance with this aim. Availability of using blast furnace slag as an additive in bentonite has been researched. In this study bentonite clay is mixed with the ratio of %10 percent lime, %5-10-15 percent blast furnace slag, fly ash and zeolite. Atterberg limits, specific gravity, hydrometer, compaction experiments and unconfined compression test performed are applied on the homogenous samples. At the end of the experimental researches, it is determined that blast furnace slag, lime, fly ash and zeolite can be used as a solution at the stabilization of the CH class high plasticity clayey soils. %100 Clay + %15 YFC + %15 Zeolite is the highest resistant of the samples which have been stayed in a rest cure.

KEY WORDS: Stabilization, Bentonite, Blast Furnace Slag, Lime, Fly Ash, Zeolite.

1. GİRİŞ

Genel olarak bütün yapılar zemin üzerine, zemin içerisine, zeminden ya da bunların kombinasyonu olarak yapılmaktadır. Öte yandan; zeminlerin çoğu alanlarda, örneğin baraj ve karayolu dolgularında, tuğla ve kerpiç üretiminde malzeme olarak kullanılmaktadır. Zeminlere ait dayanım, geçirimsizlik, sıkışabilirlik ve benzeri özellikleri bilinmesi, bu yapıların ekonomik ömrü boyunca kullanılabilmesi bakımından çok önemlidir [1].

Zemin stabilizasyonu genel olarak zemini daha stabil hale getirmek için, zeminin olumsuz özelliklerini düzeltmek amacıyla yapılan işlemlerdir. Zeminin olumsuz özelliklerini gidermek amacıyla kireç, uçucu kül, çimento vb. katkı malzemeleri katarak yapılan iyileştirme kimyasal stabilizasyondur [2].

Yüksek fırın cürufu çelik üretiminden sonra çıkan bir atık malzemedir. Her üretilen 1 ton çelikten 300 kg cüruf oluşmaktadır. Yüksek fırın cürufunun aslında atık malzeme olarak adlandırılmasının ana sebeplerinden biri zemin güçlendirici olarak kullanılmasıdır. Yüksek fırın cürufu yapı olarak çimentoyla benzer özellik taşımaktadır, puzolanik bir malzemedir. Bu sebepten dolayı yüksek fırın cürufu iyileştirme katığı olarak kullanılabilir.

Son 200 yılda 50 tip doğal zeolit ve 200'den fazla sentetik zeolit tanımlanmıştır. Türkiye Ege Bölgesinde doğal zeolitlerin oluşumları bilinmektedir. Zengin doğal zeolit kaynakları olmasına rağmen zeolit, yaygın bir şekilde kullanılmamaktadır.

Uçucu kül, termik enerji santralleri içinde öğütülmüş kömürün yanmasıyla ortaya çıkan bir üründür. Dünyadaki uçucu kül üretimi yılda yaklaşık 450 milyon tondur ancak toplam uçucu kül miktarının sadece % 6'sı çimento ve beton karışımlarında puzolan olarak kullanılmaktadır. Türkiye'de kömür yakan 11 enerji

santrali bulunmaktadır. Ülkemizde yıllık uçucu kül üretimi yaklaşık 15 milyon ton civarındadır.

Stabilizasyonla, bentonit kilinin şişme özelliğinin azaltılması ve mukavemetinin arttırılması amaçlanmaktadır. Şişme özelliğinin azaltılması için katkı malzemesi olarak kireç kullanılmıştır. %100 Kil'e göre plastisite indisleri düşmüş ve işlenebilirlik artmıştır. Kirecin ayrıca bir özelliği de puzolan malzeme olan uçucu kül ve yüksek fırın cürufu ile reaksiyona girmesidir. Böylece kil içindeki boşluklar jelimsi kıvamdaki kimyasal bileşimlerle doldurulmuş olur. Karışımlara kompaksiyon, özgül yoğunluk, likit limit, plastik limit hidrometre ve serbest basınç deneyleri uygulanmıştır. Deneysel sonuçlara göre yüksek fırın cürufu ve zeolit katkılı karışımlarda 28. günün sonunda en yüksek mukavemet değeri bulunmuştur. Dayanımın 28. günde en yüksek değer almasının nedeni, yüksek fırın cürufu puzolan bir malzemedir ve puzolanik malzemeler geç mukavemet kazanır.

Bu yüksek lisans çalışmasında yüksek fırın cürufunun bentonit kiline etkileri, iyileştirme malzemesi olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır. Deney sonuçlarında da görüldüğü gibi yüksek fırın cürufu ve zeolit katkılı karışımlar 28 gün sonunda yüksek dayanımlar göstermiştir. En iyi sonuca %100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit karışımında ulaşılmıştır. Sonuç olarak yüksek fırın cürufu bir atık malzeme olarak zemin iyileştirmesinde kullanılabilirdiği saptanmıştır ve bu sayede Türkiye ekonomisine katkı sağlayabileceği görülmüştür.

2. STABİLİZASYON

“Bir alan altındaki zemin, düşünölen yapı, vb. için elverişsiz ise (yumuşak kil, gevşek kum, çakıl, vb.), çeşitli seçenekler vardır. Bunlar; elverişsiz zemini uzaklaştırıp, yerine uygun zemin koymak, derin temel yapmak veya mevcut zemini stabilizasyona tabi tutmaktır. Stabilizasyon (ıslah, iyileştirme, sağlamlaştırma, vb.); zeminin özelliklerinin, çeşitli yöntemlerle iyileştirilmesine verilen genel addır. Stabilizasyonda amaç, işin özelliğine göre; taşıma gücünü artırmak, beklenen oturmaları, deformasyonları azaltmak, geçirimsizliği azaltmak, vb. olabilir” [3].

Zemin iyileştirme yöntemlerinde temel amaç, mekanik araçlarla zeminin boşluk oranının azaltılması veya zemin boşluklarının çeşitli bileşimdeki karışımlarla doldurulması işlemidir. Zemin iyileştirme yöntemleri aşağıdaki amaçlarla yapılır:

- Zayıf zeminin taşıma kapasitesini artırmak,
- Toplam oturmayı azaltıp konsolidasyonu hızlandırmak,
- Dolgu ve şevlerin stabilitesini sağlamak,
- İstinat duvarlarını desteklemek,
- Zeminin potansiyel sıvılaşma riskini azaltmak.

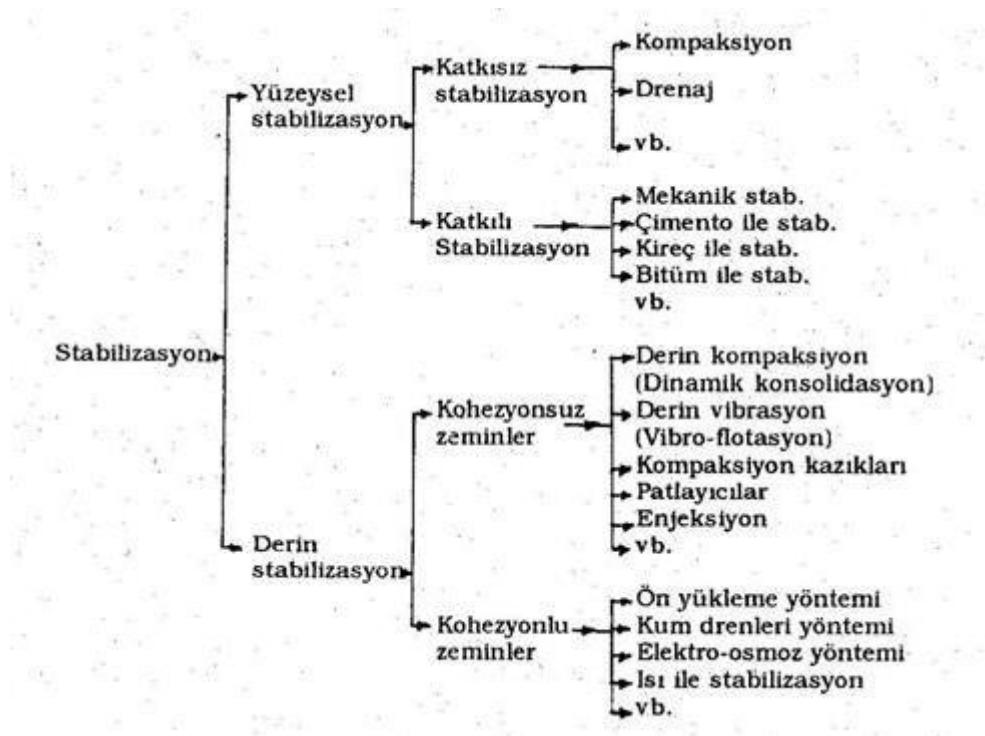
Zemin ıslah yöntemleri uygulandığında zeminin;

- Kayma mukavemeti artar.
- Kumlu zeminlerin sıkılığı, killi zeminlerin kıvamı iyileşir.
- Sıkışabilirliği azalır.
- Şişme ve büzölme potansiyeli düşer.
- Permeabilitesi azalır.
- Borulanmaya karşı mukavemeti artar.
- Sıvılaşma potansiyeli azalır.

Zemin iyileştirme yöntemleri başlıca üç ana grupta toplanabilir:

- Sadece inşaat aşamasında uygulanan geçici iyileştirme yöntemleri,
- Zemine herhangi bir malzeme karıştırmadan uygulanan kalıcı iyileştirme yöntemleri,
- Zemine çeşitli malzemeler karıştırarak uygulanan iyileştirme yöntemleri [4].

Şekil 2.1’de stabilizasyon yöntemleri verilmiştir.



Şekil 2.1 Stabilizasyon yöntemleri [3]

Stabilizasyonu gerektiren zemin özellikleri:

- **Hacimsel Stabilité:** Zeminin su içeriğindeki değişimleri hacimsel değişikliklere neden oluyorsa problem var demektir. Bu problemin giderilmesi için drenaj, katkı malzemeleri ile geçirimli tabaka inşası vb. gibi bazı iyileştirme yöntemleri uygulanabilir.

- **Mukavemet:** Organik madde içeren zeminlerde zeminin mukavemeti ile ilgili sorunlar yaşanabilir. Zeminin mukavemeti genel olarak kompaksiyonla arttırılır.
- **Permeabilite:** Zeminin permeabilite özelliklerinin değiştirilmesi için genellikle kompaksiyon, katkı malzemeleri ile iyileştirme vb. işlemleri kullanılabilir. Böylece zemin tanelerinin çimentolaşması sağlanabilir.
- **Sıkışabilirlik ve Konsolidasyon:** Zeminin sıkışabilirlik özelliğinin iyileştirilmesi için kompaksiyon işlemi uygulanabilir. Ancak aşırı konsalide olan zeminlerde konsolidasyon teknikleri kullanılabilir.
- **Durabilite:** Zeminin durabilite özelliği, yukarıdaki herhangi bir özelliğin olumsuz yönde değişimine karşı gösterdiği dirençtir [2].

Zeminin olumsuz yönlerini gidermek için zemine kireç, uçucu kül, çimento, bitüm vb. gibi katkı maddelerinin katılmasıyla kimyasal reaksiyon sonucu oluşan zemin iyileştirmesine kimyasal stabilizasyon denir. Mekanik stabilizasyon ise iki veya daha fazla zeminin uygun oranlarda karıştırılıp istenilen şartları sağlayan bir zemin haline dönüştürülmesi işlemidir. Böylece stabil bir zemin elde edilmiş olur [2].

3. ZEMİNLERİN KATKI MALZEMELERİ İLE İYİLEŞTİRİLMESİ VE KULLANILAN KATKI MALZEMELERİ

Zeminlerin katkı maddeleri ile iyileştirilmesi işleminde zeminlerin mekanik özelliklerinde çevre ve yükleme koşullarına göre gerekli değişikliklerin sağlanması güvenli, ucuz ve doğal bir malzeme gerçekleştirilmesi amaçlanmaktadır [5].

Problemlili bir zemin üzerine yapılan herhangi bir yapı değişik oturumlar gösterebilir, düşük kayma gerilmelerine ve yüksek sıkışabilirliklere sahip olabilir. Genelde, temel yapısının tipi zeminin karakteristik özelliklerine bağlı olarak değişir. Zayıf bir zemine yüksek bir bina yapılması söz konusu olduğu zaman, zeminin taşıma kapasitesinin artırılması gerekir. Bu tür durumlarda, zeminin taşıma kapasitesinin iyileştirilmesi zemin ıslahı yöntemleri ile sağlanabilir. Genel olarak, katkı malzemeleri ile karışım tekniği kullanılarak yapılan stabilizasyon, zemine kolay uyum sağlaması yönünden zemin durumunu iyileştirmek için büyük etkiye sahiptir. Katkı malzemesi olarak kireç, çimento, asfalt kullanılabildiği gibi bazı atık maddeler de kullanılabilir.

Stabilizasyon teknikleri ile zeminin hacimsel stabilitesi, mukavemeti, permeabilitesi (geçirgenlik), sıkışabilirliği, dayanıklılığı (durabilite) iyileştirilebilir.

Tablo 3.1’de zemin cinsine göre stabilizasyon metotları verilmiştir.

Tablo 3.1 Stabilizasyon metodları [2]

AMAÇ	ZEMİN CİNSİ	STABİLİZASYON METODU
Yük taşıma ve deformasyon direncini artırmak	İnce granüler	Asfalt, Çimento, Mekanik Karıştırma, Kompaksiyon
	Kaba granüler	Asfalt, Çimento, Mekanik Karıştırma, Kompaksiyon
	Düşük PI killer	Kompaksiyon, Çimento, Kireç
	Yüksek PI killer	Kireç
Don duyarlılığını azaltmak	İnce granüler	Çimento, Asfalt, Uçucu Kül
	Düşük PI killer	Çimento, Kireç
Su geçirimsizliği	Düşük PI killer	Çimento, Asfalt, Kireç
Kabarma – Büzülme Kontrolü (Hacim Stabilitesi)	Düşük PI killer	Çimento, Kompaksiyon, Kireç
	Yüksek PI killer	Kireç
	Yüksek PI killer	Kireç
	Elastik kil veya siltler	Çimento

Tablo 3.1’de de görüldüğü gibi değişik amaçlara göre stabilizasyon yöntemleri uygulanmaktadır. Önce zeminin olumsuz yönleri belirlenmeli ve daha sonra uygun stabilizasyon yöntemi seçilmelidir.

Tablo 3.2’de zemin cinsine göre tavsiye edilen stabilizasyon yöntemleri verilmiştir.

Tablo 3.2 Zemin cinsine göre tavsiye edilen stabilizasyon metodu [2]

Zemin Bileşigi	Tavsiye Edilen Stabilizasyon	Amaç
Organik Madde	Mekanik Stabilizasyon	Diğer metodlar etkisizdir
Kum	Mekanik Stabilizasyon Çimento Asfalt	- İnce ve plastik olmayan malzeme karıştırılarak stabiliteyi arttırmak - Mukavemeti arttırmak - Kohezyon sağlamak
Silt	Mekanik veya Kimyasal Stabilizasyon	Zemin özelliklerini iyileştirmek
Killer; - Alofenler - Kaolin - İllit - Montmorillenit	Kireç veya Kireç – Uçucu Kül Karışımı Kum ve Mekanik Stabilizasyon Çimento Kireç Çimento Kireç Kireç	- Mukavemeti arttırmak - Stabiliteyi arttırmak - Kısa süreli mukavemeti arttırmak - İşlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti arttırmak - Kısa süreli mukavemet artışı - İşlenebilirlik ve uzun süreli mukavemeti arttırmak - İşlenebilirliği ve kısa süreli mukavemeti arttırmak

Katkı maddeleri ile stabilizasyon ulaşım yapılarında öncelikle kullanılmıştır. Bunun yanında su yapılarında da uygulama giderek artmaktadır. Bir diğer ilginç uygulama hafif binaların temellerinin sertleştirilmesidir. Böylece yetersiz doğal zemin kolaylıkla kullanılabilir [6].

Zeminin olumsuz yönlerini gidermek için zemine kireç, uçucu kül, çimento, bitüm vb. gibi katkı maddelerinin katılmasıyla kimyasal reaksiyon sonucu oluşan zemin iyileştirmesine kimyasal stabilizasyon denir [2].

3.1 Yüksek Fırın Cürufu

YFC demir üretimi sırasında ortaya çıkan bir yan üründür. Ham demir üretiminde atık malzeme olarak elde edilen yüksek fırın cürufu, yüksek fırınlarda

daha hafif olmasından dolayı ham demirin üzerinde kalır. Demir filizi gangi, kok ve kireç taşının yanma sonrası atıkları YFC'nu meydana getirir. YFC yavaş soğutulduğunda kristal bir yapı kazanır. Bu haliyle bazalta benzer mekanik özelliklere sahiptir ve beton agregası olarak kullanılabilir. Öte yandan hızlı soğutma uygulaması sonucunda camsı yapıda cüruf elde edilir. Bu tür cüruflar granüle yüksek fırın cürufu olarak adlandırılırlar [7]. Cürufu çimentoların Portland çimentolarına benzer ve farklı özellikleri çeşitli araştırmalarla ortaya konmuştur [8]. YFC'nin hidrolik bağlayıcı özellik kazanabilmesi; cürufun kimyasal kompozisyonu, inceliği ve içerisindeki camsı yapı miktarına bağlıdır [7]. Cürufu betonun dayanımı, cüruf inceliğine, aktivite indeksine ve karışım içerisindeki cüruf/çimento oranına bağlıdır [9]. YFC ince öğütülmüş olarak beton içerisinde kullanıldığında, işlenebilirliği artırdığı, daha az su absorbe ettiği, terlemeyi azalttığı görülmüştür [10].

Demir-çelik üretimi sonucunda elde edilen YFC'da, diğer bir endüstriyel atık malzemedir. Türkiye'de demir-çelik üretimi esnasında elde edilen atık YFC miktarı ise, yaklaşık olarak 690.000 ton/yıldır [11].

Cüruf, Demir Çelik Fabrikalarında 1 ton çelik üretimi esnasında yaklaşık 300 kg olarak ortaya çıkan yan üründür ve ülkemizdeki kullanım alanları, oluşan cüruf tepciklerini eritecek boyutlarda değildir. Karayolu üst yapısında agrega olarak kullanılabilirliği üzerinde yapılan çalışmalar oldukça olumlu sonuçlar vermiştir [12].

Demir çelik ve bazı metallerin üretiminde olduğu gibi, elde edilmek istenen esas ürünün yanında, atılmak üzere bazı yan ürünler de ortaya çıkmaktadır. Yan ürün veya atık olarak elde edilen ve büyük miktarlara ulaşan bu malzemelerden kurtulabilmek, bunları depolamak veya atmak, çoğu kez büyük güçlükler yaratmakta, toplum ve çevre için yeni sorunların kaynağı olabilmektedir. Oysa atık olarak elde edilen bu ürünlerin malzeme özellikleri incelendiğinde bu malzemelerden bazılarının belirli miktarlarda da olsa inşaat endüstrisinde kullanılabileceği görülmektedir [13].

Yüksek fırından eriyik bir durumda, atık malzeme olarak dışarı alınan cüruf yaklaşık 1500 °C sıcaklıkta olduğundan, cürufun herhangi bir amaçla kullanımı, ancak soğutulmasından sonra mümkün olmaktadır [13].

Granüle yüksek fırın cüruflarının hidrolik bağlayıcılığı, ne kadar ince öğütülürse o kadar iyi olacağından, Portland çimentosundan daha ince olacak şekilde en az 400 m²/kg inceliğe kadar öğütülmelidir [14].

1862 yılında Emil Largens yüksek fırın cürufunun suyla granülasyonu sonucunda elde edilen malzemenin kireçle karıştırılmasıyla bağlayıcı özelliğe sahip olduğunu gözlemlemiştir [15].

1862 yılında Langens'in YFC'lerin bağlayıcı özelliklere sahip olduğu gözleminin ardından 1865 yılında ilk kez YFC-kireç karışımından elde edilen bağlayıcılar ticari olarak üreilmeye başlamıştır. YFC'nin çimento hammaddesi olarak kullanımı ise ilk kez 1883 yılındadır. Portland çimentosu klinkerini YFC ile birlikte öğüterek Portland Yüksek Fırın Cürufu çimentosunun üretimi de 1892 yılında Almanya'da başlamıştır [15].

Öğütülmüş YFC, uygulamada, aynen ince taneli doğal puzolanlar veya uçucu küller gibi kullanım alanı bulabilmektedir. Yani:

- Kalsiyum oksitle sulu ortamda birleştirilerek, hidrolik bağlayıcı madde olarak doğrudan kullanılabilen,
- Portland çimentosu klinkeri ve küçük miktarda alçıtaşı ile birlikte öğütülerek, cürüflü çimento üretiminde kullanılabilen,
- Beton katkı maddesi olarak kullanılabilir [16].

İnce taneli durumdaki YFC'nun kalsiyum hidroksitle ve suyla birleşmelerinden elde edilen hidrolik bağlayıcılık özelliği 1774 yılından bu yana bilinmektedir. Bu malzemeyle elde edilen bağlayıcılar 1889 yılında Paris metrosunun inşaatında kullanılmıştır. Ancak, günümüzde bu kullanım yok denecek kadar azdır [16].

YFC'lerin kendi başlarına suyla reaksiyonu, portland çimentolarının hidrasyonu ile karşılaştırıldığında daha yavaş gelişir. Cürufun hidrasyonu

cürufun su içinde kısmi olarak erimesiyle C-S-H, hidrate alüminatlar ve hidrate siliko alüminatların çökmesi olarak tanımlanabilir. Cürufun bu reaksiyonu hızlandırması için aktivatörler iki ana grupta toplanmıştır. Bunlardan biri alkalın aktivatörler (soda, kireç vb.), diğeri de sülfat aktivatörleridir (alçı, fosfojips vb.) [6].

Çimentoda puzolan olarak kullanılan yüksek fırın cürufu kimyasal yapısı incelendiğinde çimentoya benzerliği gözlenmiştir. Bu ilişki ile kil zeminler üzerinde de iyileştirici etkiler yapabileceği fikri oluşmuştur [17].

Yapılan çalışmalarda görülmüştür ki; cürufun elenerek belli bir boyutun altına inmesi ($< 150\mu\text{m}$) ve değişik oranlarda kireçle karıştırılması durumunda, bentonit kili ile reaksiyona girdiği açık olarak anlaşılmaktadır [17].

Çalışmada kullanılan yüksek fırın cürufu Ereğli Demir Çelik fabrikasından elde edilmiştir ve öğütülerek boyutu 150 mikronun altına indirilmiştir. Tablo 3.3'te yüksek fırın cürufunun analiz raporu verilmiştir.

Tablo 3.3 Erdemir yüksek fırın cürufu analiz raporu

Özellik	(%)
Çözünmeyen Kalıntı (%)	0.38
SiO ₂ (%)	37.38
Fe ₂ O ₃ (%)	0.93
Al ₂ O ₃ (%)	16.00
CaO (%)	37.22
MgO (%)	5.98
SO ₃ (%)	2.12
Kızdırma Kaybı (%)	5.38
Bilinmeyen (%)	0.32
Rutubet (%)	8.00
Özgül Yoğunluk	2.85
Blaine (cm ² /gr)	3480
Basınç Dayanımı (N/mm ²) (7 Gün)	10.7

3.2 Kireç

Kireç, kireç taşının çeşitli derecelerde (850-1450 °C) pişirilmesi sonucu elde edilen, suyla karıştırıldığında, tipine göre havada veya suda katılaşma özelliği gösteren, beyaz renkli, inorganik esaslı bağlayıcı madde türüdür. Kireçtaşları, tabii kireçtaşı ve dolomitik kireç taşı olmak üzere iki çeşittir [18].

Tabii kireç taşı, bileşiminde kütlece en az %90 oranında kalker (kalsiyum karbonat, CaCO_3) bulunduran tortul bir kayadır [18].

Dolomitik kireç taşı, bileşiminde kalsiyum karbonat (CaCO_3) yanında kütlece %10-%35 oranında magnezyum karbonat (MgCO_3) bulunduran tortul bir kayadır [18].

Kireç üretimine etki eden faktörler çeşitli olup başlıcaları şunlardır:

- Üretimde kullanılan kalker ve dolomitin saflık derecesi.
- Üretimde kullanılan yakıt çeşidi.
- Üretimde kullanılan kalker ve dolomitin boyutu.
- Üretimde kullanılan fırın çeşididir [19].

Kirecin:

- Birçok kimyasal prosesin (nötralizasyon, absorpsiyon, kostikleştirme gibi) ana girdisi olması,
- Kimyasallarla çabuk reaksiyona girerek istenmeyen maddeleri bünyeden uzaklaştırması,
- Pahalı kimyasalların geri kazanılmasındaki rolü,
- Organik canlılar için besi maddesi olması,

- Ucuzluğu ve kolay bulunması gibi nedenler, bu malzemenin yaygın biçimde kullanılmasında önemli rol oynamıştır [20].

Kireç ürünleri:

- Portland çimento ve beton yapımında hammadde elemanı,
- İnşaat harç ve sıvalarında bağlayıcı,
- Demir-çelik endüstrisinde safsızlaştırıcı,
- Gaz beton endüstrisinde bağlayıcı,
- Çevre denetiminde arıtma kimyasalı,
- Asitli toprakların rehabilitasyonunda pH dengeleyicisi,
- Çeşitli kimyasal maddelerin elde edilmesinde ara reaksiyon kimyasalı veya nihai ürün elemanı,
- Yol zemin inşaatlarında stabilizatör ve asfalt yapımında aşınmaya karşı katkı maddesi olarak pek çok alanlarda kullanılır [20].

Kireç bilinen en eski stabilizasyon malzemesidir. Kil içeren zeminlerin önemli bir bölümü % 3-8 arası sönmüş kireç eklenmesiyle iyileşmektedir. Kireç kil mineralindeki silisle reaksiyona girer. Oluşan jel kil danelerini çevreleyip boşlukları tıkar [19].

Kireç, yüksek plastisiteli ve kil içeriği yüksek olan kohezyonlu zeminler için iyi bir iyileştirme katıdır. Bunun nedeni, kil mineralleri ve kireç arasında meydana gelen reaksiyonlardır. Kendi kendine bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan ancak uygun rutubet şartlarında ve normal ortam sıcaklığında kireç ile reaksiyona girip bağlayıcı özelliği olan ürünler açığa çıkaran, ince toz halindeki silisli veya silisli ve alüminli maddelere puzolan denir. Kil, silisyum ve alüminyum kaynağı olduğundan puzolonik reaksiyon için iyi bir puzolandır [18].

Genel olarak, kireç stabilizasyonu zeminin mukavemetinin ve şekil değiştirme modülünün artmasını, kabarma potansiyelinin ve şişme basınçlarının azalmasını ve dayanıklılığının artmasını (çevre koşulları etkisi altında zeminin özelliklerinin bozulmasının daha sınırlı kalmasını) sağlamaktadır. Ayrıca,

plastisitenin azalmasına yol açtığı için arazi çalışma koşullarının iyileşmesi sonucunu doğurmaktadır [21]. Kireç stabilizasyonu ile yapılan uygulamada killi malzemenin kimyasal yapısı bozulmakta ve malzeme tekrar eski haline gelememektedir [22].

Kireç stabilizasyonu uygulamasının kış aylarında da (yağmurlu ve malzemenin optimum su muhtevasının yüksek olduğu durumlarda) yapılabilmesi büyük avantaj sağlamaktadır. Kireç ile iyileştirme uygulaması ile klasik yöntemle göre %40'lara varan ekonomi sağlanabilmektedir [22].

Kireç stabilizasyonu uygulaması için gerekli kireç miktarı zemindeki malzemenin kil oranına göre değişmekle beraber 1 ton malzemenin kireç ile iyileştirilmesi için yaklaşık 18-30 kg kireç yeterli olmaktadır [22].

Çalışma kapsamında, TS EN 459–1 standardına uygun sönmüş kireç kullanılmıştır [55]. Tablo 3.4'te kullanılan kirecin özellikleri verilmiştir.

Tablo 3.4 Çalışma kapsamında kullanılan sönmüş kirecin özellikleri [18]

Özellik	(%)
CO ₂	≤ 7 %
CaO + MgO	≥ 80 %
SO ₃	≤ 2 %
MgO	≤ 10 %
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ +SO ₃	≤ 5 %
Özgül Yoğunluk	2.30

3.3 Uçucu Kül

Uçucu kül terimi 1930'lu yıllarda elektrik enerjisi kullanan sanayinin gelişmesi ile yaygınlaşmaya başlamıştır. Uçucu külün kullanılması ile ilk kapsamlı bilgi 1937'de Kuzey Amerika'da bulunmaktadır. 1970'li yıllarda enerji

maliyetindeki hızlı artışa paralel olarak çimentonun da önemli derecede pahalalanmasıyla uçucu kül tüm dünya genelinde kabul görmeye başlamıştır [23].

Endüstriyel atıkların inşaat sektöründe değerlendirilmesi ile ilgili çalışmalar yoğun bir şekilde devam etmektedir. Bu atıklar, puzolan olmaları nedeniyle hem çimento hem de beton üretiminde katkı ve ikame malzemesi olarak kullanılmaktadır. Bilindiği gibi Türkiye, elektrik enerjisinin yarıya yakını termik santrallerde üretmektedir. Bu üretim sırasında termik santrallerin bacalarından elde edilen atık UK miktarı, 13,5 milyon ton/yıl dolayındadır [24].

ASTM C 618'e göre kendi kendine bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan ancak uygun rutubet şartlarında ve normal ortam sıcaklığında kireç ile reaksiyona girip bağlayıcı özelliği olan ürünler açığa çıkaran, ince toz halindeki silisli veya silisli ve alüminli maddelere puzolan denir.

Termik santrallerde elektrik enerjisi üretmek amacıyla yakıt olarak kullanılan öğütülmüş kömür, yanma sonucu atık olarak farklı tiplerde kül ve cüruf ortaya çıkarmaktadır. Uçucu küllerin yanı sıra, taban külü olarak adlandırılan, gazlarla birlikte yükselemeyen ve yanma sonucu fırın tabanında biriken küllerle birlikte bir miktar da cüruf oluşabilmektedir. Ortaya çıkan atık malzemenin yaklaşık %75-80'ini uçucu küller oluşturmaktadır [25].

Uçucu küllerin kimyasal özellikleri kullanılan kömürün mineral tipi ve miktarına bağlıdır. Genellikle uçucu küllerin %85'ini SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO ve MgO oluşturmaktadır [26].

Uçucu küller kimyasal özelliklerine göre değişik şekillerde sınıflandırılmaktadır.

- Kireç ve SO_3 Miktarına Göre Sınıflandırma: Genellikle taş kömüründen elde edilen uçucu küllere silikoalüminöz uçucu küller, linyit kömüründen elde edilen ve diğerlerine göre SO_3 ve CaO oranı yüksek olan uçucu küllere sülfokalsik uçucu

küller ve linyit kömüründen elde edilen, kireç ve silika miktarı yüksek uçucu küllere silikoklasik uçucu küller denilir.

- **CaO Miktarına Göre Sınıflandırma:** Bu sınıflandırma uçucu külün içindeki CaO miktarına bağlıdır. Buna göre CaO miktarı %10'un altında olanlar düşük kireçli, %10'un üstünde olanlar yüksek kireçli uçucu küller olarak adlandırılır.

- **ASTM C 618 Sınıflandırması:** Bu sınıflandırmaya göre uçucu küller ikiye ayrılıyor. F sınıfı uçucu küller bitümlü kömürlerden elde edilip $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > \%70$ şartını sağlayan uçucu küller, C sınıfı uçucu küller genelde linyitler veya yarı bitümlü kömürlerden elde edilip $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3 > \%50$ şartını sağlayan uçucu küllerdir.

- **ENV 197-1 Sınıflandırması:** Bu sınıflandırmaya göre uçucu küller, silisli uçucu küller ve kalkerli uçucu küller olarak ikiye ayrılır [26].

Uçucu küllerin renkleri açık krem renginden koyu kahverengiye kadar değişiklik gösterir. Renk yanmamış kömür oranından, demirce zengin danelerden ve nemden etkilenir [27]. Linyit uçucu külü taşkömürü uçucu külünden daha koyu renktedir. İyi yanmış bir uçucu kül, iyi yanmamış bir uçucu külden daha açık bir renge sahiptir. İyi yanmamış küle koyu rengi veren yanmamış karbon danecikleridir. Uçucu küller çok ince daneli, dokunulduğunda yumuşak bir malzemedir. Mikroskopta incelendiklerinde süngerimsi boşluklu ve boşluksuz küresel daneciklerden meydana geldiği görülür [28]. Çalışmada kullanılan uçucu kül koyu kahverengindedir.

TSE 1968'de uçucu külün çimento ve betonda katkı maddesi olarak kullanılmasına ilişkin standart yayınlamıştır [29].

Uçucu kül, çimentoya göre çok ucuzdur. Uçucu küller çok değişik ve faydalı alanlarda kullanılmakla beraber en çok kullanılan alan beton içerisine çimentonun yerine kullanılmasıdır. Bu sayede hem tasarruf sağlanmakta hem de betonun bazı fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikleri iyileştirilmektedir [30].

Uçucu küller çoğunlukla kendi başlarına bağlayıcı özelliği olmayan ancak sulu ortamda kireçle birleştirildiklerinde bağlayıcılık özelliği kazanan puzolanik malzemelerdir. Kireç ve su ile karıştırıldıktan sonra artan süre ile birlikte uçucu küllerin puzolanik özellikleri artmaktadır. Ayrıca CaO miktarı yüksek uçucu küller daha iyi puzolanik özellik göstermektedir [31].

ASTM C618, puzolanların kimyasal bileşiminde $[(SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3) \geq 0.70]$ olmasını öngörmektedir. Büyük oranda amorf olan bu oksitlerin toplam miktarına bir alt sınır getirilmesindeki düşünce normal sıcaklıkta $(Ca(OH)_2)$ ile kolayca kimyasal tepkimeye girerek bağlayıcı bir yapı oluşturabilmeleridir.

Uçucu küller kireç ve su ile karıştırıldığında belirli bir süre sonunda sertleşme ve dayanım kazanır. Uçucu küllerde puzolanik özelliğin esas olan bu dayanım kazanma özelliği oldukça yavaş olarak ortaya çıkar. Artan süreyle birlikte uçucu küllerin dayanımı artar [25]. Kireç ve su ile karıştırıldıktan sonra artan süre ile birlikte uçucu küllerin puzolanik özellikleri artmaktadır. Puzolanik özelliği etkileyen faktörler şöyle sıralanabilir:

- Uçucu kül içerisindeki SiO_2 ve Al_2O_3 miktarının artması ve bu bileşiklerin amorf yapıda olması puzolanik etkiyi artırır.
- Kül içinde bulunan CaO, SO_3 ve alkali oksitlerin, puzolanik özelliği ne şekilde etkilediği tam olarak bilinmemektedir.
- Külde yanmamış karbon miktarının artması puzolanik özelliğin azalmasına neden olur. Uçucu küldeki karbon boşluklu bir yapıya sahiptir. Dayanımı düşüktür ve karışım su ihtiyacını artırır.
- Uçucu küllerin puzolanik özelliği ve mekanik dayanım incelikle birlikte artmaktadır [25].

Uçucu kül ile stabilizasyonda zeminin karışımından sonra 2 saatlik süre uçucu külün zemin suyu ile reaksiyona girip çimentolaşmanın başlaması için yeterli bir süredir. Kompaksiyon aşamasının gecikmesi halinde, uçucu kül ile karıştırılan zeminin mukavemeti beklenen değerden daha düşük olabilir. Laboratuvar

deneylerinden elde edilen sonuçlar arazi deneylerinde de dikkate alınmalıdır. Şişen zeminlerde uçucu kül ilavesi şişmeyi ve özgül ağırlığı azaltabilir [6].

Çalışmada kullanılan uçucu kül Gürler Beton'dan alınmıştır. Gürler Beton da Kütahya Çimento A.Ş.'den temin etmektedir. Kullanılan uçucu kül Seyitömer termik santralinde üretilmiştir. Seyitömer uçucu külünün düşük kireçli ($\text{CaO} < \%10$), silikoaluminöz bir uçucu kül (ENV 197-1'e göre V sınıfı) olduğu görülmektedir. Ayrıca linyit kömürünün yakılmasıyla elde edildiğinden, ASTM C-618 C sınıfı uçucu küldür. Firmanın 31.10.2010 tarihinde Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği onaylı kalite kontrol bağımsız deney laboratuvarı sonucu Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5 Uçucu külün analiz raporu

Özellik	(%)	TS EN 450 Limit Değer
% Kızdırma Kaybı	2.26	En fazla 5.0
% Cl	0.008	En fazla 0.1
% SO_3	0.98	En fazla 3.0
SiO_2	53.14	-
Al_2O_3	20.77	-
Fe_2O_3	11.36	-
CaO	4.44	-
MgO	1.19	-
K_2O	1.56	-
Na_2O	0.75	-
% Serbest CaO	1.01	En fazla 2.5
% Reaktif CaO	4.29	En fazla 10.0
Özgül Yoğunluk	2.225	-
%45 μm Elek Bakiyesi	27.25	En fazla 40.0
%28 Günlük Aktivite Endeksi	89.90	Minimum 75.0
%90 Günlük Aktivite Endeksi	94.50	Minimum 85.0

3.4 Zeolit

1756 yılında Cronstedt tarafından, ısıtıldığında yapılarında bulunan suyu çıkartırken köpürmesinden dolayı “kaynayan taş” olarak isimlendirilen zeolitler, alkali ve toprak alkali metallerin bünyesinde su içeren alüminosilikatları olarak tanımlanmaktadır. Zeolitler, düşük ağırlıklı, yüksek gözenekli, homojen sıkı ve sağlam yapıdadırlar. Sahip olduğu, puzolanik reaktivite, iyon değişikliği yapabilme, absorpsiyon özellikleri nedeniyle inşaat sektörü de dahil olmak üzere pek çok endüstriyel alanda tercih edilmektedir [32].

Zeolitler, geniş uygulama alanları için spesifik kullanımı sağlayan, karakteristik yapısal özelliklere sahiptir. Bu özellikler kabaca şöyledir:

- Yüksek hidrotasyon enerjisi,
- Hidrate oldukları zaman sahip oldukları düşük yoğunluk ve boşluk hacmi,
- Katyon değişimi özellikleri,
- Dehidrate olmuş kristaller içerisindeki düzgün moleküler boyutlu kanal sistemlerine sahip olması,
- Elektriksel iletkenlik,
- Gaz ve su buharı absorpsiyonu, ve
- Katalitik davranışlar [32].

Türkiye’de tespit edilen başlıca zeolit yatakları Balıkesir-Bigadiç, Kütahya, Gördes, İzmir-Urla, Kapadokya’dır. Bu tespit edilen yataklardan sadece Balıkesir-Bigadiç yöresindeki sahada yapılan çalışmalar sonucunda kolaylıkla işlenebilir nitelikte ve yaklaşık 500 milyon tonluk bir potansiyeli olduğu saptanmıştır.

Doğal zeolitlerin mineral olarak tanınmaları 1976 yılına rastlamaktadır [33]. 1970’den günümüze kadar çok sayıda zeolit türü incelenmiştir. Endüstriyel ve ticari olarak zeolitinin çeşitli uygulama alanları üzerinde araştırmalar yapılmaktadır [19].

Türkiye her ne kadar özellikle Batı Anadolu Bölgesi'nde zengin zeolit yataklarının sahip ise de zeolitın endüstriyel kullanımı henüz tam olarak geliştirilememiştir. Son yıllarda Türkiye'de zeolit kullanımı daha çok atık suların sertliğinin giderilmesi ve zirai amaçlar üzerine yoğunlaşmıştır [34].

Bu çalışmada kullanılan zeolit, Balıkesir Eti Maden İşletmeleri Bigadiç'ten temin edilmiştir. Çalışmalarda zeolit olarak tane boyutu 200 nolu elek altında kalan malzemeler kullanılmıştır. İnceltme işlemi Ege Zeolit tarafından yapılmıştır. Görünüşü fildişi renginde ve kokusuzdur. Tablo 3.6'da zeolitın analiz raporu verilmiştir.

Tablo 3.6 Zeolitın analiz raporu

Özellik	(%)
% SiO ₂	66.72
% Al ₂ O ₃	11.26
% Fe ₂ O ₃	1.04
% CaO	2.70
% MgO	0.78
% SO ₃	0
% K ₂ O	3.99
% Na ₂ O	0.32
% Kızdırma Kaybı	11.40
% Çözünmeyen Kalıntı	50.32
Total	98.21
Özgül Yoğunluk	2.30

4. KİL ZEMİNLER

Bilimsel tanımla kıl, hidratlı alüminyum ve magnezyum silikatlardan oluşan doğal bir ikincil mineraldir. Tane boyutu 2 mikron veya daha küçüktür ve aynı boyuttaki başka minerallerden farklı olarak su ile karıştırıldığında çamur oluşturur. Islakken hamur halinde şekil verilebilecek kadar plastisiteye sahipken, pişirildiğinde büyük dayanım artışları gösteren bir katıya dönüşür. Isıtıldığında genellikle hacim artışı gösterir. Kurtulduğunda ise hacmi azalır ve çoğun çatlar [35].

Kil mineralleri çoğunlukla yer kabuğunun üst kesiminde hidrosferle feldispatların reaksiyonu ile oluşur. Genellikle 500 °C'nin üzerinde oluşmuş kayalarda nadirdirler (metamorfik ve magmatik) [36].

Kil mineralleri bazı kaya yapıcı minerallerin kimyasal bozuşmaları sonucunda oluşan çok küçük, kristalsi maddelerdir. Tüm kil mineralleri çok küçük boyda olup sadece elektron mikroskobu ile görülebilirler. Münferit kristaller küçük katmanlardan oluşmaktadır. Aslında, tetrahedral veya silika ile oktahedral veya alümina olmak üzere sadece iki çeşit kristal levhası bulunmaktadır. Bu levhaların değişik bağlarla ve farklı metalik iyonlarla birbirine bağlanmasıyla değişik kil mineralleri oluşmaktadır [37].

Killerin fiziksel özellikleri:

- $d < 0.002$ mm boyutunda tanelerden oluşurlar (TS 1500)
- Su muhtevası killerin zamana bağlı oturma göstermesine neden olur.
- Permeabilite değeri çok küçüktür.
- Killerin ergime noktası 1150 °C~1785 °C sınırları arasındadır.
- Kilin kendine has kokusu vardır. Doğada değişik renklerde (sarı, kırmızı, yeşil vb.) bulunmaktadır.
- Dona karşı dayanıklıdır.

- Kapileritesi yüksek basınçlıdır. Permeabilitesi (su geçirgenliği) az olduğu için yüzeydeki buz merceğinin beslenmesi güçtür [38].

4.1 Bentonit Kili

Bentonit ilk kez sabun kili olarak 1873'de William Taylor tarafından tanıtılmış, Rock Creek sahasındaki Ford Benton formasyonunun bulunmasıyla *bentonit* adını almıştır. 1874'te aynı özelliğe sahip kil minerali Fransa'nın Montmorillian bölgesinde bulunduğundan bu kil mineraline Montmorillonit adı verilmiştir. Suda hacimli ve jelimsi bir kütle vererek şişmesi ile ayrılan bu yeni kil daha sonra W.C. Knight tarafından ayrıntılı olarak incelenmiştir. Uygulama alanları hızla arttığından buna paralel olarak da üretimi artmıştır [39].

Bentonit doğal haliyle yumuşak, suda hemen dağılan, el ile temas ettiğinde yağlı bir izlenim veren özelliktedir. Partiküllerin çok ince ve temas yüzeyinin büyük olması nedeni ile oldukça yüksek su alma gücüne sahiptir. Yağ ve gliserini kolaylıkla emer [40].

Diğer kil çeşitleri gibi bentonitin de oluşumu ile ilgili çeşitli görüşler ortaya atılmıştır. Kesinlikle bir tanım yapılmamasına karşılık çok kişinin benimsediği bir yol olarak feldispat, serpantin veya püskürük maddelerin su ve havanın etkisi ile değişimi sonucu bentonitin meydana geldiği ileri sürülmektedir. Oluşumunda olduğu gibi bentoniti tanımlamada da birçok görüş ayrılıkları bulunmaktadır. Ross ve Shannon içinde % 75 veya daha fazla kristal, kil minerali montmorillonit veya beidellit bulduran bütün kayaların bentonit adı altında incelenmesi gerektiği görüşünü savunmaktadırlar [41].

Montmorillonit (Mg, Ca) $Al_2O_3 \cdot 5 SiO_2 \cdot 8H_2O$ formülü ile gösterilen bir kil mineralidir. Bentonitin iyi bir sondaj çamuru yapımında kullanılması için seçilmesini sağlayan özelliklerini, montmorillonit kil minerali vermektedir [42].

4.1.1 Bentonitin Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Bentonitin şişme özelliği: Bentonitin kendi hacim ve ağırlığının birçok katı kadar suyu emmesidir. Kendi hacimlerinin 10 veya 30 katı kadar şişen bentonitlerin kazandığı plastik şekil bentonitin sondaj çamurunda kullanılma nedenidir. Suyun silikat düzlemleri arasındaki bentonit kütlesine nüfuz etmesi ile genişleyen hacim şişmeyi sağlar.

Tiksotropi: Tiksotropi çamurun dinlenmeye bırakıldığı zaman sirkülasyona veya karıştırılmaya başlandığı zaman akışkan haline geçebilme özelliğidir. Sıcaklığın artması ve pH değerlerinin yükselmesi jelleşmeyi çabuklaştırır.

Viskozite: Viskozite bir akışkanın akmaya karşı gösterdiği dirençtir. Bentonitin şişmesi, çamurun viskozitesini de yükseltir. Sıcaklığın artışı çamurun görünür viskozitesinde önce bir azalma, arkasından da bir yükselme gösterir. Çok yüksek sıcaklıklar bentonitin kolloidal özelliklerinin tamamen kaybolmasına sebep olmuştur. Yapılan deneylere göre çamurun akışkanlığı alçak basınçlarda azalmış, fazla yüksek olmayan basınçlarda başlangıç viskozitesinin çok üstündeki bir noktaya erişmiş ve yüksek basınçlarda da tekrar düşmüştür [43].

Çamur Pastası Yapabilme Özelliği: Sondaj çamurunun en önemli özelliklerinden biri de kuyunun duvarlarına ince ve geçirgen olmayan bir film (pasta) çökerterek su kaçağını önlemek, böylece killi formasyonların şişmesini engellemek ve çöküntüye mani olmaktır [42].

4.1.2 Bentonitin Tanınması

Şişme Kapasitesi: En kolay ve çabuk bilgi toz haline getirilmiş bentonitin su içinde çabucak şişip akışkanlığı az bir sıvının meydana gelmesi sonunda alınır. Diğer killer suyun dibine çöküp askıda kalmamakla ayırt edilirler. Enslin cihazı bu özelliği hassas bir şekilde değerlendirmekte kullanılır.

Diferansiyel Termik Analiz: Bilinmeyen kil örneği ısıtılmaya bırakıldığında içinde bulunan kil minerallerine göre değişik eğriler verir. Bu eğriler önceden bilinen anahtar eğrilerle karşılaştırılarak kil mineralinin yüzde olarak oranı bulunur.

Benzidin: Eğer benzidin - su eriyiğinden bir kaç damla $FeCl_3$ ile birlikte kil üzerine damlatılırsa bentonitin ana minerali montmorillonit koyu mavi bir renk verir.

X-Işınları: Günümüzde en etkili metot olarak bilinen X-ışınları kil minerallerinin kristal yapısındaki değişimleri gösterir. Bu yolla bentonitin tanınması sağlanmış olur [42].

Çok boyutlu ve değişik özelliklerinden dolayı, bentonitler çok geniş bir alanda kullanılmaktadır [40]:

- Seramik sanayinde,
- Döküm sanayinde,
- Sondaj işlemlerinde,
- Kağıt endüstrisinde,
- Boya endüstrisinde,
- Yağların renklerinin giderilmesinde,
- İlaç sanayinde,
- Gübre yapımında,
- Kataliz (Bir maddenin kimyasal bir tepkimede hiçbir değişmeye uğramadan tepkimenin olmasını veya hızının değişmesini sağlayan etkisi) olarak,
- Yangın söndürücülerde,
- Portland çimentosu yapımında.

Bentonit malzemesi inşaat mühendisliğinde çok su absorbe etmesi ve su geçirmeyen bir jel oluşturması özelliklerinden yararlanır. Bentonit malzemesi inşaat mühendisliğinde [40]:

- Zemin enjeksiyonlarında,
- Diyafram duvarlarda,

- Sondajlarda,
- Düzenli depolama tesislerinin şilte tabakasında,
- Baraj inşaatlarında kullanılmaktadır.

Şişme ve jel oluşturma özellikleri nedeniyle bentonitten, baraj yapılırken su kaçaklarını önlemede yararlanır [40].

Geçirgenlik, sodyum bentonitte oldukça düşüktür. Çok az miktarda sodyum bentonit ilave edilen kumların geçirgenliği büyük ölçüde azalır. Kalsiyum bentonitin ise geçirgenlik üzerinde etkisi daha azdır. Bentonitin geçirgenliği önleme özelliklerinden yararlanılarak baraj ve gölet inşaatlarında, heyelan önleme yapılarının inşaatında, sızdırmazlık perdesi inşaatında, tünellerin yapımında, kazı şevleri ile bina temellerinin desteklenmesinde ve köprü, üst geçit ayaklarının inşaatında, diyafram duvarları oluşturmada kullanılmaktadır. Diyafram duvarları, bentonit bulamaçlı duvarlardır [44].

Zemin iyileştirme, ağır yüke ve iklim koşullarına dayanıklılık kazandırmak için toprak taneciklerinin tutturulmasıdır. Bunun için bentonit gibi şişen killere kireç ilave edilerek plastiklik indeksleri düşürülür. Zemin iyileştirme konusunda bentonitlere % 8 veya daha çok kireç karıştırmak gerekmektedir [40].

Sıkıştırılabilirlik ve pekleşme, yatay sınırlı bir örneğe uygulanan birim ağırlığın artması sonucu örneğin boşluk oranının azalmasına dayanır. Likit limite eşit nem oranındaki sodyum bentonit önce küçük bir basınç karşısında büyük bir hacim küçülmesi gösterir, daha sonraki basınç artışları karşısında ise daha küçük hacim küçülmeleri gösterir. Kalsiyum bentonitte sıkışma miktarı küçük olsa da uygulanan düşük basınçlar altında hacim küçülmesi oldukça fazladır. Bentonitlerde artan ağırlıklar altında pekleşme önce biraz azalır fakat kısa süre sonra ağırlık artışı pekleşme oranını fazla etkilemez [40].

Donma dayanımı, donma kuşağının içinde suyun hareketiyle sağlanır. Bentonitlerin geçirgenliği çok az olduğundan donma dayanımları diğer killerden düşüktür [40].

Plastiklik, plastik indekslerinin yüksek oluşu nedeniyle bentonitlerin sodyumlu olanlarında sıkıştırılma, yırtılma dayanımı gibi konularda sorun yaratır. Ortamdaki değişmeler bu bentonitlerin çeşitli katyonlar soğurmasına yol açarsa özelliklerinin de değişmesine neden olur [40].

Serbest sıkıştırılma gücü, doğal bir örneğin kopmasına yetecek sıkıştırılma gücüdür. Bu değer sodyum bentonitler için 55.5 psi, kalsiyum bentonitler için 100.3 psi olarak belirlenmiştir [40].

Çalışmada kullanılan bentonit kili İzmir yolu üzerindeki Süd-Chemie (Tr) Madencilik San. ve Tic. A.Ş. tarafından temin edilmiştir. Bentonit kilinin kimyasal özellikleri Tablo 4.1’de, geoteknik özellikleri Tablo 4.2’de verilmiştir.

Tablo 4.1 Bentonit kilinin kimyasal özellikleri

Özellik	(%)
Al ₂ O ₃	20
Fe ₂ O ₃	1.4
CaO	1.9
MgO	4.5
Na ₂ O	3.2
K ₂ O	0.55
TiO ₂	0.12
SiO ₂	59.5

Tablo 4.2 Bentonit kilinin geoteknik özellikleri

Geoteknik Özellikleri	Deney Sonuçları
Kum (%)	-
Silt (%)	48.481
Kil (%)	51.519
Likit Limit (LL) (%)	113.18
Plastik Limit (PL) (%)	44.1
Plastisite İndisi (Ip) (%)	69.08
Özgül Yoğunluk (Gs)	2.82
Zemin Sınıfı TS 1500	CH
Optimum Su Muhtevası (w_{opt}) (%)	49
Maksimum Kuru Birim Hacim Ağırlık (γ_{kmaks}) (kN/m^3)	10.9
Serbest Basınç Deneyi Kayma Dayanımı q_u (Günlük) (kPa)	61.09
Serbest Basınç Deneyi Kayma Dayanımı q_u (7 Gün Kürlü) (kPa)	527.91
Serbest Basınç Deneyi Kayma Dayanımı q_u (28 Gün Kürlü) (kPa)	594.50

5. KONU İLE İLGİLİ YAPILMIŞ ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada killi bir zemine yüksek frun cürufu, uçucu kül, zeolit ve kireç karışımları ilave edilerek bentonit kilinden oluşan zeminin özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu bölümde daha önceden yapılmış olan çalışmalar konu hakkında ön bilgi almak amacıyla özetlenmeye çalışılmıştır.

Türkiye’de ilk defa uçucu küllerin DSİ Genel Mdrlg bünyesinde Gökçekaya ve Porsuk baraj inşaatında katkı maddesi olarak kullanılması için çalışmalar yapılmış uçucu kül maliyetinin imento maliyetinden çok az olduğu düşünülerek uçucu kül kullanılmasının tasarruf sağlayacağı sonucuna varılmıştır [45].

Uçucu külün yol zemini stabilizasyon malzemesi olarak kullanılabilirliği, çeşitli araştırmacılar tarafından araştırılmıştır [46-47]. Genellikle karayolları inşaatlarında, büyük dolgu inşaatlarında uçucu küllerin değerlendirilmesi konusunda çalışmalar yapılmıştır.

1970’de düşük kaliteli agregaların ıslahı için uçucu kül – imento karışımlarının kullanıldığı bilinmektedir. Kütahya– Tavşanlı yolunun 700m’lik bir kesiminde de uçucu kül – imento karışımları başarıyla kullanılmıştır. Atanur [48] tarafından yapılan çalışmalarda İzmir-Turgutlu Nif dere ocağı malzemesi, Kütahya-amlık malzemesi, Soma-Bergama dere ocağı malzemesi ve Bursa-Dede ocağı malzemesinin, stabilizasyonunda uçucu kül kullanılması ve yol yapımında kullanımı sağlanmıştır.

Wasti [49] uçucu küllerin toprak dolgu malzemesi yerine ve yüksek plastisiteli killerin iyileştirilmesinde kullanılabilereği sonucuna varmıştır. Alataş [50] tarafından Afşin-Elbistan uçucu külünün diğer esas bağlayıcılarla birlikte yol stabilizasyonunda kullanılabilereği belirtilmiştir.

Wasti [51] bir başka çalışmasında, C ve F tipi uçucu küllerin maksimum kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su içeriği değerlerini araştırmış, uçucu küllerin yapay dolguların yapımında kullanılabileceğini belirtmiştir.

Günel [52] çalışmasında killi zemine %20 oranında Seyitömer uçucu külü ilave ederek kompaksiyon özelliklerini incelemiş, optimum su içeriğinin arttığı, kuru birim hacim ağırlığının azaldığı gözlenmiştir.

Türker [50] şişen zeminlerin C ve T tipi uçucu küller ve kum ile stabilizasyonunu araştırmış, uçucu külün şişme yüzdesi ve basıncını azalttığını tespit etmiştir.

Değirmenci ve arkadaşlarının [53] yaptığı çalışmada, yüksek plastisiteli killi zeminlere uçucu kül, çimento ve fosfoalçı ilave edilmiş, karışımların plastisite indislerinin azaldığı gözlenmiştir. Fosfoalçı katkısı kuru birim ağırlıklarını arttırırken, uçucu kül katkısı azaltmıştır. Karışımların optimum su içerikleri genelde azalmıştır. En fazla serbest basınç dayanımı değerleri çimento katkılı karışımlarda elde edilmiştir.

Bir başka benzer çalışmalarda ise çimento ve fosfoalçı ayrı ayrı ve belirli oranlarda karıştırılarak zemin stabilizasyonunda kullanılmış ve fosfoalçının çimento ile belirli oranlarda karıştırılarak kullanılmasının çimentonun tek başına kullanılması ile aynı etkiyi yaptığı gözlenmiştir [54]. Fosfoalçı katkısının katkı maddesi miktarına bağlı olarak numunelerin birim hacim ağırlıklarında artış, su içeriklerinde ve plastisite indislerinde azalma meydana getirdiği görülmüştür. Bu sonuçlara göre fosfojipsin killi zeminlerin stabilizasyonunda katkı maddesi olarak kullanılabileceği belirtilmiştir [55,56].

İnan ve arkadaşlarının [57] yaptığı çalışmada ise yüksek plastisiteli killi bir zeminin Yatağan ve Soma Termik Santralleri'nden elde edilen iki farklı uçucu kül ile iyileştirilmesi düşünülmüş, uçucu kül tipinden bağımsız olarak, uçucu kül içeriği arttıkça, zeminin kuru birim hacim ağırlık değerleri azaldığı görülmüştür. Bu azalmanın yüksek kül içeriklerinde daha belirgin olduğu görülmüştür. Uçucu kül

ilavesi, zeminin serbest basınç değerlerinde artışa sebep olmuştur. 28. günden sonra, serbest basınç dayanımlarında hissedilir bir artış gözlemlenmemiştir. Kireç içeriği daha fazla olan uçucu kül, düşük kireç içerikli uçucu küle göre dayanımlarda daha büyük artışlara sebep olmuştur. Artan kül içeriği ve külün kireç içeriğine bağlı olan bu artışlar, puzolanik reaksiyon, uçucu külün boşlukları doldurma etkisi ve uçucu külün serbest kireç içeriğinin etkisi ile açıklanmıştır.

Bir diğer çalışmaya göre, killi bir zemine %3 civarında C tipi uçucu kül ilavesi ile mukavemet değerinin, örselenmemiş numuneye göre yaklaşık %35 civarında arttığı görülmüştür. Bu artış yeniden hazırlanmış numunelerde daha da yüksek (~%60) elde edilmiştir. 7 günlük ve 30 günlük numunelerde ise %5 uçucu kül ilavesinin, en büyük mukavemet artışına sebep olduğu belirlenmiştir. Uçucu kül ilavesi ile kıvam indisleri değişmezken maksimum kuru birim hacim ağırlıklarında azalmalar görülmüştür. Uçucu külün düşük özgül ağırlığı nedeniyle killi numunelerde maksimum kuru birim hacim ağırlığı bir miktar düşmüştür. Uçucu kül miktarı arttıkça numunelerin optimum su muhtevası artmıştır [58].

Aytekin'in [59] yaptığı araştırmada da uçucu kül, killi zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılmış, zemine katılan uçucu külün ilk anda likit limit ve plastik limit değerlerini arttırdığı gözlenmiştir. Plastisite indisinin düşmesi işlenebilirliği arttırdığı görülmüştür. Kompaksiyon deneyi sonuçlarına göre, zemine uçucu kül katkısı ile maksimum kuru birim hacim ağırlık değerini azaltmakta, optimum su içeriğinde ise artış meydana getirmektedir. Uçucu kül katkısı ve kür süresinin artmasıyla içsel sürtünme açısı ve kohezyonda belirgin artış meydana gelmiştir. Kayma mukavemetinin artmasında kohezyondaki artma daha etkindir.

Başka bir çalışmada ise kumlu bir zeminin Afşin-Elbistan uçucu külü ile stabilizasyonu araştırılmıştır. Bu çalışmada, zemine uçucu kül ilavesinin mukavemette meydana getirdiği dayanımın uçucu kül miktarı arttıkça tespit edilmiştir. Ayrıca, kür süresi arttıkça mukavemetin arttığı tespit edilmiştir. Kül içeriğinin ve kür süresinin artmasıyla, göçme anındaki deformasyon değerlerinde de artışlar gözlenmiştir [30].

Aydın'ın [61] yaptığı çalışmada kil, uçucu kül ve kireç kullanılmıştır. Bu çalışmada, kil zeminlerin kireç ve uçucu küllerle geoteknik özellikleri iyileştirilmesi araştırılmıştır. Kil örneklerinin yüksek şişme potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir. Şişme deneyi sonuçlarına göre kireç katkısının tersine, CH kil örnekleri üzerinde uçucu külün şişmede sınırlı iyileştirme gösterdiği gözlenmiştir. Kireç katkısının bölgedeki CH killerin iyileştirilmesinde uçucu kül katkısına göre daha etkili olduğu ve Yenikent kil zeminlerinde, şişme ve serbest basınç dayanımı parametrelerinde iyileştirme için optimum kireç katkısının %7 olarak kullanılabilmesi belirtilmiştir. Ayrıca %5 ve %10 oranlarda uçucu kül katkısının zeminin serbest basınç dayanımında iyileştirmede önemli etkisinin olmasının yanında, şişme özellikleri bakımından çok az bir etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir.

Yüksek plastisiteli killi bir zemin, zemin kuru ağırlıklarının %2, 4, 6 ve 8'i oranında kireç karıştırılmış ve bu karışımlar üzerine Atterberg deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerin sonucunda artan kireç yüzdesine bağlı olarak likit limitte azalma, plastik limitte ise artış görülmüştür. Likit limit ve plastik limitlerdeki bu değişimlerin sonucu olarak plastisite indisi azalmıştır ve %2 oranından fazla kireç içeren karışımların non-plastik davrandığı saptanmıştır. Zeminin non-plastik hale gelmesi sonucu deformasyon yetisi azalacak ve böylece oluşabilecek kalıcı deformasyonlar engellenmiş olacaktır. Plastisite indisindeki düşüşe bağlı olarak zeminin işlenebilirliği artacaktır [62].

Alkaya ve arkadaşlarının [63] yaptığı çalışmaya göre; kürde bekletilen numunelere uygulanan kıvam limitleri değeri hemen yapılan kıvam limitleri değerinin altında olduğu ve plastik limit değerlerinin değişmediği görülmüştür.

Bir başka çalışmada malzeme olarak silt, uçucu kül ve kireç kullanılmıştır. Bu çalışmaya göre, uçucu kül ve (uçucu kül+kireç) katkısının zeminin kıvam limitlerini nasıl etkilediği araştırılmıştır. Bu araştırma sonucunda uçucu kül oranı arttırıldıkça plastik limit değerlerinin arttığı, plastisite indisinin ve tane birim hacim ağırlığının düştüğü görülmüştür [28].

Çakılcıoğlu'nun [19] yaptığı çalışmada ise kil, uçucu kül, zeolit ve kireç kullanılmıştır. Bu çalışmaya göre, karışımların belirlenen kıvam limitlerine göre katkı oranları arttırıldıkça plastisite indisleri azalmıştır. Hidrometre analizi sonucunda zemine katılan katkı maddesi oranları arttıkça silt oranı artmış, kil oranları azalmıştır. Özgül ağırlık deneyinde zeolitlere katılan %10 ve %20 uçucu killerde özgül ağırlık değerinde yükselme görülmüştür. Kompaksiyon deneyinde elde edilen en düşük optimum su muhtevası %5 zeolite katılan uçucu küllerde görülmüştür. Zeolit katkılı karışımlarda %10 uçucu kül ilave edildiğinde, oluşan optimum su içerikleri uçucu kül miktarı arttırılsa bile değişmediği görülmektedir. Serbest basınç deneyinde en yüksek mukavemet değeri günlük, 7 günlük ve 28 günlük kürde bekleyen numunelerde %10 zeolit ve %25 zeolite katılan %15 uçucu kül numunesinde görülmüştür.

Bir diğer çalışmada kil ve kireç kullanılarak, şişen killerin kimyasal yöntemlerle stabilizasyonu araştırılmıştır. Kireç ilavesiyle şişen kilin kıvam limitlerinde değişiklikler meydana geldiği ve bunun sonucunda zemin sınıfının değiştiği gözlenmiş. Zeminin kompaksiyon özelliklerinde de değişiklikler olmuş ve kireç kilin işlenebilirliğini artırmıştır. Yapılmış olan serbest basınç deneyleri sonucunda %3 kireç ilavesinin kısa dönem etkilerini oluşturmakla birlikte, uzun dönemde yeterince çimentolaşma oluşturmadığı ve serbest basınç değerlerinde önemli değişikliklere sebep olmadığı görülmüştür. %6 ve %9 oranında kireç ile hazırlanan numunelerde serbest basınç mukavemetinde önemli artışlar meydana gelmiştir. Bu çalışmalar sonucunda kilin kireç ile stabilizasyonu olabileceği ve başarı ile iyileştirilebileceği görülmüştür [64].

Taşçı'nın [65] yaptığı araştırmada kil, kireç ve silis dumanı kullanılmıştır. Bu çalışmada, Afyon ilinden alınan dispersif ve şişme özelliğine sahip kil zeminin geoteknik özelliklerinin silis dumanı ve sönmüş kireç katkısıyla iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Öncelikle zemine elek analizi, özgül yoğunluk, kıvam limitleri ve kompaksiyon deneyleri yapılmıştır. Şişme ve dispersif özelliklerinin belirlenmesi için de şişme yüzdesi, şişme basıncı, dağılma ve iğne deliği deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda %3 kireç ve %10 silis dumanı katkılı karışımların mühendislik özelliklerine önemli seviyede iyileştirme sağladığı görülmüştür.

Kaya ve arkadaşlarının [66] yaptığı çalışmada bentonit ve zeolit kullanılmıştır. Bu çalışmada, bentonit zeolit karışımı ve bentonit kum karışımı incelenmiştir. Sonuç olarak, her iki malzeme de geçirimsiz tabaka malzemesi olarak uygun olmakla birlikte bentonit zeolitin kation değişim kapasitesi açısından bir üstünlük sağladığı söylenebilir ve tercih sebebidir. Artan düşey gerilmeler yatay gerilmeyi de beraberinde arttıracak ve gerilme değeri arttıkça sızma problemi azalacağı için bu çalışma esnasında düşük gerilme değerleri ile deneyleri gerçekleştirmenin daha uygun olduğu görülmüştür.

Bir diğer araştırmada kumlu zeminlerde çimento ve cüruf kullanılmış, kum zeminlerin çimento kullanılarak ıslah edilebildiği gibi çimento ile aynı oranda cüruf kullanımı ile de mukavemet artışında çimento ile yakın sonuçlar elde edilebileceği bulunmuştur. 7 günün sonunda numunelerin serbest basınç mukavemetinde hızlı bir artış görülmüş, ancak 28 gün sonunda bu artışın azaldığı görülmüştür. Bu çalışma kapsamında kumlu zeminlerin stabilizasyonunda yüksek fırın cürufunun kullanılabilmesi ve bu sayede atık olan YFC'nin ekonomiye katkı sağlayacağı belirlenmiştir [6].

Kavak ve Bilgen'in [17] çalışmasında ise bentonit kilinin yüksek fırın cürufu ve kireç ile stabilizasyonu amaçlanmıştır. Bu çalışmaya göre, YFC'nin elenmeden çimento katkı malzemesi olarak kullanılan boyutta bentonite eklenmesinin, bentonit kilinin serbest basınç değerlerinde önemli bir değişiklik meydana getirmediği görülmektedir. Ayrıca proktor deneyleri sonuç grafiklerinde, çimento katkı malzemesi olarak kullanılan boyuttaki cürufun, ağırlıkça %10'dan fazla oranlarda kullanılmasının, bentonit kilinin optimum su muhtevasında azalmaya ve kuru birim hacim ağırlıklarında artışa neden olduğu görülmektedir. Bunun yanında, 150 mikrondan elenmiş cürufun, kireçle birlikte bentonite eklenmesi halinde ise, optimum su muhtevası değişmemekte, kuru birim hacim ağırlıkları azalmakta ve proktor eğrisi düzleşmektedir.

6. YAPILAN DENEYLER VE UYGULANAN METODLAR

Stabilizasyon işlemi için laboratuarda önceden belirlenmiş oranlarda karışımlar hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar 24 saat $105\pm 5^{\circ}\text{C}$ 'lik etüvde kurutulmuştur. Kurutulan malzemeler hassas terazide ağırlıkça yüzdelerinde tartılmıştır. Deneyler farklı karışımlar üzerinde yapılmıştır. İlk deney numunesi %100 Bentonit kili olarak belirlenmiştir. Sonraki karışımlarda %10 Kireç sabit tutulup YFC, Uçucu Kül ve Zeolit katılmıştır. Birlikte sırayla %5, %10 ve %15 oranlarında karıştırılmıştır. Bu oranlar Tablo 6.1'de gösterilmiştir.

Tablo 6.1 Kullanılan katkı oranları

Sıra No	Karışımlar
1	% 100 Kil
2	% 100 Kil + %5 YFC
3	% 100 Kil + %10 YFC
4	% 100 Kil + %15 YFC
5	%100 Kil + %5 YFC + %10 Kireç
6	%100 Kil + %10 YFC + %10 Kireç
7	%100 Kil + %15 YFC + %10 Kireç
8	% 100 Kil + %5 YFC + %5 Zeolit
9	% 100 Kil + %10 YFC + %10 Zeolit
10	% 100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit
11	%100 Kil + %5 YFC + %5 Zeolit + %10 Kireç
12	%100 Kil + %10 YFC + %10 Zeolit + %10 Kireç
13	%100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit + %10 Kireç
14	% 100 Kil + %5 YFC + %5 UK
15	% 100 Kil + %10 YFC + %10 UK
16	% 100 Kil + %15 YFC + %15 UK
17	%100 Kil + %5 YFC + %5 UK + %10 Kireç
18	%100 Kil + %10 YFC + %10 UK + %10 Kireç
19	%100 Kil + %15 YFC + %15 UK + %10 Kireç

6.1 Özgül Yoğunluk

Özgül yoğunluk (Gs); tane yoğunluğunun suyun yoğunluğuna oranı olarak tanımlanmaktadır. Özgül yoğunluk maddenin kendisiyle aynı hacimdeki suya göre ne kadar ağır olduğunu ifade eder, birimsizdir. Zeminlerin özgül yoğunluğu (Gs) aşağıda verilen formül (6.1) kullanılarak hesaplanır [67] .

Özgül yoğunluk deneyinde 250 ml'lik piknometreler kullanılmıştır. Deney için her bir karışımdan 10'ar g'lık numuneler hazırlanmıştır. Gerekli tartımlar yapılarak su ilave edilen numunelere 24 saat boyunca vakum uygulanıp havası alınmıştır. Havası alınan numuneler vakumdan alındıktan sonra su yüzünde kalan taneciklerin çökmesi için 24 saat boyunca bekletip daha sonra tartım yapılmıştır. Deneysel TS 1900-1'e uygun şekilde yapılmıştır. Şekil 6.1'de özgül yoğunluk deney düzeneği verilmektedir. Bu çalışma sonunda elde edilen deney sonuçları Tablo 6.2'de gösterilmiştir.

$$G_s = (W_2 - W_1) / [(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)] \quad (6.1)$$

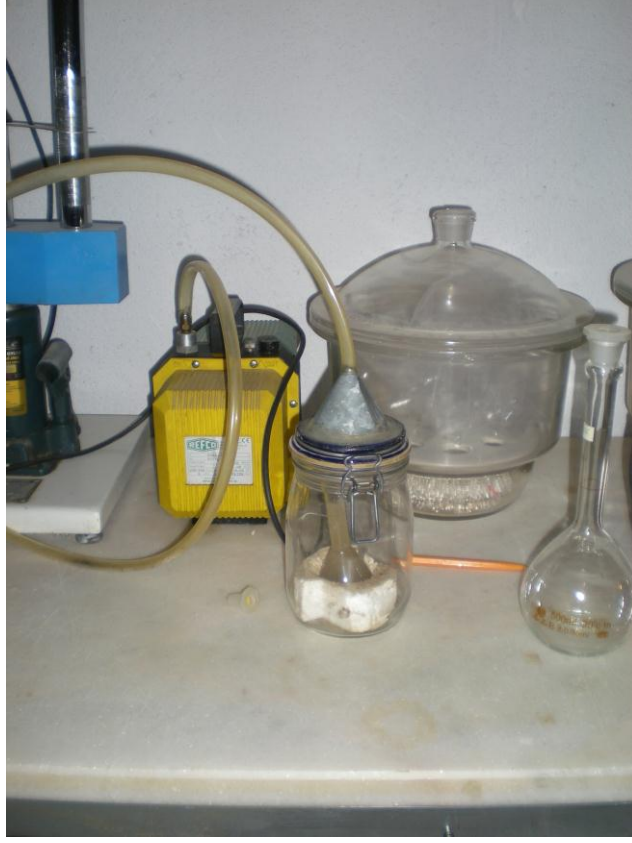
Eşitlikte;

W_1 = Piknometrenin boş ağırlığı (g)

W_2 = Piknometre+zemin ağırlığı (g)

W_3 = Piknometre+zemin+su ağırlığı (g)

W_4 = Sadece su ile dolu piknometre ağırlığı (g)



Şekil 6.1 Özgöl yoğunluk deney düzeneği

Tablo 6.2 Karışımların özgül yoğunlukları

Sıra No	Karışımlar	Gs
1	% 100 Kil	2.82
2	% 100 Kil + %5 YFC	2.85
3	% 100 Kil + % 10 YFC	2.91
4	% 100 Kil + % 15 YFC	2.87
5	%100 Kil + %5 YFC + %10 Kireç	2.97
6	% 100 Kil + %10 YFC + %10 Kireç	2.96
7	%100 Kil + %15 YFC + %10 Kireç	2.89
8	% 100 Kil + %5 YFC + %5 Zeolit	2.84
9	% 100 Kil + % 10 YFC + % 10 Zeolit	2.83
10	% 100 Kil + % 15 YFC + % 15 Zeolit	2.86
11	%100 Kil + %5 YFC + %5 Zeolit + %10 Kireç	2.92
12	% 100 Kil + %10 YFC + %10 Zeolit + %10 Kireç	2.89
13	%100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit + %10 Kireç	2.90
14	% 100 Kil + %5 YFC + %5 UK	2.86
15	% 100 Kil + % 10 YFC + % 10 UK	2.84
16	% 100 Kil + % 15 YFC + % 15 UK	2.89
17	%100 Kil + %5 YFC + %5 UK + %10 Kireç	2.89
18	% 100 Kil + %10 YFC + %10 UK + %10 Kireç	2.92
19	%100 Kil + %15 YFC + %15 UK + %10 Kireç	2.87

6.2 Likit Limit ve Plastik Limit Deneyi

Yapılan likit limit ve plastik limit deneyleri TS 1900-1'e uygun olarak yapılmıştır.

6.2.1 Likit Limit Deneyi

Likit limitin belirlenmesi için düşen koni yöntemi kullanılmıştır. Likit limit, İngiliz standartlarında standart koninin 5 saniyede zemin örneği içerisine 20 mm batmasına karşılık gelen su içeriği olarak tanımlanmaktadır. Düşen koni penetrasyon yönteminde amaç; belli ağırlıktaki bir konik ucun 5 saniye süreyle bir kap içine doldurulmuş zemine batma miktarını ölçerek farklı su içerikleri için su içeriği-batma miktarı ilişkisinden likit limiti belirlemektir [67]. Deney sonunda likit limit su içeriği (w_L) formül (6.2) ile hesaplanmıştır [68].

Likit limit deneyinde her bir karışım için 200 g numune hazırlanmıştır. Her karışımında, numuneler ıslatılıp 24 saat boyunca homojen hale gelmesi için bekletilmiştir. Bir gün önceden hazırlanan numunelere likit limit deneyi uygulanmıştır. Her bir karışım için 2. ve 3. okumalara geçerken 20 g su ilave edilerek deney tekrarlanmıştır. Şekil 6.2’de likit limit deney seti verilmektedir. Deney sonunda elde edilen likit limit değerleri Tablo 6.4’te verilmiştir.

$$w_L = [(w_2 - w_3) / (w_3 - w_1)] * 100 \quad (6.2)$$

Burada:

w_L = Likit limit

w_1 = Kap ağırlığı (g)

w_2 = Kap + ıslak numune ağırlığı (g)

w_3 = Kap + kuru numune ağırlığı (g)



Şekil 6.2 Likit limit deney seti

6.2.2 Plastik Limit Deneyi

Bu deney zeminin henüz plastik kıvamda bulunduğu en düşük su içeriğinin ölçülmesi ile ilgilidir. Plastik limit deneyinde amaç; zeminin henüz plastik kıvamda bulunduğu en düşük su içeriğinin belirlenmesidir. Plastik limitin laboratuvar tanımı; 3 mm çapında çubukta kopma olduğunda, silindirik bir makarna şeklini aldığı andaki su içeriğidir [67].

Plastik limit su muhtevası (w_p) formül (6.3) ile hesaplanmıştır [1].

$$w_p = [(w_2 - w_3) / (w_3 - w_1)] * 100 \quad (6.3)$$

Burada;

w_p = Plastik limit

w_1 = Kap ağırlığı (g)

w_2 = Kap+ ıslak numune ağırlığı (g)

w_3 = Kap+ kuru numune ağırlığı (g)

Plastik limit deneyinde her bir karışım için 10 g numune hazırlanmıştır. Bu numunelere su ilave edilerek plastik limit deneyi yapılmıştır.

Likit limit ve plastik limitin su muhtevasının farkı plastisite indisi (I_p) olarak adlandırılmakta ve formül (6.4) ile hesaplanmıştır [1]. Şekil 6.3'te plastik limit deney seti verilmiştir. Deney sonunda elde edilen likit limit ve hesaplanan plastisite indisi değerleri Tablo 6.4'te verilmiştir.

$$I_p = (w_L - w_p) \quad (6.4)$$



Şekil 6.3 Plastik limit deney seti

Tablo 6.3'te Leonards'ın yaptığı plastisite indisi sınıflaması verilmiştir.

Tablo 6.3 LEONARDS (1962) Plastisite indisi sınıflaması [69]

Plastisite İndisi, I_p (%)	Plastisite Derecesi
0-5	Plastik değil
5-15	Orta derecede plastik
15-40	Plastik
>40	Çok plastik

Tablo 6.4 Karışımların kıvam limitleri ve plastisite indisleri

Sıra No	Karışımlar	Likit Limit (w _L) (%)	Plastik Limit (w _p) (%)	Plastisite İndisi (I _p) (%)
1	%100 Kil	113.18	44.10	69.08
2	%100 Kil + %5 YFC	91.22	37.50	53.72
3	%100 Kil + %10 YFC	90.74	46.20	44.54
4	%100 Kil + %15 YFC	121.23	53.19	68.04
5	%100 Kil + %5 YFC + %10 Kireç	102.71	57.10	45.61
6	%100 Kil + %10 YFC + %10 Kireç	114.70	64.70	50.00
7	%100 Kil + %15 YFC + %10 Kireç	95.15	41.20	53.95
8	%100 Kil + %5 YFC + %5 Zeolit	119.05	51.50	67.55
9	%100 Kil + %10 YFC + %10 Zeolit	93.44	41.20	52.24
10	%100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit	81.91	39.30	42.61
11	%100 Kil + %5 YFC + %5 Zeolit + %10 Kireç	109.01	55.00	54.01
12	%100 Kil + %10 YFC + %10 Zeolit + %10 Kireç	99.79	45.50	54.29
13	%100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit + %10 Kireç	100.18	51.30	48.88
14	%100 Kil + %5 YFC + %5 UK	115.31	46.40	68.91
15	%100 Kil + %10 YFC + %10 UK	104.51	48.00	56.51
16	%100 Kil + %15 YFC + %15 UK	92.69	42.90	49.79
17	%100 Kil + %5 YFC + %5 UK + %10 Kireç	107.16	45.00	62.16
18	%100 Kil + %10 YFC + %10 UK + %10 Kireç	99.98	46.20	53.78
19	%100 Kil + %15 YFC + %15 UK + %10 Kireç	101.69	43.70	57.99

6.3 Tane apı Dağılımı ve Zemin Sınıflandırması

Hazırlanan zemin numunelerinin tane çapı dağılımı hidrometre deneyi ile tespit edilmiştir. Birleştirilmiş zemin sınıflandırma sistemine göre sınıflandırılmıştır.

6.3.1 Hidrometre Deneyi

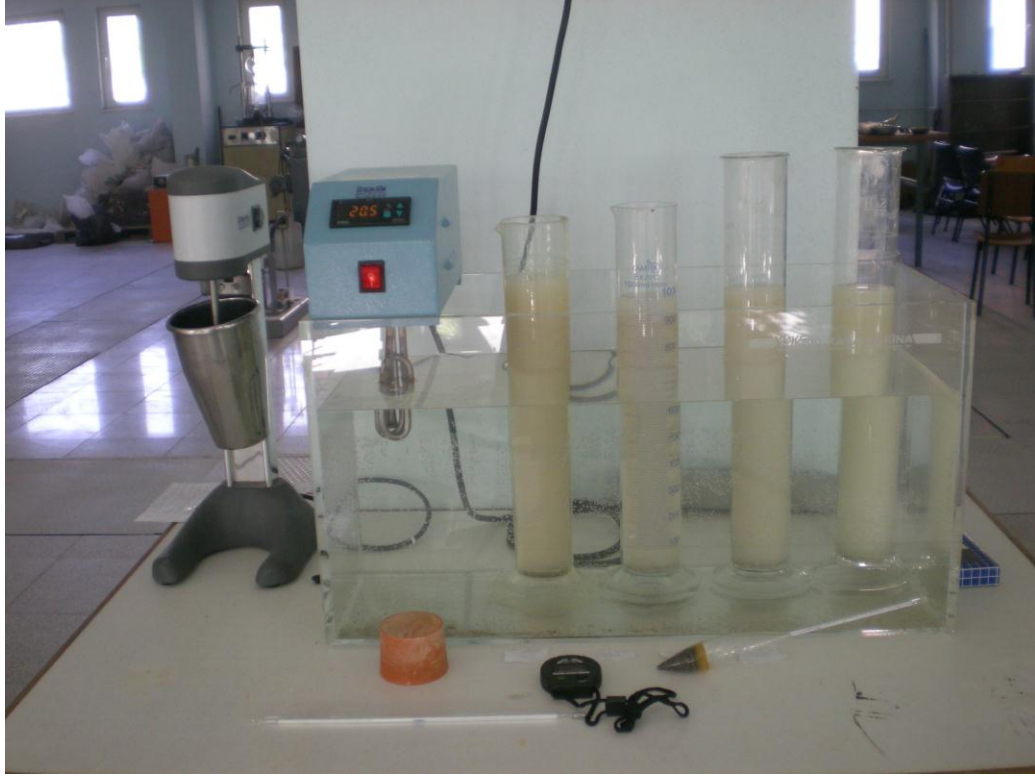
İnce taneli zeminleri eleklerden elemek ve çaplarına göre ayırmak, zemin tanelerinin gözle görülemeyecek kadar küçük olmalarından dolayı mümkün olmamaktadır. Bu sebepten dolayı bu tür zeminlerin (tane çapı 0,075 mm den küçük veya 200 No'lu elekten geçen) zeminler için ıslak analiz (hidrometre, pipet) yapılmaktadır. Hidrometre analizi bu tür zeminlerin tane sınıflamasında yaygın olarak kullanılan bir deney yöntemi olup, esası Stokes Yasası'na dayanmaktadır [67].

Stokes kanunu, tanelerin küre şeklinde olduğu kabul edilmektedir. Buna rağmen, gerçek zemin tanelerinin ve özellikle kil minerallerinin küre şeklinde olmadığı bilinmektedir. Örneğin, halloyizit silindirik, montmorillonit ve illit yapraklı, kaolinit ise levhamsı şekildedir [70]. Bu nedenle bu kanunun yaklaşık sonuçlar verdiği bilinmektedir. Daha doğru bir yöntem geliştirilmediği için uygulamada bu yöntem kullanılmaya devam edilmektedir.

50 g zemin numunesi mekanik bir karıştırıcı ile karıştırılarak suda bir süspansiyon haline getirilir, değişik zamanlarda süspansiyonun yoğunluğu bir pipetle numune alarak veya bir hidrometre ile ölçülerek süspansiyonda kalan tanelerin çapı hesaplanmaktadır. Zemin taneleri su içinde bir süspansiyon haline getirilirken, tanelerin birbirinden ayrışması için çözelti malzemesi olarak Sodyumhexameta-fosfat kullanılmaktadır (50 g için 125 ml çözelti uygundur) [19]. Numune bu çözelti içerisinde 16 saat bekletilerek kil ve silt boyutundaki tanelerin tamamen ayrışması sağlanır. 16. saat sonunda çözelti karıştırıcı ile karıştırılıp 1000 ml' lik süspansiyon silindirene dökülür ve saf su ile 1000 ml' ye tamamlanır. Daha sonra silindirin ağzına elin içi kapatılarak 1 dakika süre ile çalkalanıp tam süspansiyon haline

getirilip silindir daha önceden hazırlanmış olan 20 °C' deki sabit sıcaklıktaki su banyosu içine yerleştirilir ve okumalar alınır [67].

Yapılan hidrometre deneyinde 50 g numune kullanılması gerekirken, 125 ml çözelti içinde çözülmediği için 20 g numune ve o karışımın likit limit değerinde su karıştırılmıştır. Bu likit limit değerindeki su ve numune karışımı 125 ml çözelti içinde çözülüp deneye bu şekilde başlanmıştır. Şekil 6.4'te hidrometre deney seti verilmiştir. Hidrometre deneyi uygulanmıştır ve deney sonuçları Tablo 6.5'te görülmektedir.



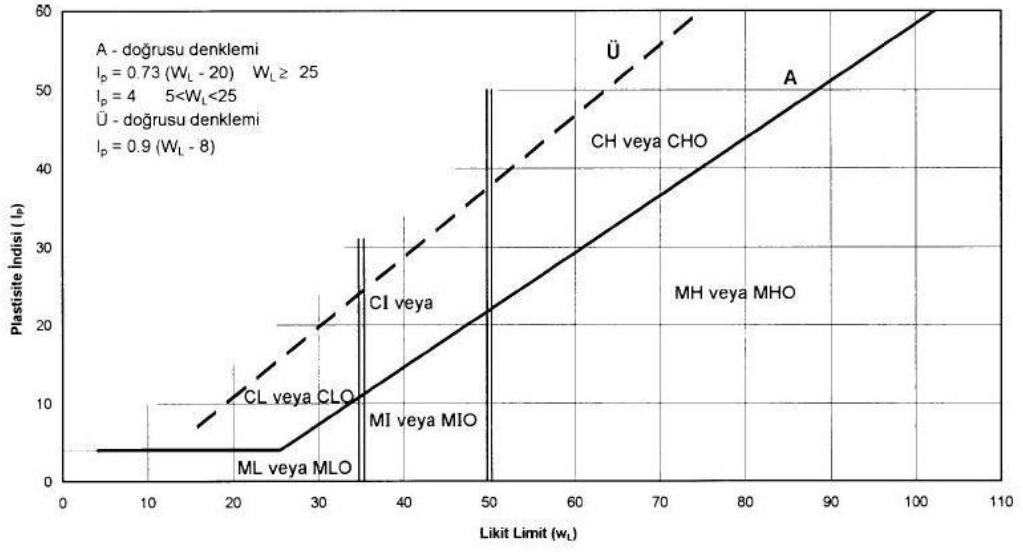
Şekil 6.4 Hidrometre deney seti

Tablo 6.5 Hidrometre deney sonuçları

Sıra No	Karışımlar	Kil (%)	Silt (%)
1	%100 Kil	51.519	48.481
2	%100 Kil + %5 YFC	51.223	48.777
3	%100 Kil + %10 YFC	53.333	46.667
4	%100 Kil + %15 YFC	54.467	45.533
5	%100 Kil + %5 YFC + %10 Kireç	46.736	53.264
6	%100 Kil + %10 YFC + %10 Kireç	50.592	49.408
7	%100 Kil + %15 YFC + %10 Kireç	51.225	48.775
8	%100 Kil + %5 YFC + %5 Zeolit	52.478	47.552
9	%100 Kil + %10 YFC + %10 Zeolit	51.741	48.259
10	%100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit	44.306	55.694
11	%100 Kil + %5 YFC + %5 Zeolit + %10 Kireç	51.176	48.824
12	%100 Kil + %10 YFC + %10 Zeolit + %10 Kireç	49.849	50.151
13	%100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit + %10 Kireç	46.553	53.447
14	%100 Kil + %5 YFC + %5 UK	54.586	45.414
15	%100 Kil + %10 YFC + %10 UK	58.652	41.348
16	%100 Kil + %15 YFC + %15 UK	54.283	45.717
17	%100 Kil + %5 YFC + %5 UK + %10 Kireç	55.048	44.952
18	%100 Kil + %10 YFC + %10 UK + %10 Kireç	52.959	47.051
19	%100 Kil + %15 YFC + %15 UK + %10 Kireç	50.948	49.052

6.3.2 Zemin Sınıflandırması

Hazırlanan karışımların sınıflandırılması için TS 1500/2000'de önerilen birleşik zemin sınıflandırma metodu kullanılmıştır. Şekil 6.5'te plastisite kartı verilmiştir [71]. Sınıflandırma sonunda elde edilen değerler Tablo 6.6'da verilmektedir.



Şekil 6.5 Plastisite kartı

Tablo 6.6 Karışımların zemin sınıfları

Sıra No	Karışımlar	Zemin Sınıfı
1	%100 Kil	CH
2	%100 Kil + %5 YFC	CH
3	%100 Kil + %10 YFC	CH
4	%100 Kil + %15 YFC	CH
5	%100 Kil + %5 YFC + %10 Kireç	MH
6	%100 Kil + %10 YFC + %10 Kireç	CH
7	%100 Kil + %15 YFC + %10 Kireç	CH
8	%100 Kil + %5 YFC + %5 Zeolit	CH
9	%100 Kil + %10 YFC + %10 Zeolit	CH
10	%100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit	MH
11	%100 Kil + %5 YFC + %5 Zeolit + %10 Kireç	CH
12	%100 Kil + %10 YFC + %10 Zeolit + %10 Kireç	MH
13	%100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit + %10 Kireç	MH
14	%100 Kil + %5 YFC + %5 UK	CH
15	%100 Kil + %10 YFC + %10 UK	CH
16	%100 Kil + %15 YFC + %15 UK	CH
17	%100 Kil + %5 YFC + %5 UK + %10 Kireç	CH
18	%100 Kil + %10 YFC + %10 UK + %10 Kireç	CH
19	%100 Kil + %15 YFC + %15 UK + %10 Kireç	CH

6.4 Kompaksiyon Deneyi

Zeminlerin taşıma gücünü artırmak, sabit, hareketli ve dinamik yükler altında meydana gelecek oturmaları azaltmak ve zeminin geçirimsizliğini azaltarak zeminlerin daha fazla su alıp hacimsel değişikliklerin oluşmasını önlemek amacıyla zeminlerin tabakalar halinde serilerek mekanik araçlar vasıtasıyla su ve tane hacmi sabit iken havanın dışarı atılıp zemin tanelerinin sıkıştırılması olayına kompaksiyon

denir. Sıkıştırılmış bir zeminde, kompaksiyon derecesi o zemine ait kuru birim hacim ağırlığıdır (γ_k) veya kuru yoğunluktur (ρ_k). Kuru birim hacim ağırlığı ne kadar büyükse, zemin o kadar iyi sıkıştırılmış demektir. Kuru birim hacim ağırlığının maksimum olduğu durumda su içeriğine optimum su içeriği (w_{opt}) denir [67].

Kompaksiyon deneyinde her bir karışım için 2000 g numune hazırlanmıştır. Deneylere %20 su miktarıyla başlanmıştır ve her tekrarda %10 su ilave edilmiştir. Şekil 6.6'da kompaksiyon deney seti verilmiştir. Yapılan kompaksiyon deneyleri TS 1900-1'e uygun olarak yapılmıştır. Deney sonuçları Tablo 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.6 Kompaksiyon deney seti

Tablo 6.7 Karışımların optimum su muhtevası ve kuru birim hacim ağırlıkları

Sıra No	Karışımlar	Optimum Su Muhtevası (w_{opt}) (%)	Maksimum Kuru Birim Ağırlık (γ_{kmaks}) (kN/m^3)
1	%100 Kil	49.0	10.90
2	%100 Kil + %5 YFC	41.7	11.79
3	%100 Kil + %10 YFC	30.6	13.40
4	%100 Kil + %15 YFC	38.0	13.14
5	%100 Kil + %5 YFC + %10 Kireç	36.6	12.14
6	%100 Kil + %10 YFC + %10 Kireç	47.5	11.61
7	%100 Kil + %15 YFC + %10 Kireç	29.0	13.01
8	%100 Kil + %5 YFC + %5 Zeolit	49.4	12.35
9	%100 Kil + %10 YFC + %10 Zeolit	46.4	11.56
10	%100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit	45.4	12.09
11	%100 Kil + %5 YFC + %5 Zeolit + %10 Kireç	48.5	11.00
12	%100 Kil + %10 YFC + %10 Zeolit + %10 Kireç	38.5	11.20
13	%100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit + %10 Kireç	42.1	11.39
14	%100 Kil + %5 YFC + %5 UK	43.2	11.38
15	%100 Kil + %10 YFC + %10 UK	45.2	11.24
16	%100 Kil + %15 YFC + %15 UK	45.0	11.66
17	%100 Kil + %5 YFC + %5 UK + %10 Kireç	44.0	11.20
18	%100 Kil + %10 YFC + %10 UK + %10 Kireç	40.5	11.25
19	%100 Kil + %15 YFC + %15 UK + %10 Kireç	37.0	11.30

6.5 Serbest Basınç Deneyi

Genellikle suya doygun killi zeminlerde ($\Phi=0$) kayma direncinin belirlenmesinde kullanılan bir deney olup, deney sonucunda elde edilen Mohr dairesinden zemine ait kayma direnci (görünür kohezyon) kolaylıkla hesaplanır [67].

Bu deney zeminlerin kayma mukavemetini belirlemek için yapılmaktadır. Deney TS 1900-2/2006'da önerildiği şekilde uygulanmıştır [72].

Her bir karışım için günlük, 7 günlük ve 28 günlük küre bırakılmış numuneler hazırlanmıştır. Laboratuarda, her bir karışım için mukavemetleri belirlenmiş ve elde edilen kayma dayanımları Tablo 6.8'de verilmiştir. Şekil 6.7'de tek eksenli basınç aleti, Şekil 6.8'de kırılmadan sonra numunelerin durumu verilmiştir.



Şekil 6.7 Tek eksenli basınç aleti



Şekil 6.8 Kırılmadan sonra numunelerin durumu

Tablo 6.8 Karışımların serbest basınç deneyi sonucu kayma dayanımları

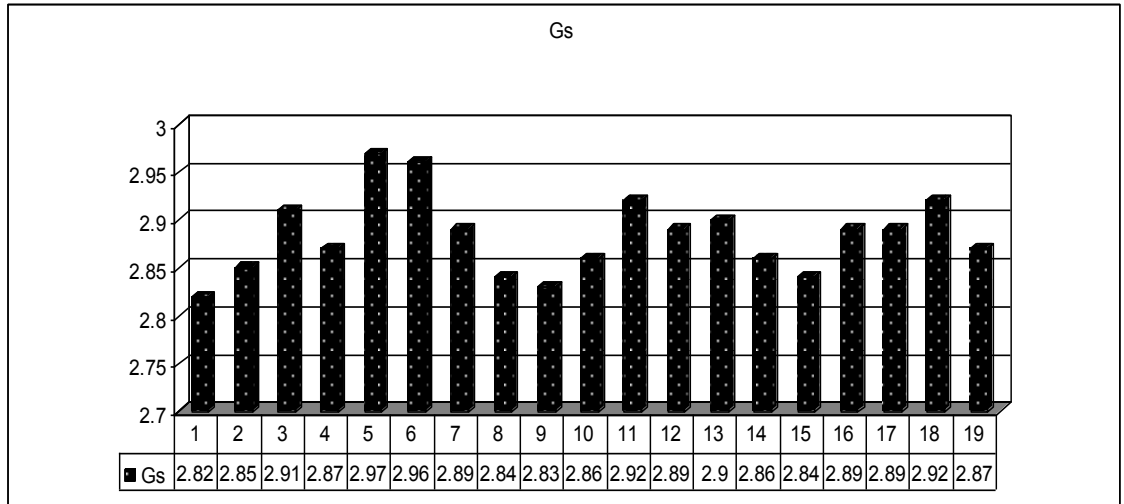
Sıra No	Karıışımlar	Günlük q_u (kPa)	7 gün kürlü q_u (kPa)	28 gün kürlü q_u (kPa)
1	%100 Kil	61.09	527.91	594.50
2	%100 Kil + %5 YFC	172.01	580.08	700.61
3	%100 Kil + %10 YFC	176.53	597.54	921.56
4	%100 Kil + %15 YFC	173.58	465.44	954.71
5	%100 Kil + %5 YFC + %10 Kireç	183.59	619.61	658.44
6	%100 Kil + %10 YFC + %10 Kireç	180.25	683.74	782.01
7	%100 Kil + %15 YFC + %10 Kireç	214.77	774.95	846.34
8	%100 Kil + %5 YFC + %5 Zeolit	171.82	1113.49	1389.36
9	%100 Kil + %10 YFC + %10 Zeolit	139.75	979.13	1444.67
10	%100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit	164.07	1174.29	1605.41
11	%100 Kil + %5 YFC + %5 Zeolit + %10 Kireç	174.27	375.02	441.41
12	%100 Kil + %10 YFC + %10 Zeolit + %10 Kireç	162.21	383.65	481.62
13	%100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit + %10 Kireç	174.56	368.15	587.24
14	%100 Kil + %5 YFC + %5 UK	118.27	604.79	1042.29
15	%100 Kil + %10 YFC + %10 UK	78.75	501.824	1014.53
16	%100 Kil + %15 YFC + %15 UK	94.44	777.31	1112.80
17	%100 Kil + %5 YFC + %5 UK + %10 Kireç	151.91	408.17	433.18
18	%100 Kil + %10 YFC + %10 UK + %10 Kireç	119.06	364.04	565.86
19	%100 Kil + %15 YFC + %15 UK + %10 Kireç	132.69	470.74	551.64

7. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRME

Süd-Chemie (Tr) Madencilik San. ve Tic. A.Ş.'den alınan bentonit kiline %10 kireç sabit tutulup %5, %10, %15 oranlarında Ereğli Demir Çelik fabrikasından alınan yüksek fırın cürufu, Gürler Beton A.Ş.'den temin edilen uçucu kül ve Balıkesir Eti Maden İşletmeleri Bigadiç'ten alınan zeolit ilave edilmiştir. Hazırlanan numuneler günlük, 7 ve 28 günlük kür sürelerince hatalar en aza indirilmiştir. Karışımlar üzerinde gerçekleştirilen deney sonuçları tablolar halinde 6. bölümde sunulmuştur.

7.1 Karışımların Özgül Yoğunluk Deney Sonuçları

Karışımların özgül yoğunlukları %100 Kil'e göre artış göstermiştir. En yüksek özgül yoğunluk değeri %100 Kil + %5 YFC + %10 Kireç karışımında bulunmuştur.



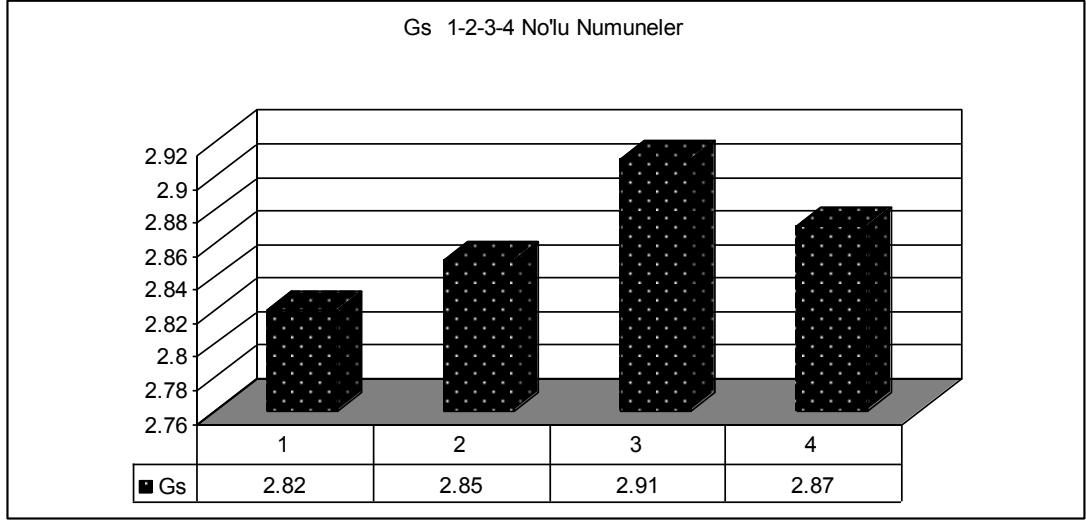
Şekil 7.1 Karışımların özgül yoğunluk grafiği

%100 Kil'e göre YFC katkısı özgül yoğunlukları arttırmıştır. En yüksek özgül yoğunluk %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.2). %100 Kil'e göre YFC + Kireç katkıları özgül yoğunluğu arttırmıştır. %100 Kil + YFC karışımına göre kireç katkısı özgül yoğunluğu arttırmıştır. En yüksek özgül yoğunluk %100 Kil + %5 YFC + %10 Kireç karışımında görülmüştür (Şekil 7.3).

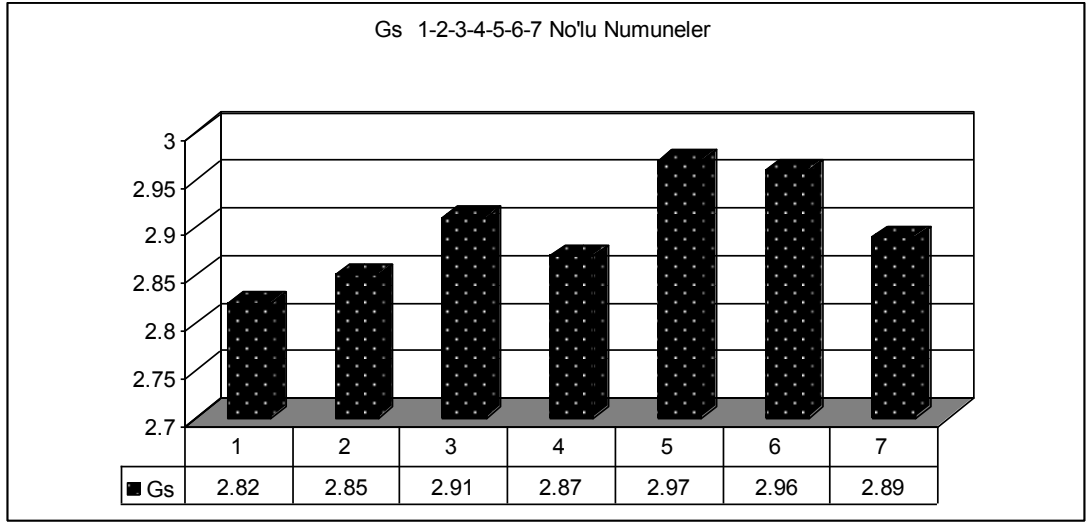
%100 Kil'e göre YFC + Zeolit katkıları özgül yoğunluğu arttırmıştır. %100 Kil + YFC karışımına göre zeolit katkısı özgül yoğunluğu azaltmıştır. En yüksek özgül yoğunluk %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.4). %100 Kil'e göre YFC + Zeolit + Kireç katkıları özgül yoğunluğu arttırmıştır. %100 Kil + YFC karışımına göre %5 ve %15 zeolit katkılı karışıma kireç katkısı özgül yoğunluğu arttırmıştır. En yüksek özgül yoğunluk %100 Kil + %5 YFC + %5 Zeolit + %10 Kireç karışımında görülmüştür (Şekil 7.5). %100 Kil + YFC + Zeolit karışımına göre kireç katkısı özgül yoğunluğu arttırmıştır (Şekil 7.8).

%100 Kil'e göre YFC + UK katkıları özgül yoğunluğu arttırmıştır. %100 Kil + YFC karışımına göre %5 UK katkısı özgül yoğunluğu arttırmıştır. En yüksek özgül yoğunluk %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.6). %100 Kil'e göre YFC + UK + Kireç katkıları özgül yoğunluğu arttırmıştır. %100 Kil + YFC karışımına göre %5 ve %10 UK katkılı karışıma kireç katkısı özgül yoğunluğu arttırmıştır. En yüksek özgül yoğunluk %100 Kil + %10 YFC + %10 UK + %10 Kireç karışımında görülmüştür (Şekil 7.7). %100 Kil + YFC + UK karışımına göre %5 ve %10 UK katkılı karışımlara kireç katkısı özgül yoğunluğu arttırmıştır (Şekil 7.9).

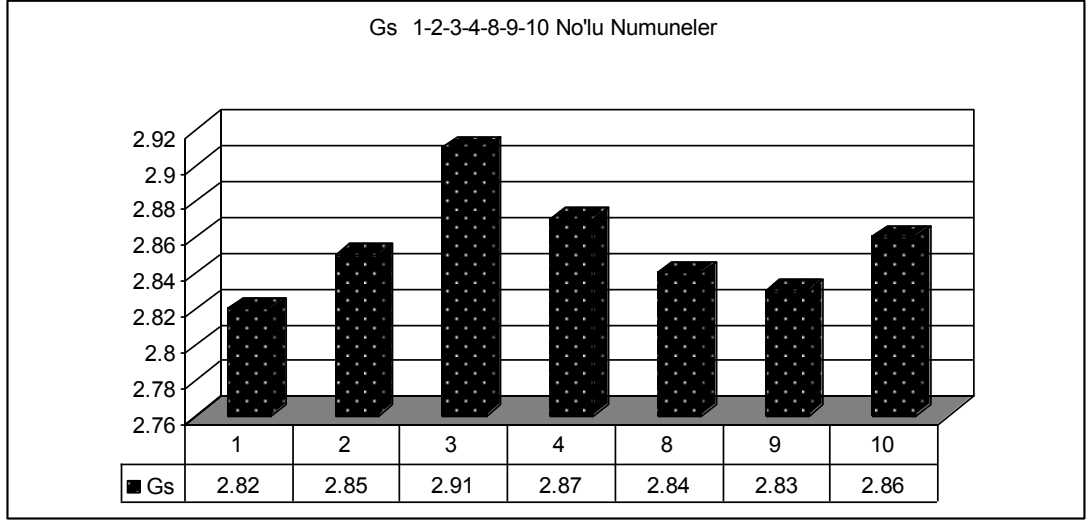
%100 Kil + %5 YFC karışımına göre kireç, %5 Zeolit + Kireç, %5 UK ve %5 UK + Kireç katkıları özgül yoğunluğu arttırmıştır (Şekil 7.10). %100 Kil + %10 YFC karışımına göre kireç ve %10 UK + Kireç katkıları özgül yoğunluğu arttırmıştır (Şekil 7.11). %100 Kil + %15 YFC karışımına göre kireç, %15 Zeolit + Kireç ve %15 UK katkıları özgül yoğunluğu arttırmıştır (Şekil 7.12).



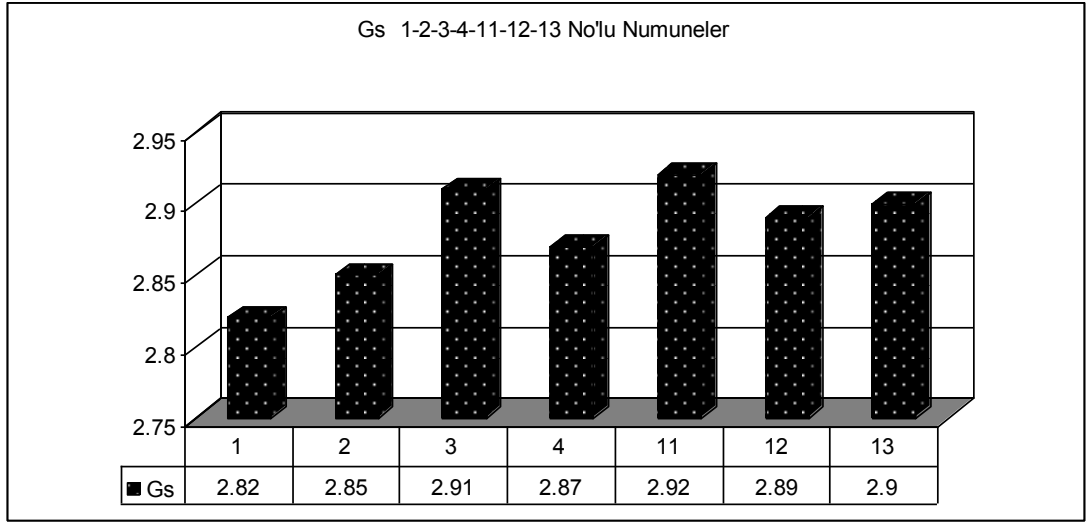
Şekil 7.2 1-2-3-4 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği



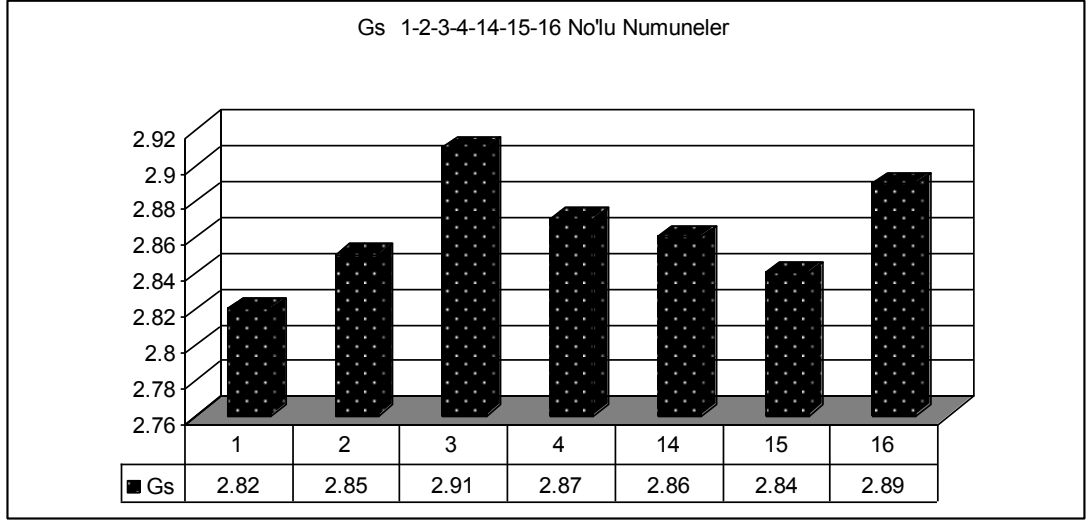
Şekil 7.3 1-2-3-4-5-6-7 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği



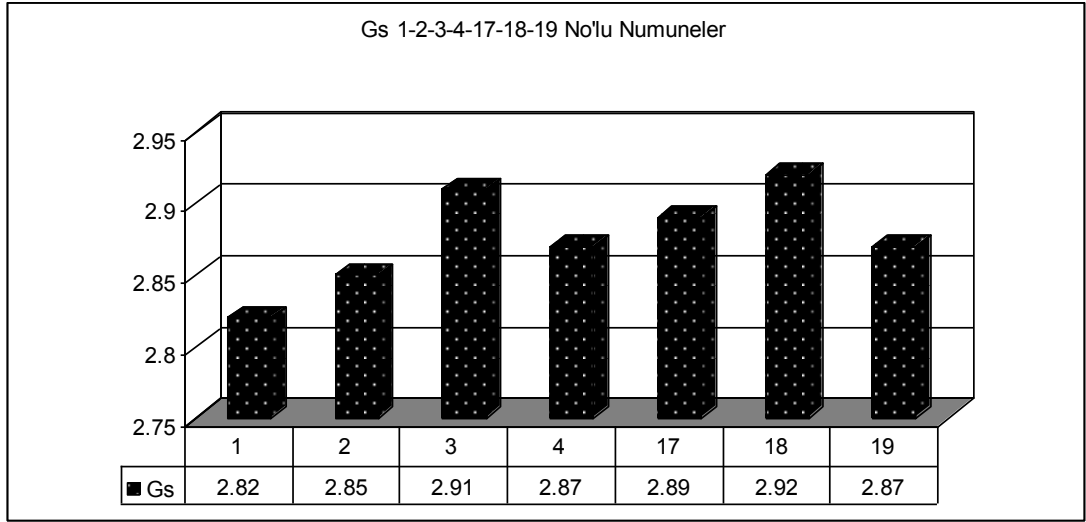
Şekil 7.4 1-2-3-4-8-9-10 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği



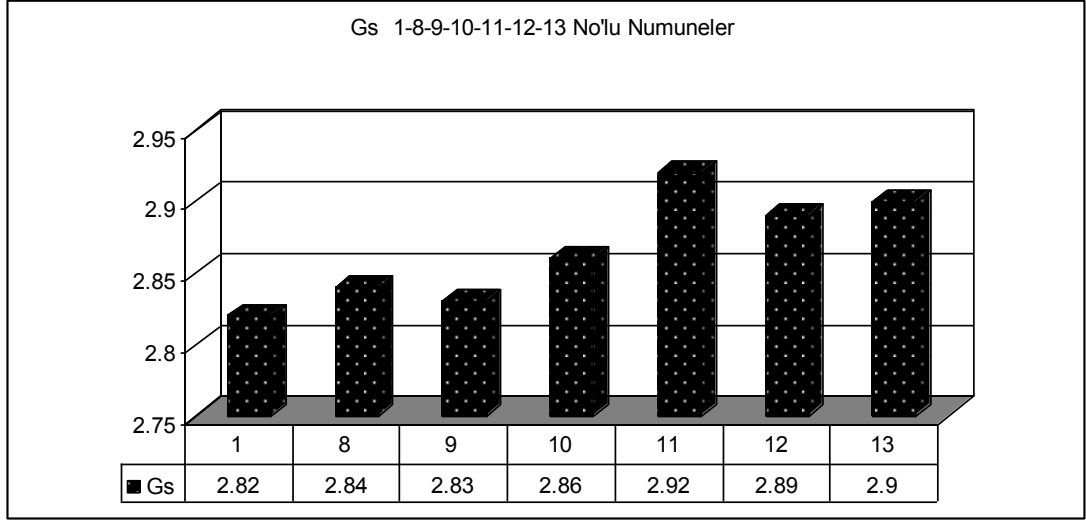
Şekil 7.5 1-2-3-4-11-12-13 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği



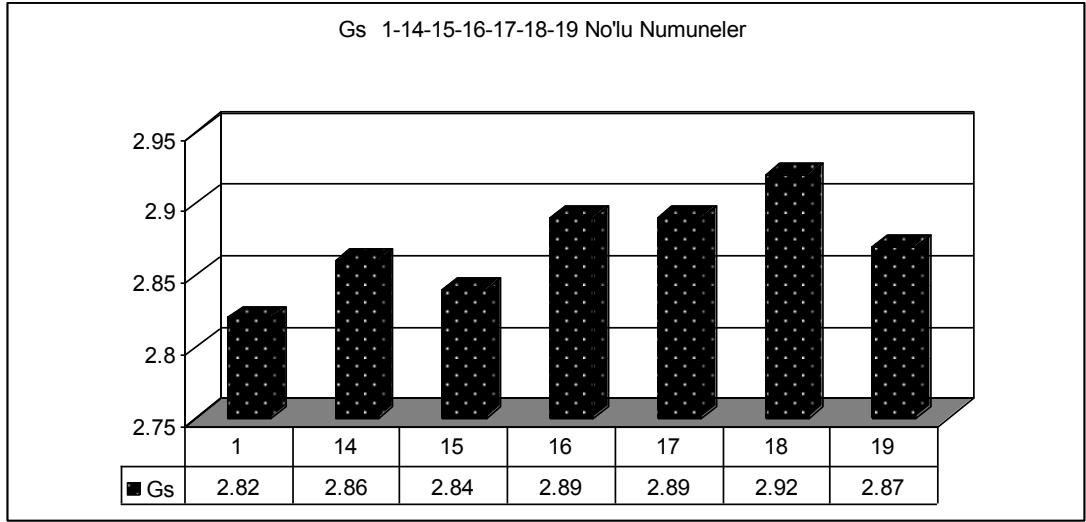
Şekil 7.6 1-2-3-4-14-15-16 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği



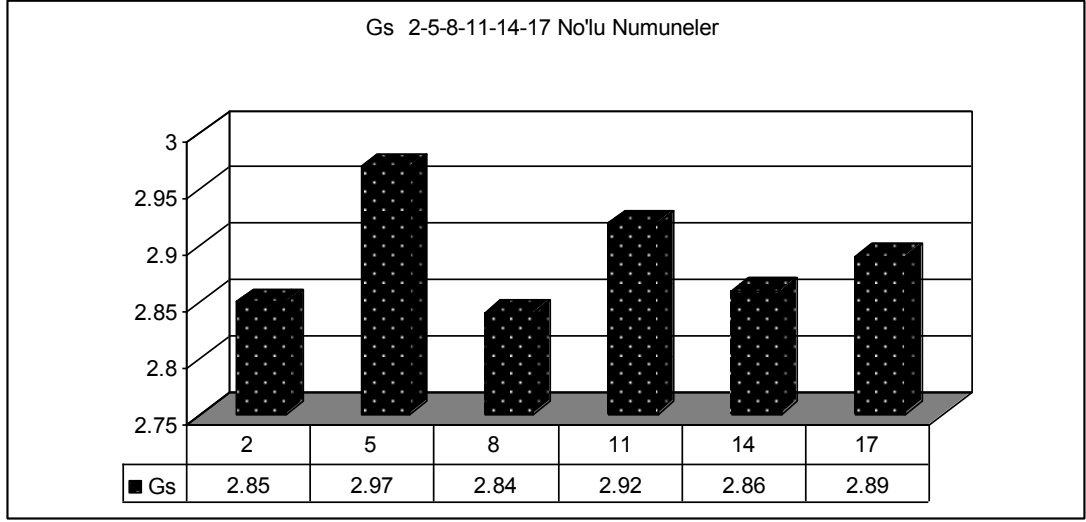
Şekil 7.7 1-2-3-4-17-18-19 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği



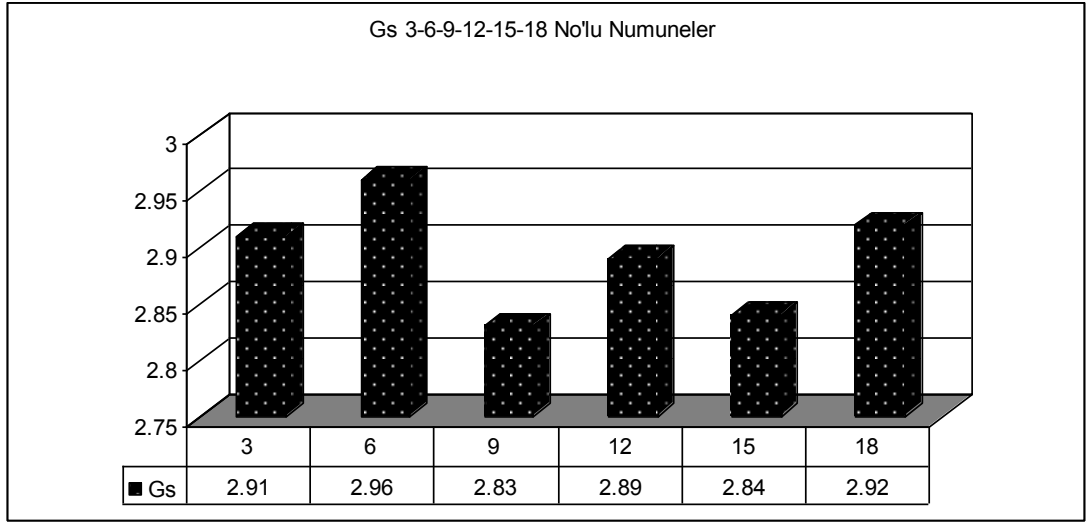
Şekil 7.8 1-8-9-10-11-12-13 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği



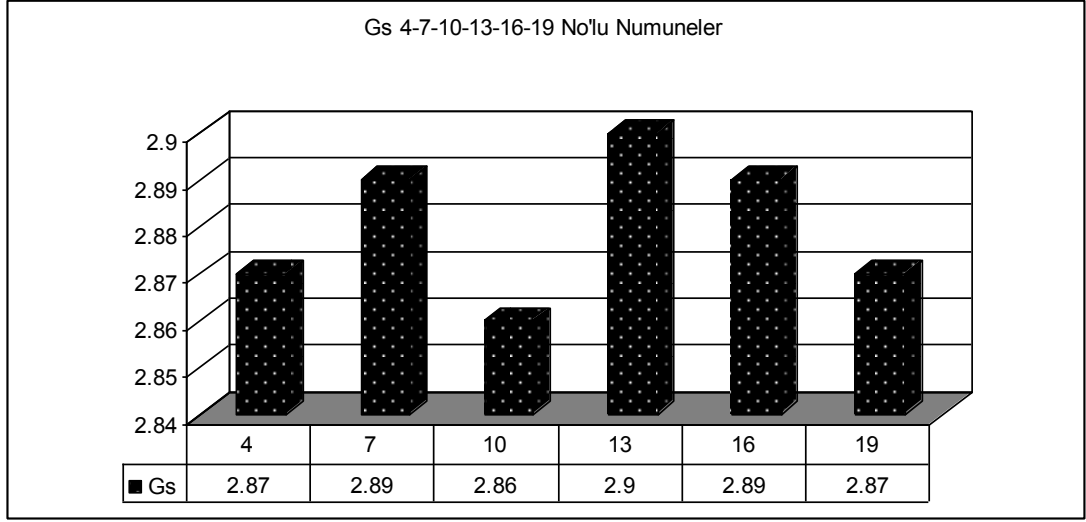
Şekil 7.9 1-14-15-16-17-18-19 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği



Şekil 7.10 2-5-8-11-14-17 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği



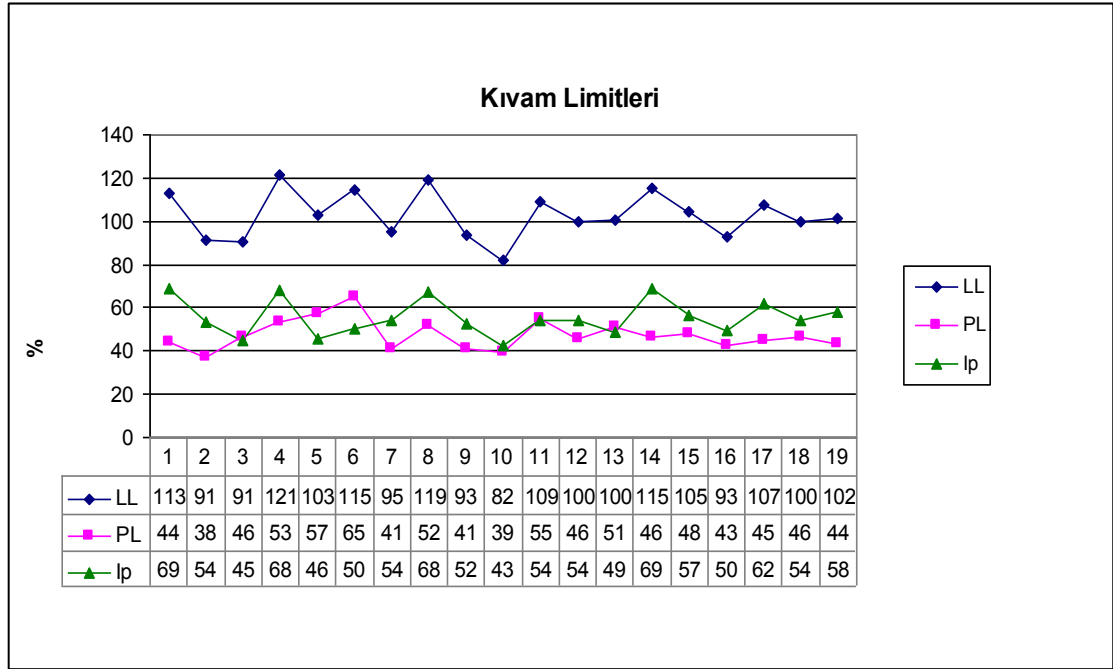
Şekil 7.11 3-6-9-12-15-18 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği



Şekil 7.12 4-7-10-13-16-19 No'lu numunelerin özgül yoğunluk grafiği

7.2 Karışımların Kıvam Limitleri

Kil numunesi ve katkı malzemeleri karıştırılarak yapılan likit limit ve plastik limit deney sonuçlarından plastisite indisleri hesaplanmış ve plastisite indisinde en düşük değere %100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit karışımında rastlanmıştır. Genel olarak bakıldığında katkı malzemeleri eklendiğinde plastik limitin düştüğü gözlemlenmiştir. Şekil 7.13'te likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişkisi verilmektedir.



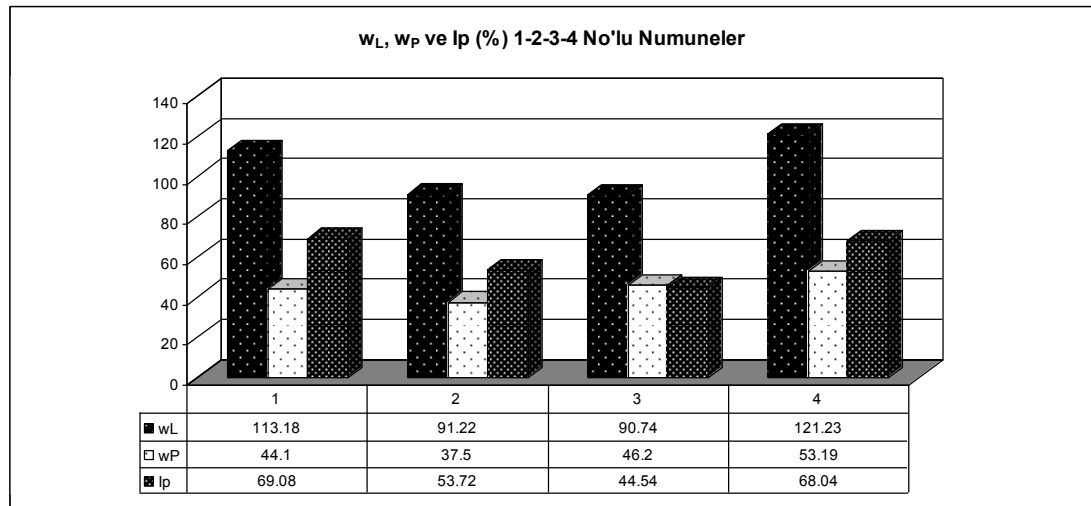
Şekil 7.13 Likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği

%100 Kil'e göre YFC katkısı plastisite indislerini düşürmüştür. En düşük plastisite indisi %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.14). %100 Kil'e göre YFC ve YFC + Kireç katkıları plastisite indislerini düşürmüştür. %100 Kil + YFC katkılı karışımlara göre %5 ve %15 YFC katkılı karışımlara kireç katkısı plastisite indislerini düşürmüştür. En düşük plastisite indisi %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.15).

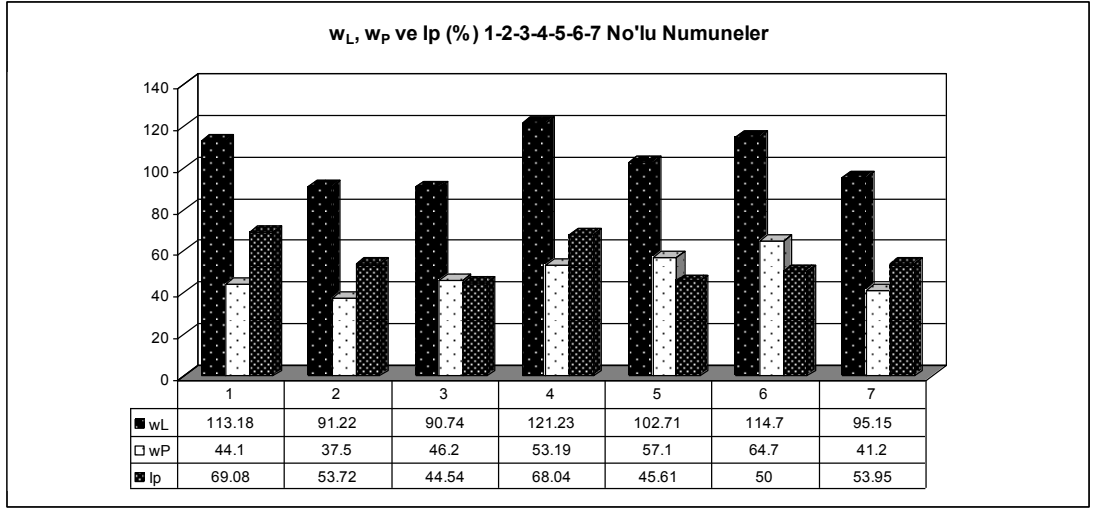
%100 Kil'e göre YFC + Zeolit katkıları plastisite indislerini düşürmüştür. %100 Kil + YFC katkılı karışımlara göre %15 Zeolit katkısı plastisite indisini düşürmüştür. En düşük plastisite indisi %100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit karışımında görülmüştür (Şekil 7.16). %100 Kil'e göre YFC + Zeolit + Kireç katkıları plastisite indislerini düşürmüştür. %100 Kil + YFC katkılı karışımlara göre %15 Zeolit katkılı karışımlara kireç katkısı plastisite indisini düşürmüştür. En düşük plastisite indisi %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.17). %100 Kil + YFC + Zeolit katkılı karışımlara göre %5 Zeolit katkılı karışıma kireç katkısı plastisite indisini düşürmüştür. En düşük plastisite indisi %100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit karışımında görülmüştür (Şekil 7.20).

%100 Kil'e göre YFC + UK katkıları plastisite indislerini düşürmüştür. %100 Kil + YFC katkıli karışımlara göre %15 UK katkıli karışımın plastisite indisi düşmüştür. En düşük plastisite indisi %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.18). %100 Kil'e göre YFC + UK + Kireç katkıları plastisite indislerini düşürmüştür. %100 Kil + YFC karışımına göre %15 UK katkıli karışıma kireç katkısı plastisite indisini düşürmüştür. En düşük plastisite indisi %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.19). %100 Kil + YFC + UK katkıli karışımlara göre %5 ve % 10 UK katkıli karışımlara kireç katkısı plastisite indisini düşürmüştür. En düşük plastisite indisi %100 Kil + %15 YFC + %15 UK karışımında görülmüştür (Şekil 7.21).

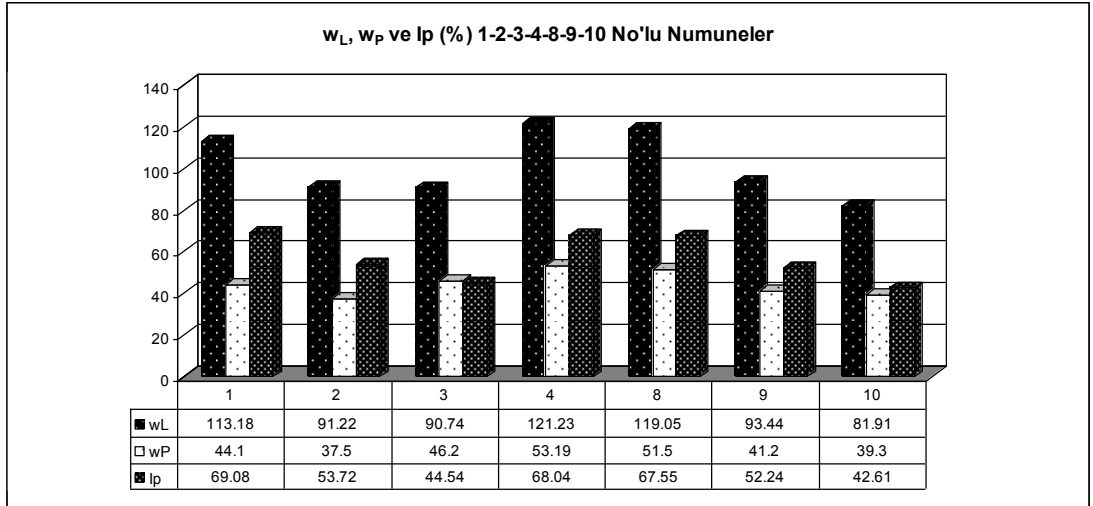
%100 Kil + %5 YFC katkıli karışıma göre kireç katkısı plastisite indisini düşürmüştür ve en düşük plastisite indisi %100 Kil + %5 YFC + %10 Kireç karışımında görülmüştür (Şekil 7.22). %100 Kil + %10 YFC katkıli karışımlara göre en düşük plastisite indisi %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.23). %100 Kil + %15 YFC katkıli karışıma göre kireç, %15 Zeolit, %15 Zeolit + Kireç, %15 Uk ve %15 UK + Kireç katkıları plastisite indisini düşürmüştür. En düşük plastisite indisi %100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit karışımında görülmüştür (Şekil 7.24).



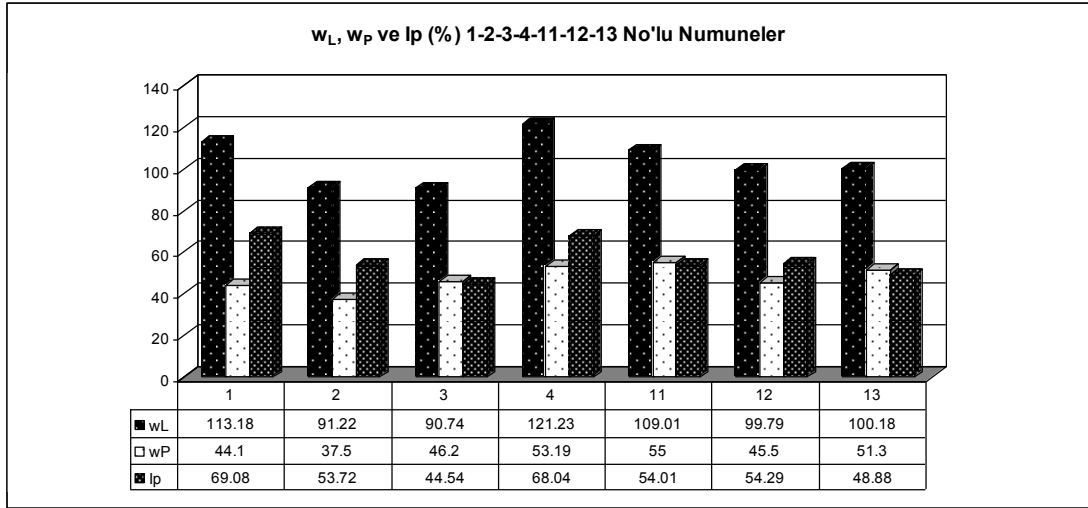
Şekil 7.14 1-2-3-4 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişkisi grafiği



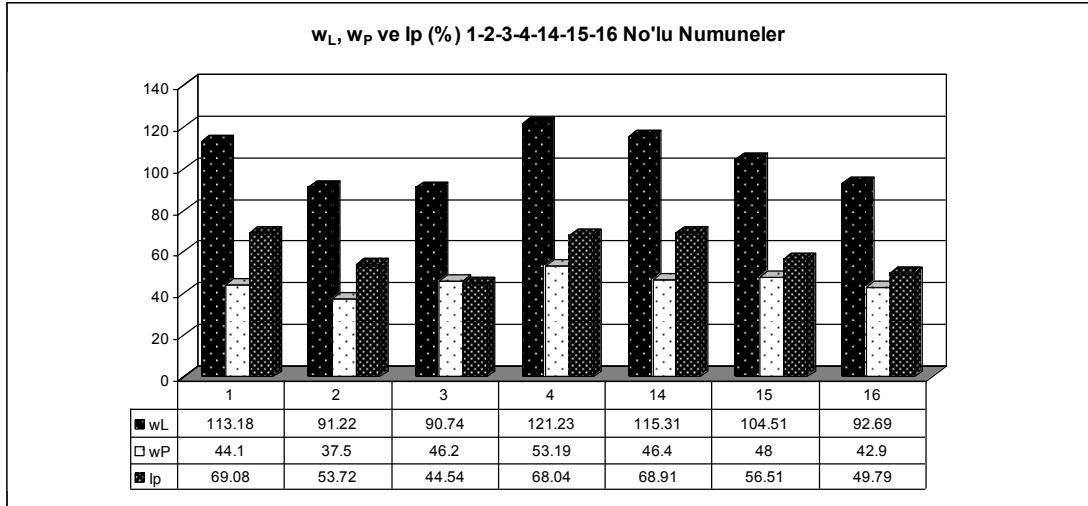
Şekil 7.15 1-2-3-4-5-6-7 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği



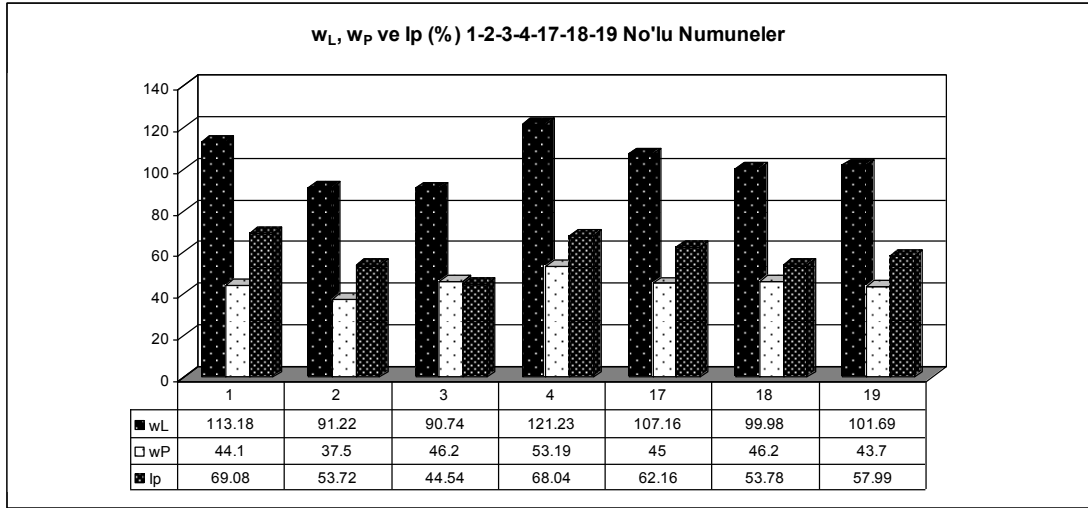
Şekil 7.16 1-2-3-4-8-9-10 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği



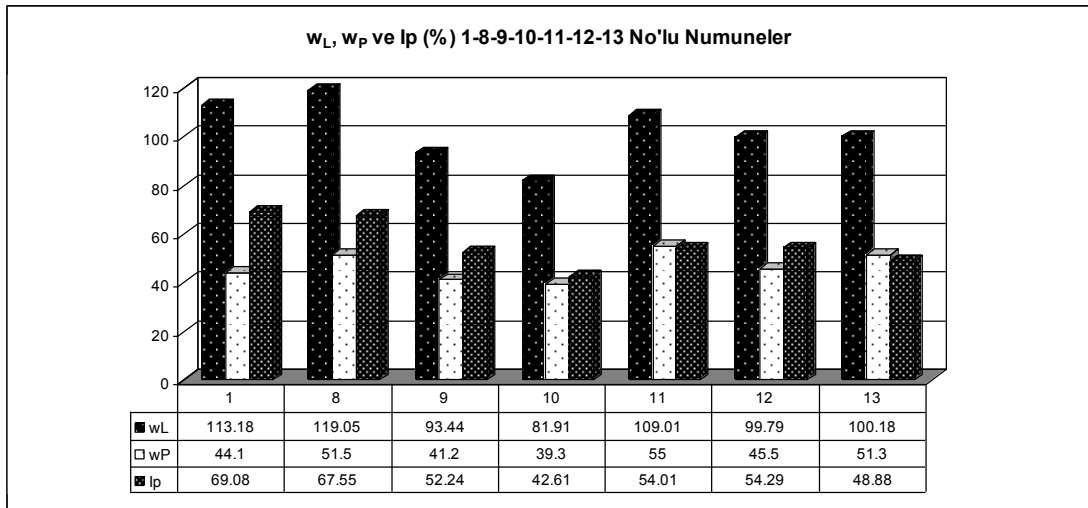
Şekil 7.17 1-2-3-4-11-12-13 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği



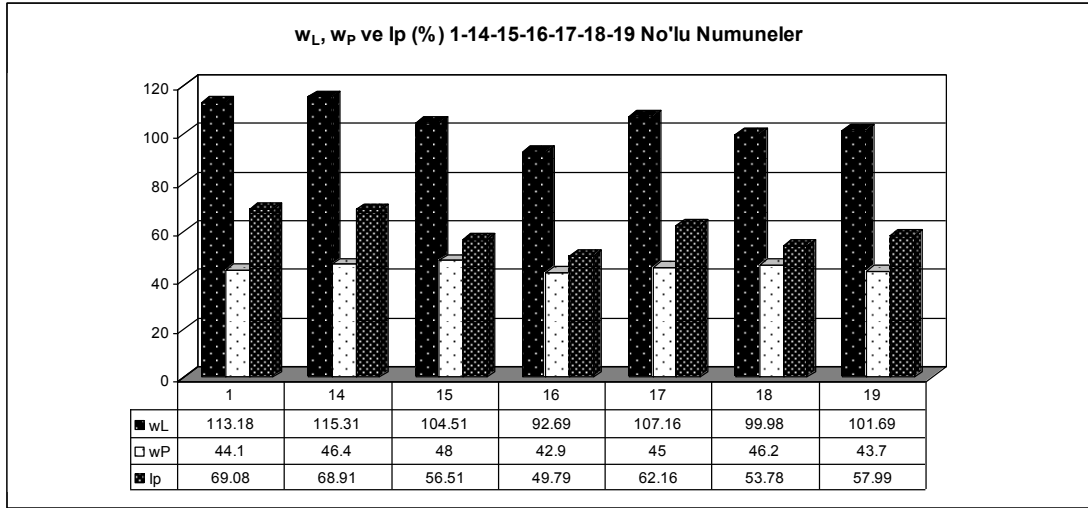
Şekil 7.18 1-2-3-4-14-15-16 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği



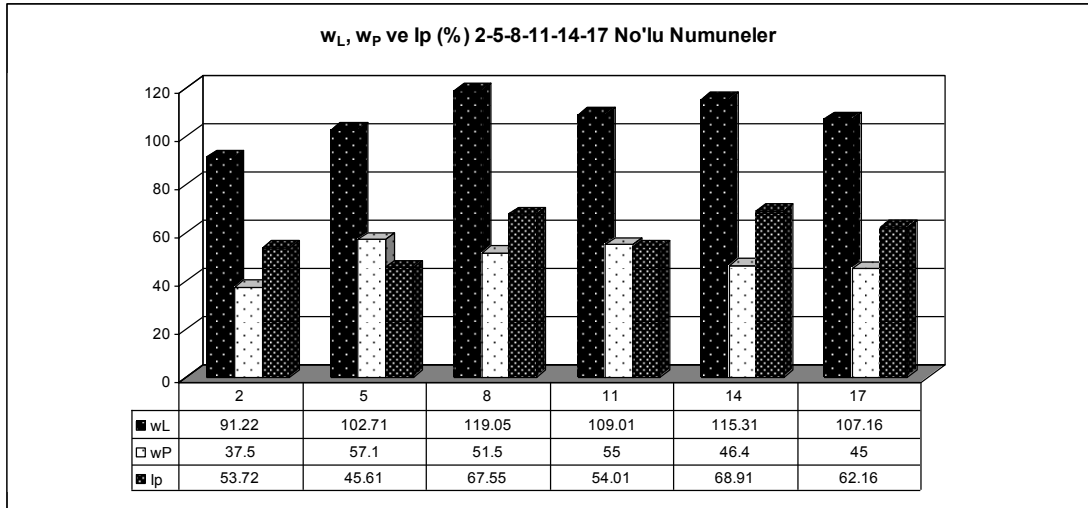
Şekil 7.19 1-2-3-4-17-18-19 NO'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği



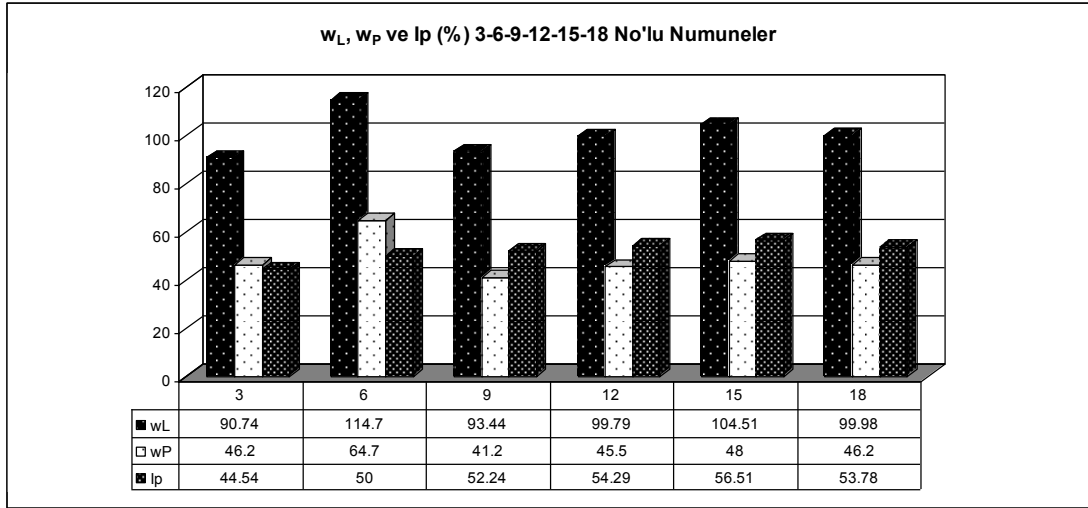
Şekil 7.20 1-8-9-10-11-12-13 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği



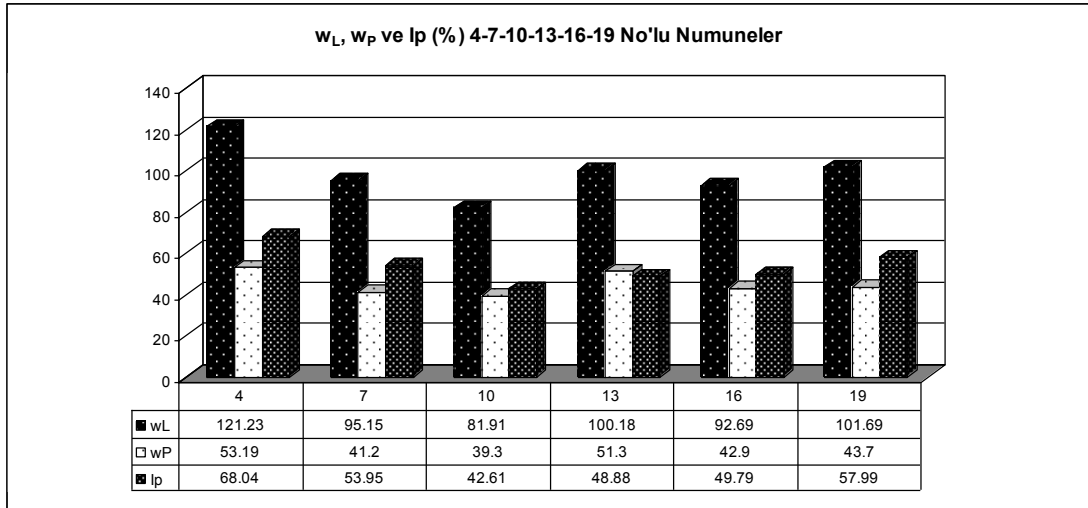
Şekil 7.21 1-14-15-16-17-18-19 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği



Şekil 7.22 2-5-8-11-14-17 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği



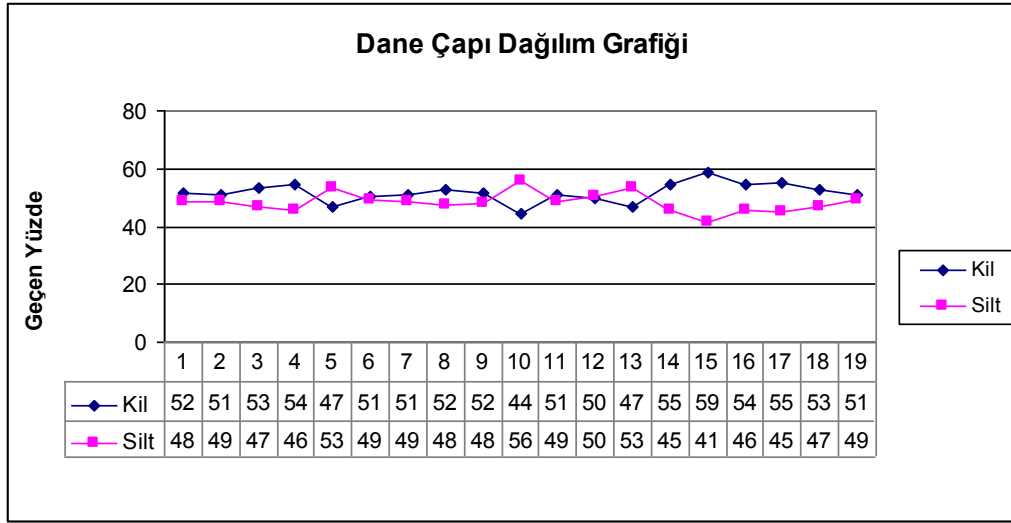
Şekil 7.23 3-6-9-12-15-18 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği



Şekil 7.24 4-7-10-13-16-19 No'lu numunelerin likit limit, plastik limit ve plastisite indisi ilişki grafiği

7.3 Karışımların Tane Çapı Dağılımı

Karışımların tane çapı dağılımı için, sabit sıcaklıktaki ($105\pm 5^{\circ}\text{C}$) etüvde kurutulup %5, %10 ve %15 oranlarında ilave edilerek karışımlar hazırlanmıştır. Şekil 7.25'de hidrometre deney sonuçlarının grafiği verilmiştir. Elde edilen tane çapı dağılımı yüzdelere göre kil oranı genellikle silt oranına göre daha yüksek kalmakla birlikte kil ve silt oranları yakın değerler almıştır.



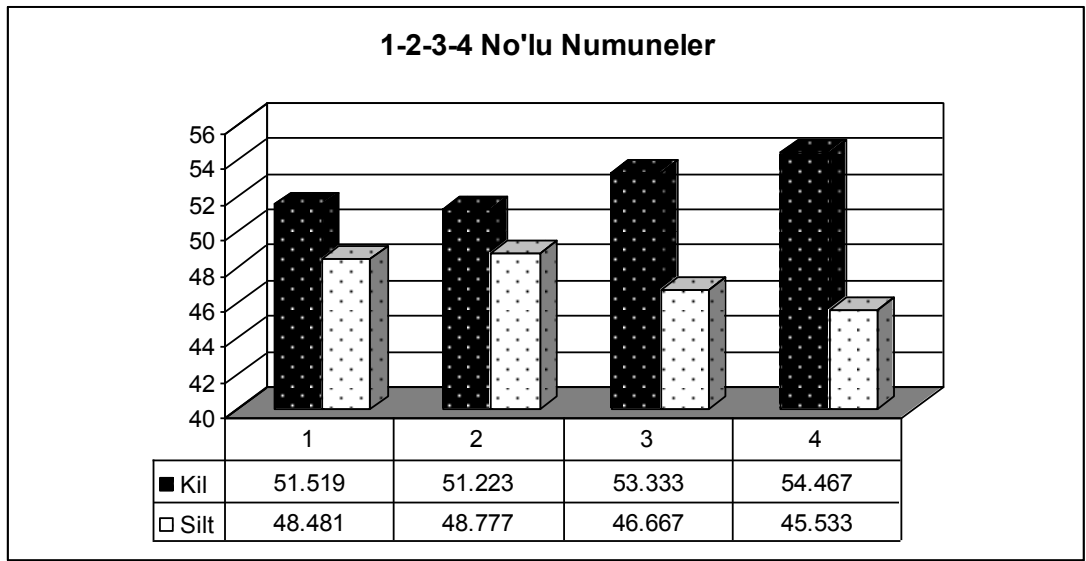
Şekil 7.25 Hidrometre tane çapı dağılım grafiği

YFC oranı arttıkça kil oranı artmış, %100 Kil'e göre ise %10 ve %15 oranlarında kil oranı artmıştır (Şekil 7.26). %100 Kil'e ve %100 Kil + YFC karışımlara göre YFC'ye kireç katkısı kil oranını azaltmış, silt oranını arttırmıştır (Şekil 7.27).

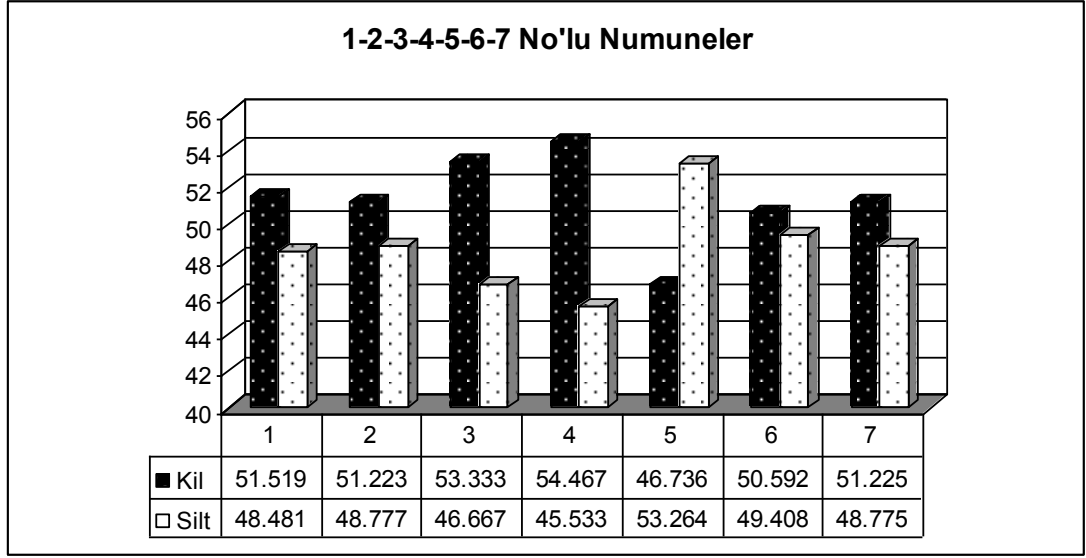
%100 Kil + YFC + Zeolit katkılı karışımlarda zeolit miktarı arttıkça kil oranı azalmış, silt oranı artmıştır. %100 Kil + YFC'li karışımlara göre %10 ve %15 zeolit katkısının kil oranını azalttığı görülmüştür (Şekil 7.28). %100 Kil ve %100 Kil + YFC karışımına göre Zeolit + Kireç katkısı kil oranını düşürmüştür (Şekil 7.29). %100 Kil + YFC + Zeolit katkılı karışımlara göre %5 ve %10 zeolit katkılı karışımlara kireç katkısının kil oranını düşürdüğü görülmüştür (Şekil 7.32).

%100 Kil'e göre UK katkısı kil oranını arttırmıştır. %100 Kil + YFC karışımına göre %5 ve %10 UK katkısının kil oranını arttırdığı görülmüştür (Şekil 7.30). %100 Kil'e göre UK + Kireç katkılı karışımlarda kireç katkısı kil oranını düşürmüştür. %100 Kil + YFC karışımına göre %10 ve %15 UK katkılı %100 Kil + YFC + UK + Kireç karışımlarında kil oranı düşmüştür (Şekil 7.31). %100 Kil + YFC + UK katkılı karışımlara göre %10 ve %15 UK katkılı karışımlara kireç katkısının kil oranını düşürdüğü görülmüştür (Şekil 7.33).

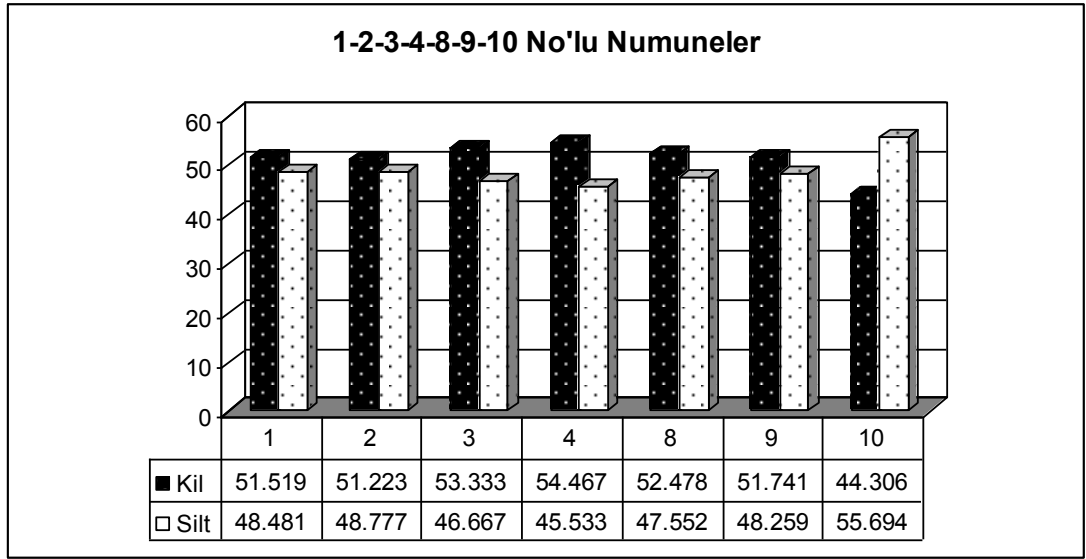
%100 Kil + %5 YFC katkıli karışıma göre kireç ve %5 Zeolit + Kireç katkısi kil oranını azaltmış, zeolit, %5 UK ve %5 UK + Kireç katkıları kil oranını arttırmıştır (Şekil 7.34). %100 Kil + %10 YFC katkıli karışıma göre kireç, %10 Zeolit, %10 Zeolit + Kireç ve %10 UK + Kireç katkıli karışımlarda kil oranı azalmış, %10 UK katkıli karışımda kil oranı artmıştır (Şekil 7.35). %100 Kil % %15 YFC katkıli karışıma göre kireç, %15 Zeolit, %15 Zeolit + Kireç, %15 UK ve %15 UK + Kireç katkıli karışımlarda kil oranı azalmıştır (Şekil 7.36).



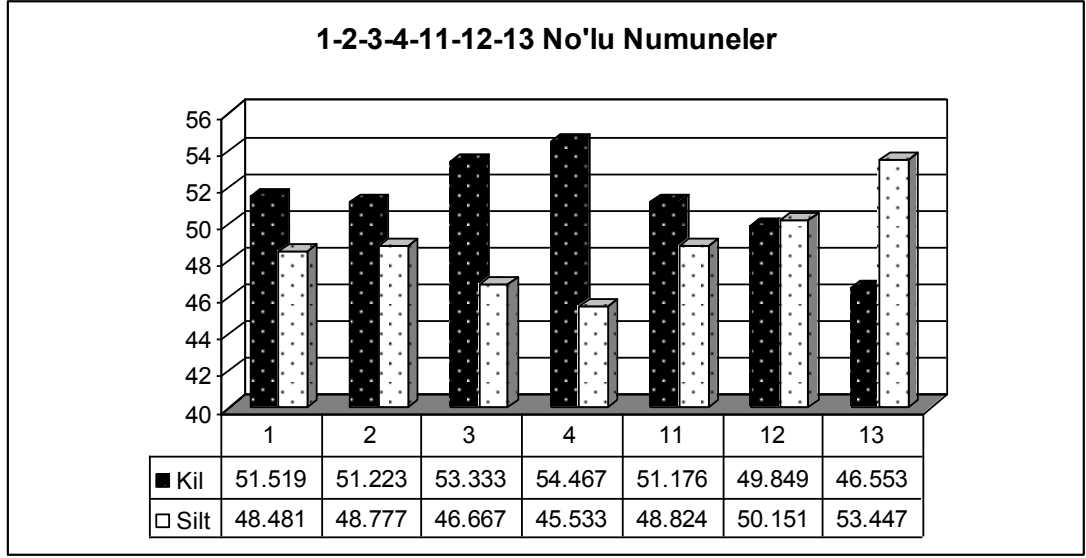
Şekil 7.26 1-2-3-4 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı grafiği



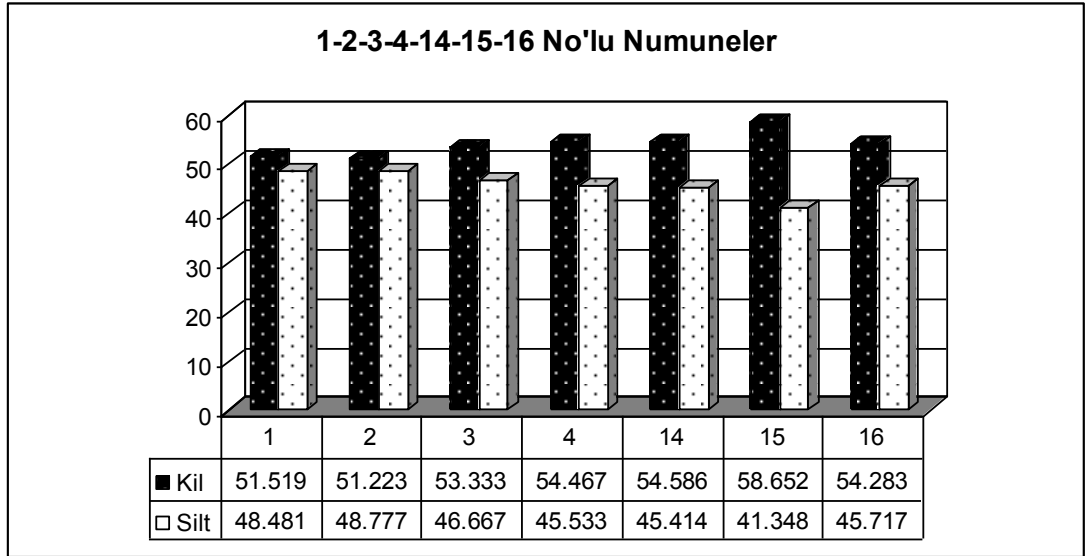
Şekil 7.27 1-2-3-4-5-6-7 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı grafiği



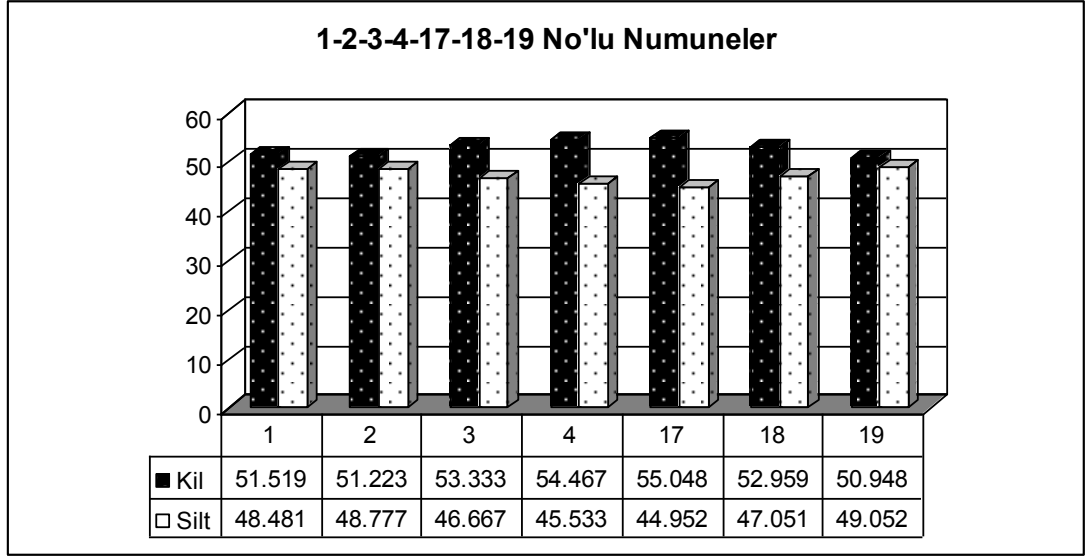
Şekil 7.28 1-2-3-4-8-9-10 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı grafiği



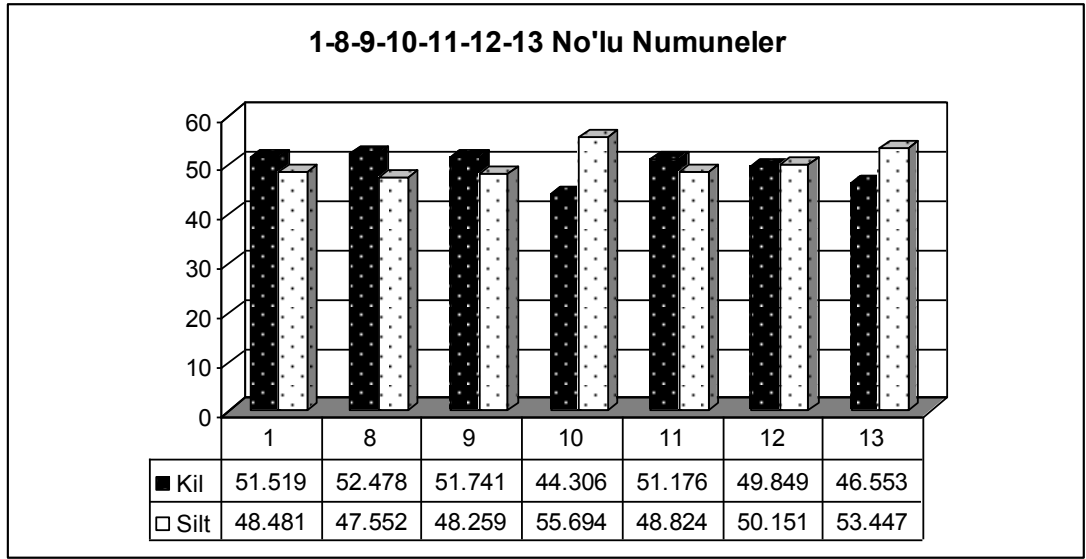
Şekil 7.29 1-2-3-4-11-12-13 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı grafiği



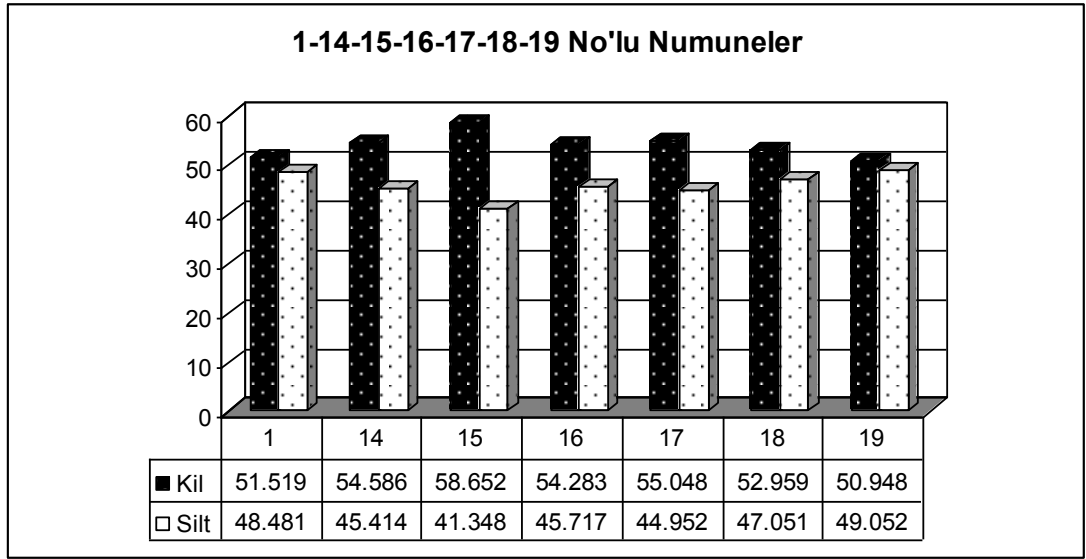
Şekil 7.30 1-2-3-4-14-15-16 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı grafiği



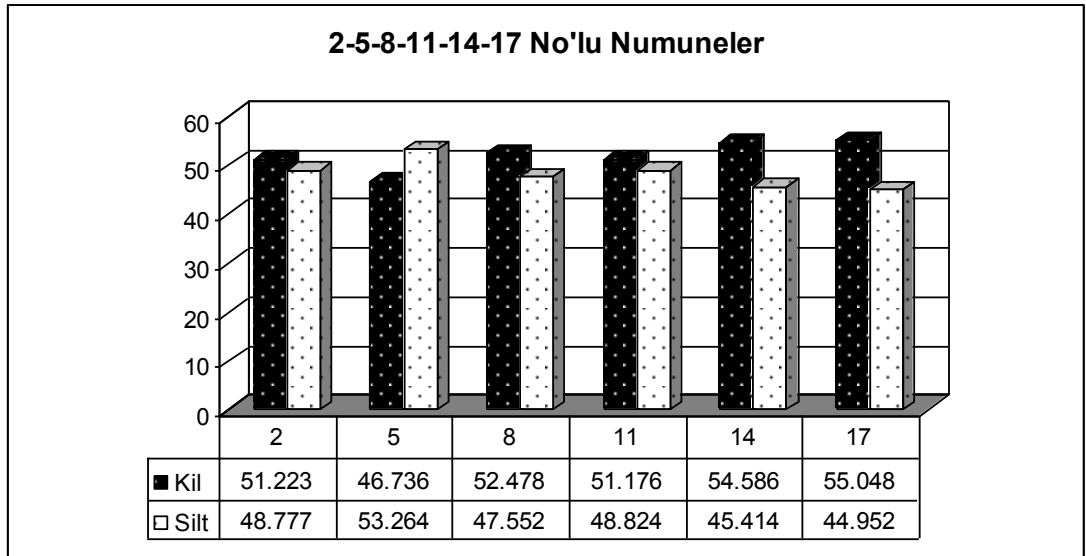
Şekil 7.31 1-2-3-4-17-18-19 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı grafiği



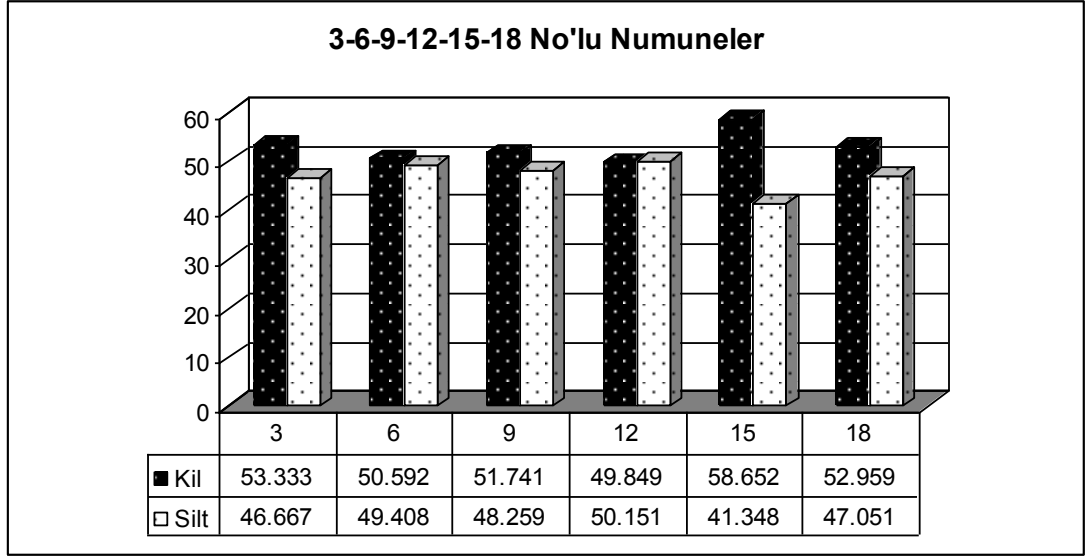
Şekil 7.32 1-8-9-10-11-12-13 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı grafiği



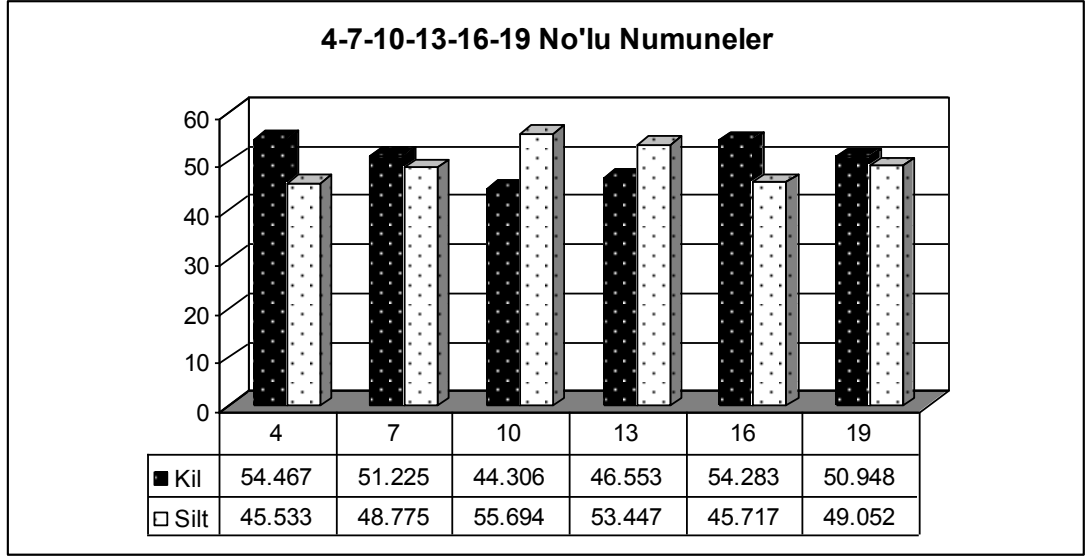
Şekil 7.33 1-14-15-16-17-18-19 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı grafiği



Şekil 7.34 2-5-8-11-14-17 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı grafiği



Şekil 7.35 3-6-9-12-15-18 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı grafiği



Şekil 7.36 4-7-10-13-16-19 No'lu numunelerin hidrometre tane çapı dağılımı grafiği

7.4 Karışımların Zemin Sınıflandırması

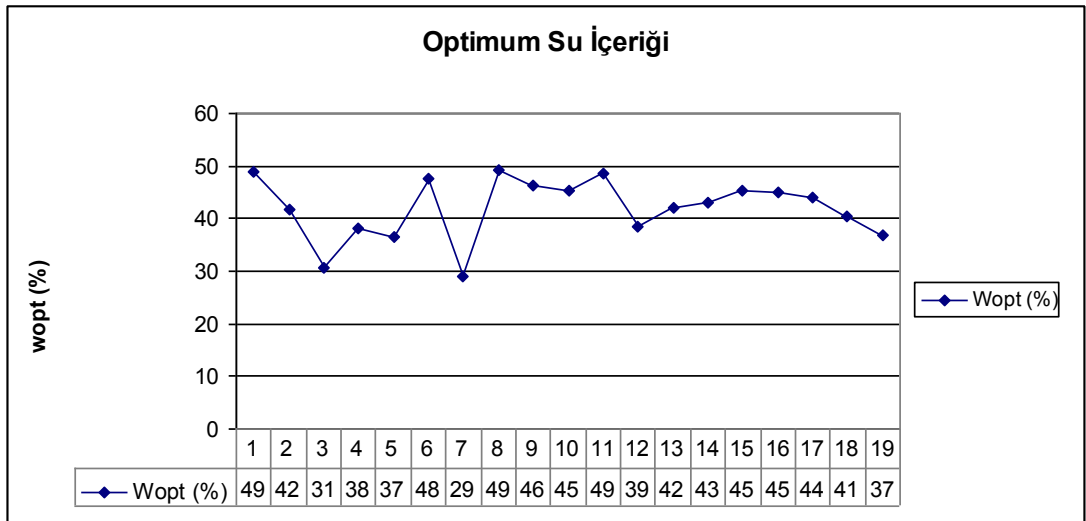
Bentonit kilinin zemin sınıfı TS 1500/2000'e göre CH yüksek plastisiteli kil zemin olduğu belirlenmiştir. Kil numune katkı malzemeleri ilave edilince %100 Kil + %5 YFC + %10 Kireç, %100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit, %100 Kil + %10 YFC + %10 Zeolit + %10 Kireç ve %100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit + %10 Kireç

karışımlarında MH yüksek plastisiteli silt, diğerlerinde CH yüksek plastisiteli kil olduğu tespit edilmiştir.

7.5 Karışımların Kompaksiyon Özellikleri

Karışımlardan en düşük optimum su içeriği değeri %100 Kil + %15 YFC + %10 Kireç karışımından elde edilmiştir (Şekil 7.37).

Karışımlar üzerinde yapılan kompaksiyon deneyinde en yüksek kuru birim hacim ağırlık %100 Kil + %10 YFC ve %100 Kil + %15 YFC’de elde edilmiştir (Şekil 7.49).



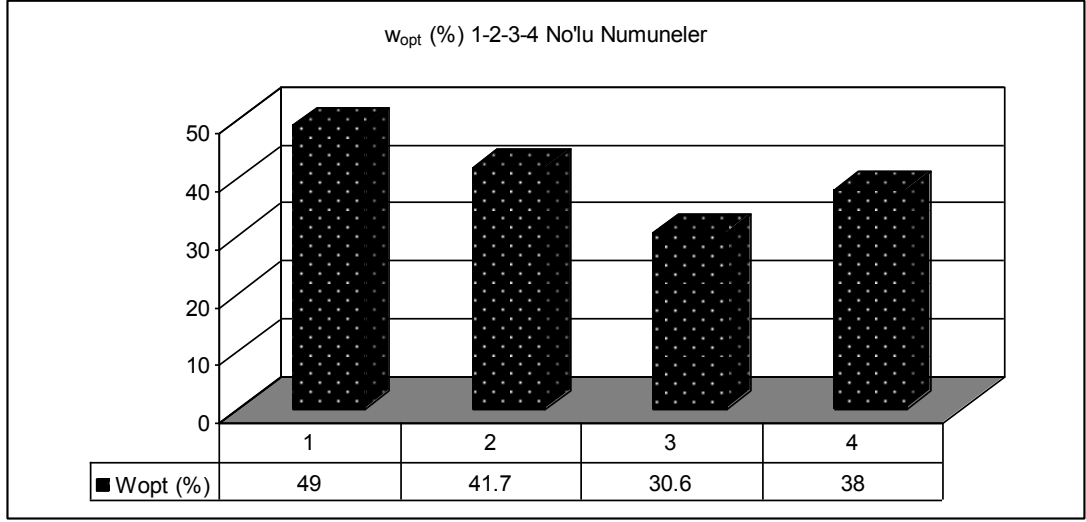
Şekil 7.37 Karışımların optimum su içeriği grafiği

%100 Kil’e göre YFC katkısı su içeriklerini düşürmüştür. En düşük su içeriğine %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.38). %100 Kil’e göre YFC ve YFC + Kireç katkıları su içeriklerini düşürmüştür. %100 Kil + YFC karışımlarına göre %5 ve %15 YFC katkılı karışıma kireç katkısı su içeriklerini düşürmüştür. En düşük su içeriği %100 Kil + %15 YFC + %10 Kireç karışımında görülmüştür (Şekil 7.39).

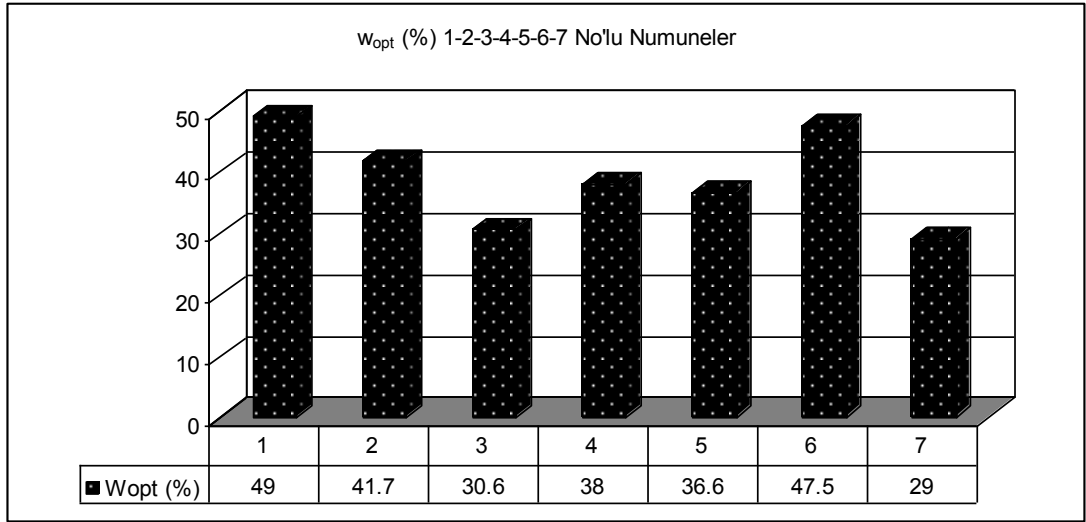
%100 Kil'e göre %10 ve %15 YFC + Zeolit katkıları su içeriklerini düşürmüştür. En düşük su içeriği %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.40). %100 Kil'e göre YFC + Zeolit + Kireç katkıları su içeriklerini düşürmüştür. En düşük su içeriği %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.41). %100 Kil + YFC + Zeolit karışımlarına göre kireç katkısı su içeriklerini düşürmüştür (Şekil 7.44).

%100 Kil'e göre YFC + UK katkıları su içeriklerini düşürmüştür. En düşük su içeriğine %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.42). %100 Kil'e göre YFC + UK + Kireç katkıları su içeriklerini düşürmüştür. %100 Kil + YFC karışımına göre %15 UK katkılı karışıma kireç katkısı su içeriğini düşürmüştür. En düşük su içeriği %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.43). %100 Kil + YFC + UK karışımlarına göre %10 ve %15 UK katkılı karışımlara kireç katkısı su içeriklerini düşürmüştür (Şekil 7.45).

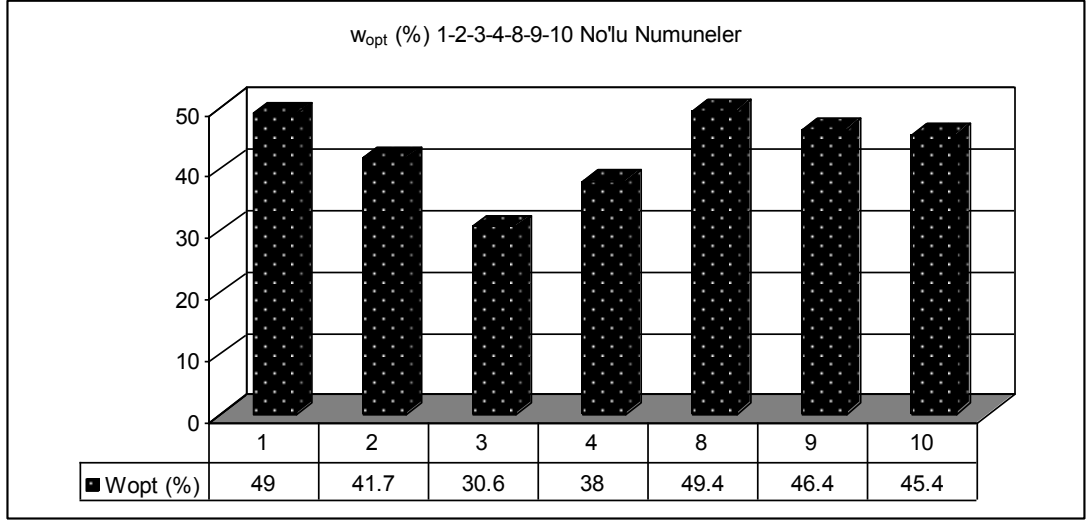
%100 Kil + %5 YFC karışımına göre kireç katkısı su içeriğini düşürmüştür. En düşük su içeriği %100 Kil + %5 YFC + %10 Kireç karışımında görülmüştür (Şekil 7.46). %100 Kil + %10 YFC katkılı karışımlarda en düşük su içeriği %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.47). %100 Kil + %15 YFC karışımına göre kireç ve %15 UK + Kireç katkıları su içeriğini düşürmüştür. En düşük su içeriğine %100 Kil + %15 YFC + %10 Kireç karışımında görülmüştür (Şekil 7.48).



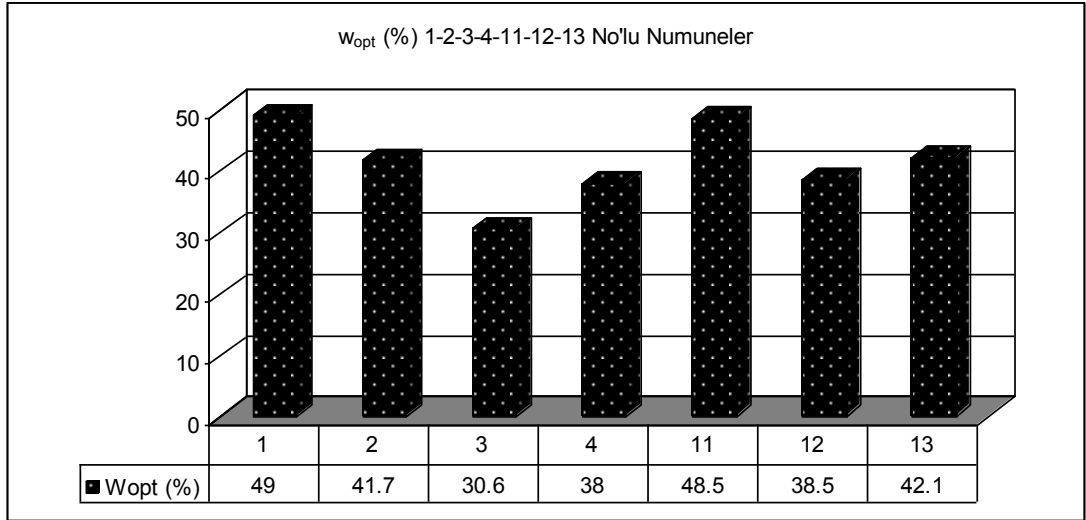
Şekil 7.38 1-2-3-4 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği



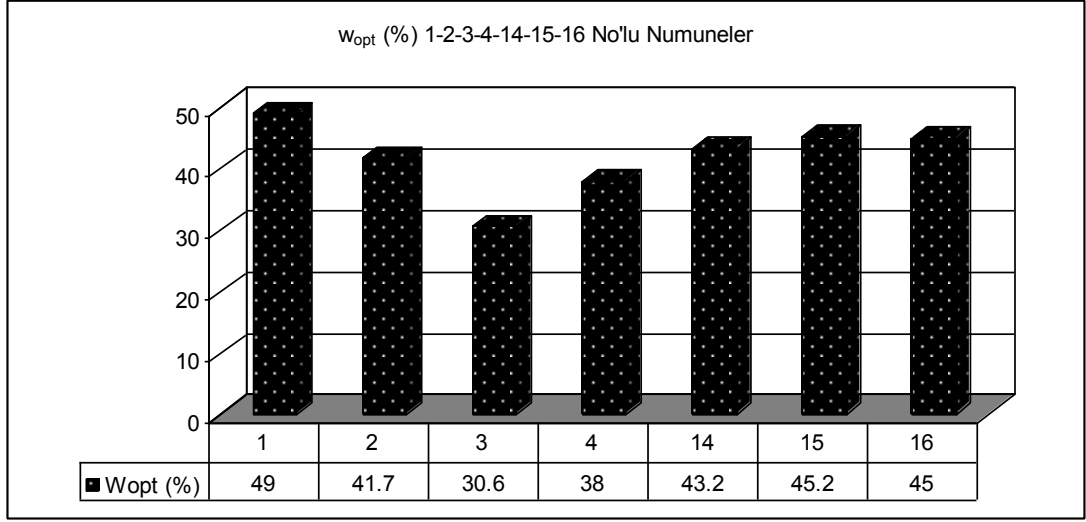
Şekil 7.39 1-2-3-4-5-6-7 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği



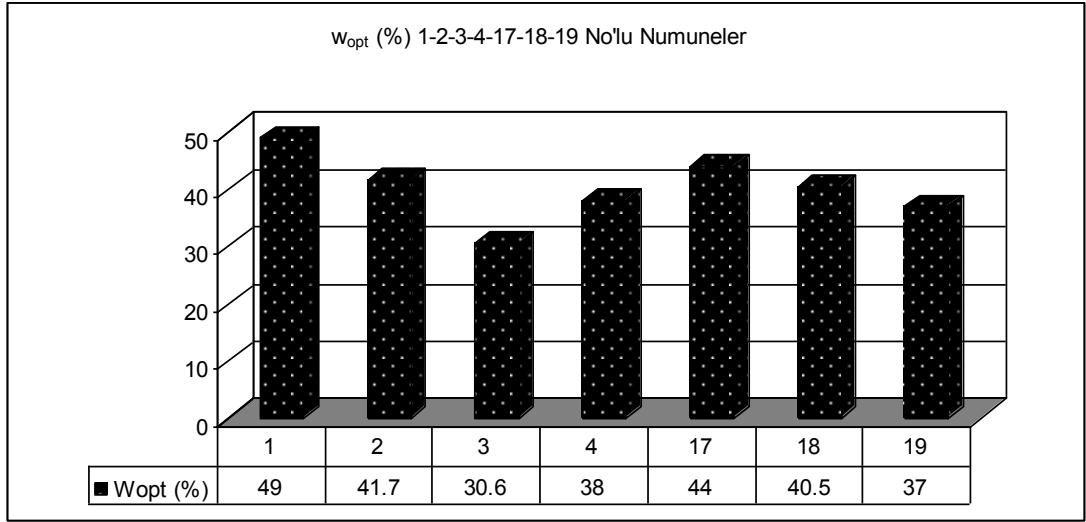
Şekil 7.40 1-2-3-4-8-9-10 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği



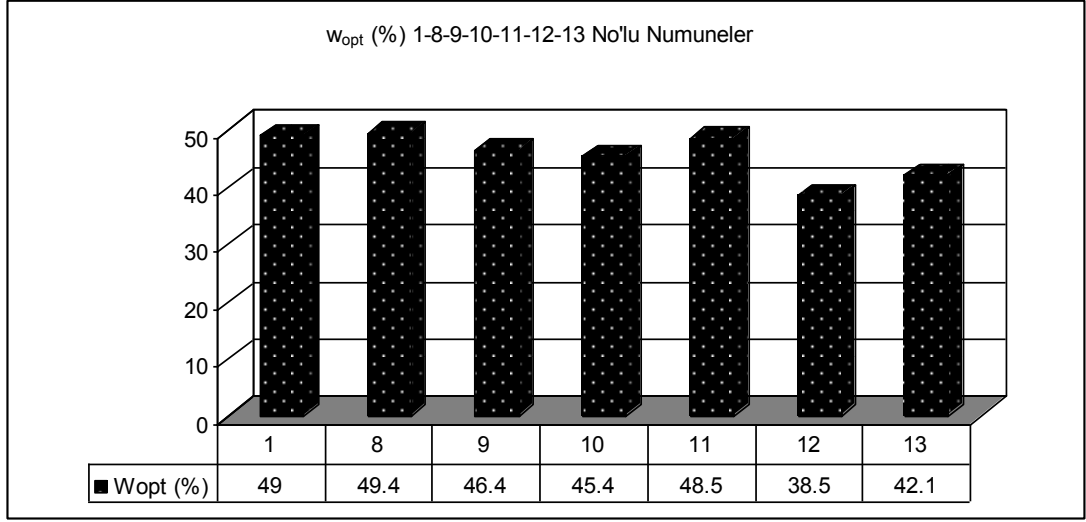
Şekil 7.41 1-2-3-4-11-12-13 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği



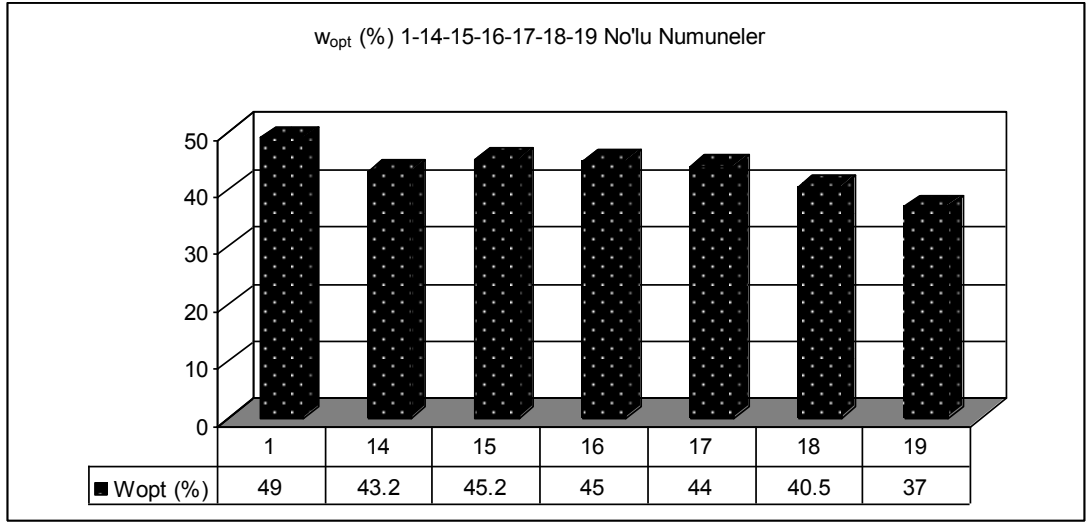
Şekil 7.42 1-2-3-4-14-15-16 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği



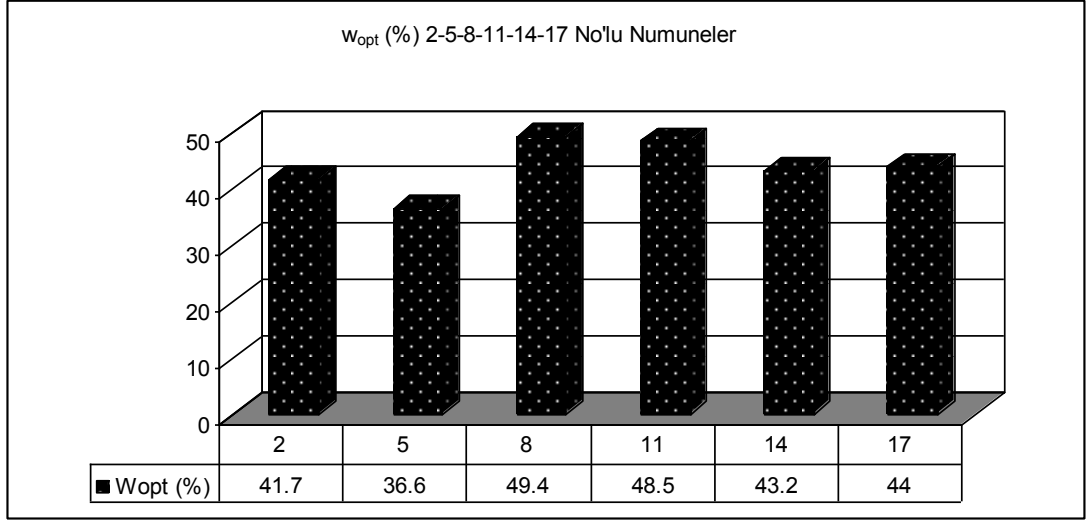
Şekil 7.43 1-2-3-4-17-18-19 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği



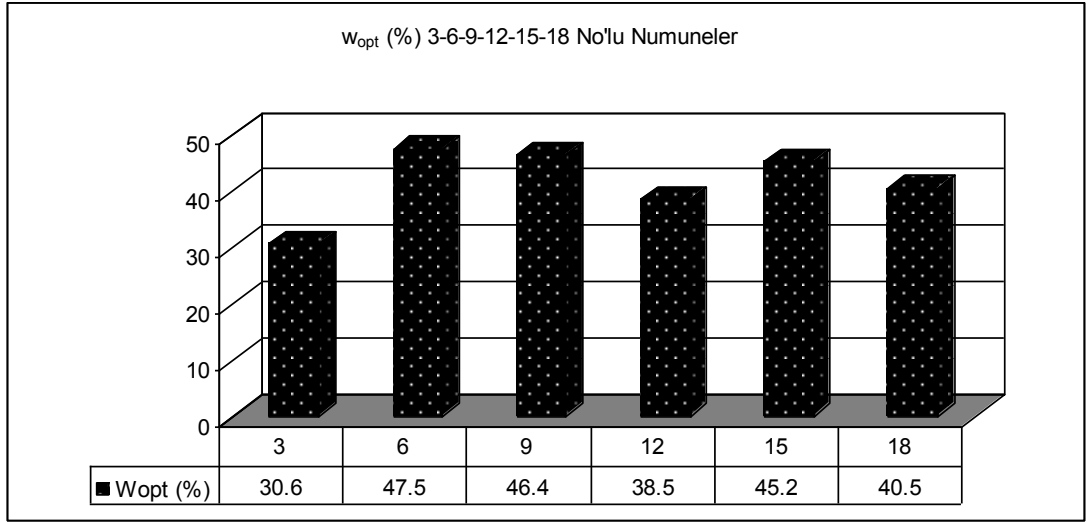
Şekil 7.44 1-8-9-10-11-12-13 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği



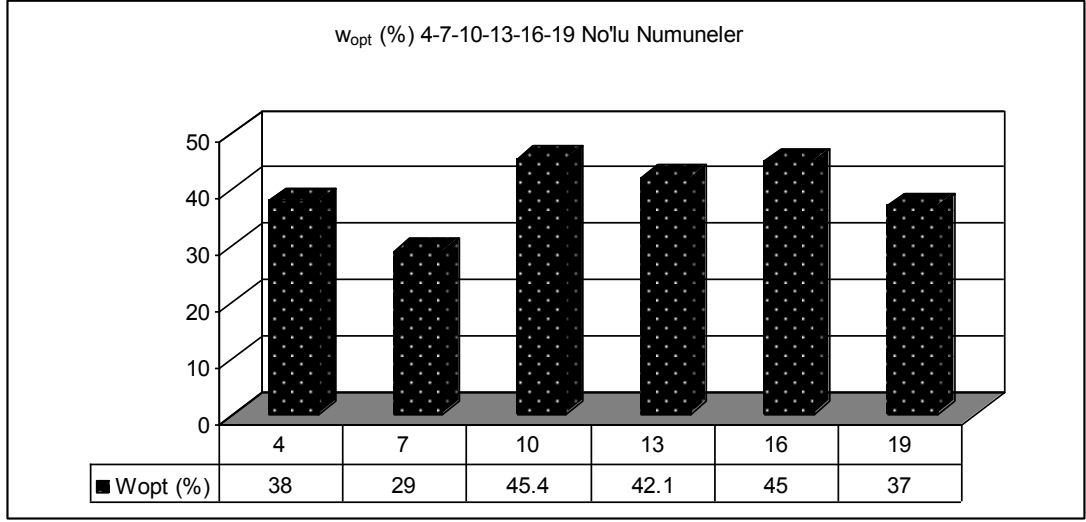
Şekil 7.45 1-14-15-16-17-18-19 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği



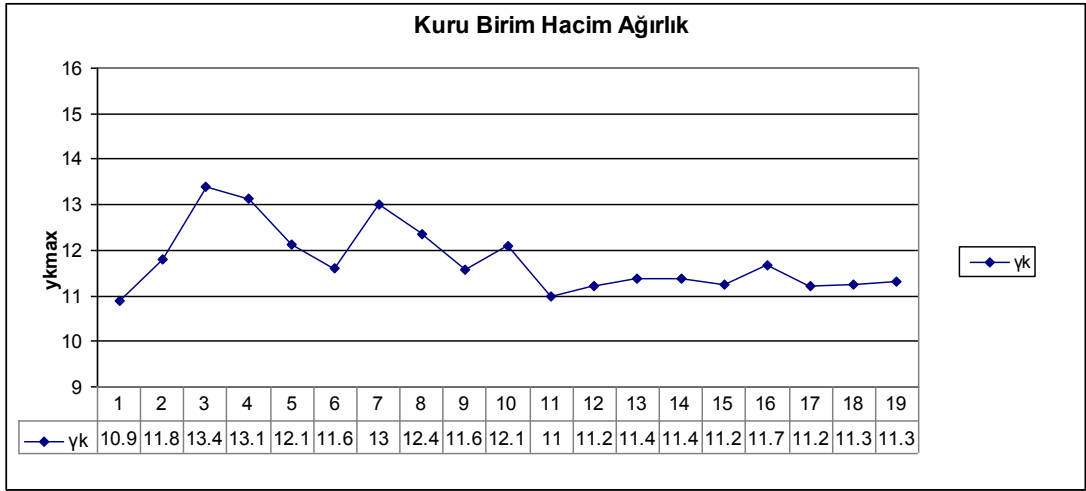
Şekil 7.46 2-5-8-11-14-17 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği



Şekil 7.47 3-6-9-12-15-18 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği



Şekil 7.48 4-7-10-13-16-19 No'lu numunelerin optimum su içeriği grafiği



Şekil 7.49 Karışımların kuru birim hacim ağırlık grafiği

Zeolit ve YFC katkılı karışımların, uçucu kül ve YFC katkılı karışımlara göre kuru birim hacim ağırlığı ve optimum su içerikleri genel olarak artmıştır.

Karışımlarda %10 kireç katkısı karışımların, kuru birim hacim ağırlıklarını genel olarak düşürmüştür.

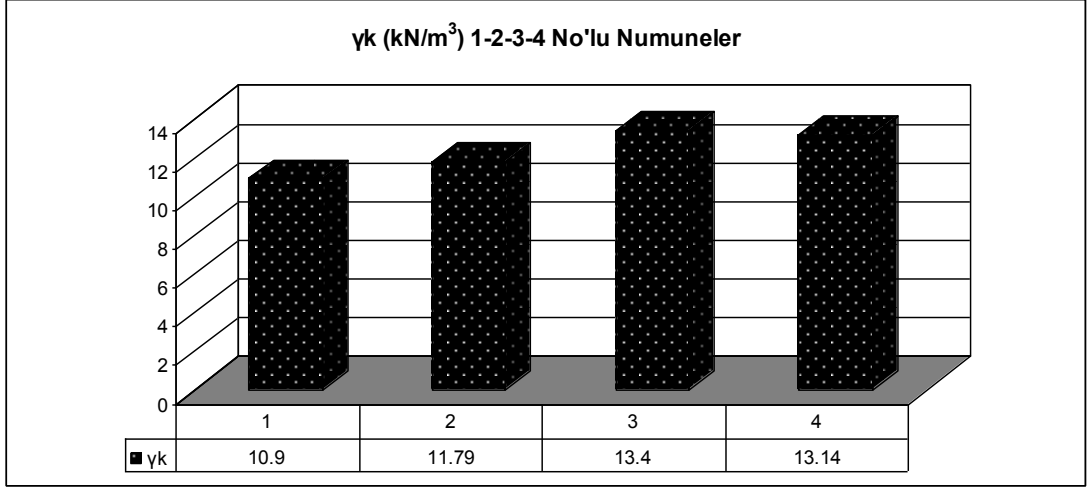
%100 Kil'e göre YFC katkısı kuru birim hacim ağırlıklarını arttırmıştır. En yüksek kuru birim hacim ağırlık %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.50). %100 Kil'e göre YFC ve YFC + Kireç katkıları kuru birim hacim ağırlıkları arttırmıştır. %100 Kil + YFC karışımına göre %5 YFC katkılı karışıma

kireç katkısı kuru birim hacim ağırlığı arttırmıştır. En yüksek kuru birim hacim ağırlık %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.51).

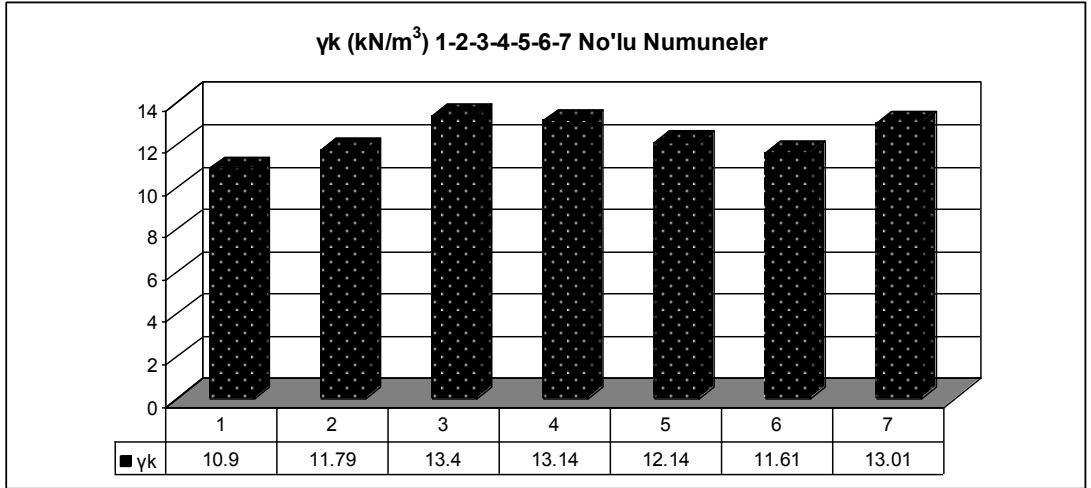
%100 Kil'e göre YFC + Zeolit katkıları kuru birim hacim ağırlığı arttırmıştır. %100 Kil + YFC karışımına göre %5 Zeolit katkısı kuru birim hacim ağırlığı arttırmıştır. En yüksek kuru birim hacim ağırlık %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.52). %100 Kil'e göre YFC + Zeolit + Kireç katkıları kuru birim hacim ağırlıkları arttırmıştır. En yüksek kuru birim hacim ağırlık %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.53). %100 Kil + YFC + Zeolit karışımlarına göre kireç katkısı kuru birim hacim ağırlıkları düşürmüştür (Şekil 7.56).

%100 Kil'e göre YFC + UK katkıları kuru birim hacim ağırlıkları arttırmıştır. En yüksek kuru birim hacim ağırlık %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.54). %100 Kil'e göre YFC + UK + Kireç katkıları kuru birim hacim ağırlıkları arttırmıştır. En yüksek kuru birim hacim ağırlık %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.55). %100 Kil + YFC + UK karışımlarına göre %10 UK katkılı karışımlara kireç katkısı kuru birim hacim ağırlıkları arttırmıştır (Şekil 7.57).

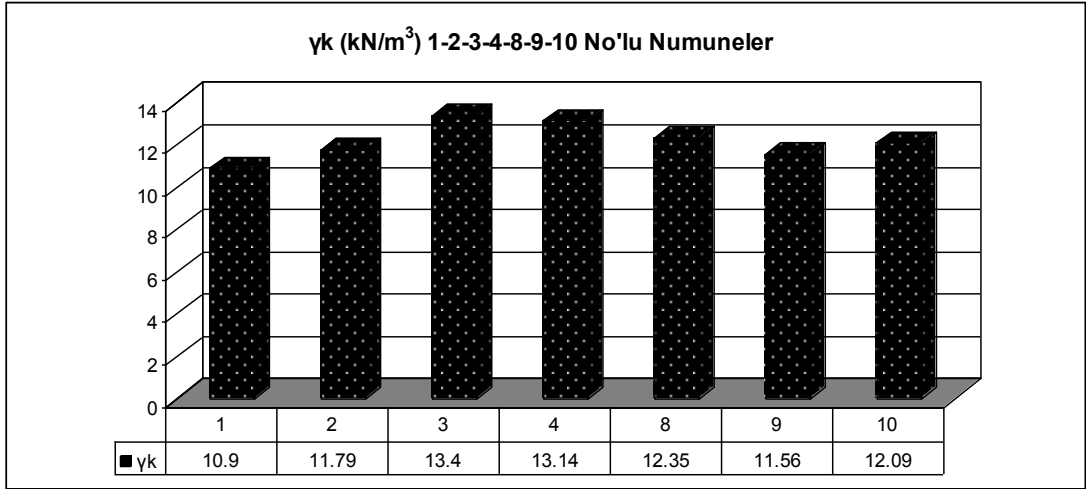
%100 Kil + %5 YFC karışımına göre kireç ve %5 Zeolit katkıları kuru birim hacim ağırlıkları arttırmıştır. En yüksek kuru birim hacim ağırlık %100 Kil + %5 YFC + %5 Zeolit karışımında görülmüştür (Şekil 7.58). %100 Kil + %10 katkılı karışımlarda en yüksek kuru birim hacim ağırlık %100 Kil + %10 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.59). %100 Kil + %15 YFC katkılı karışımlarda en yüksek kuru birim hacim ağırlık %100 Kil + % 15 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.60).



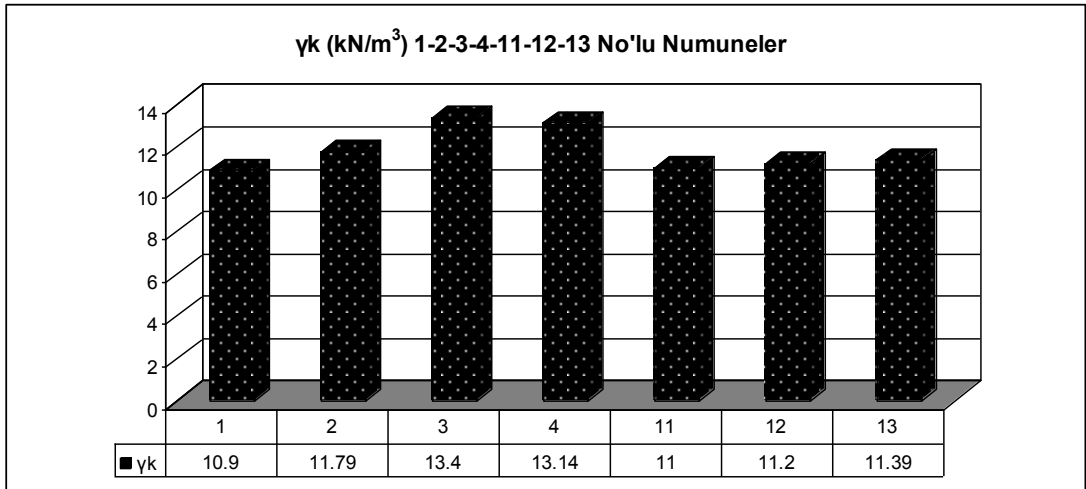
Şekil 7.50 1-2-3-4 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği



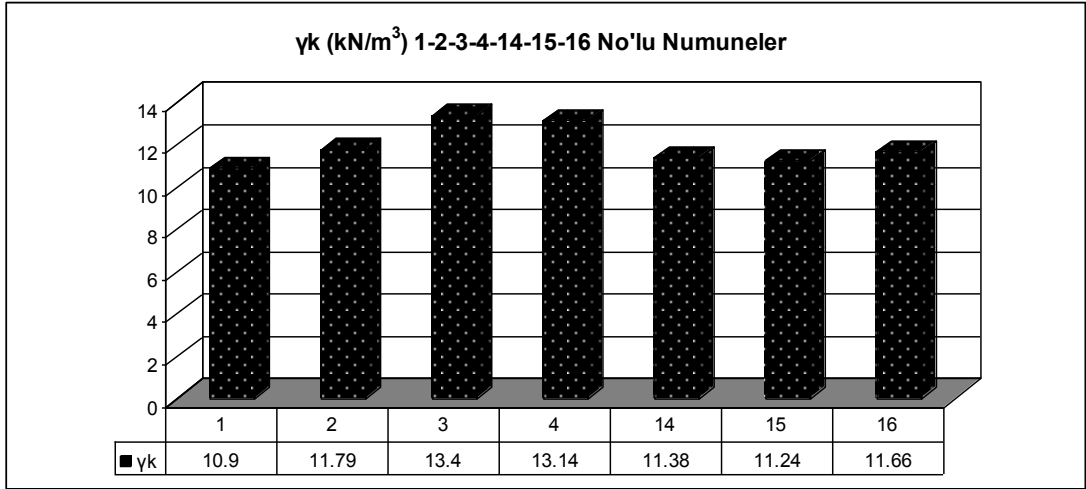
Şekil 7.51 1-2-3-4-5-6-7 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği



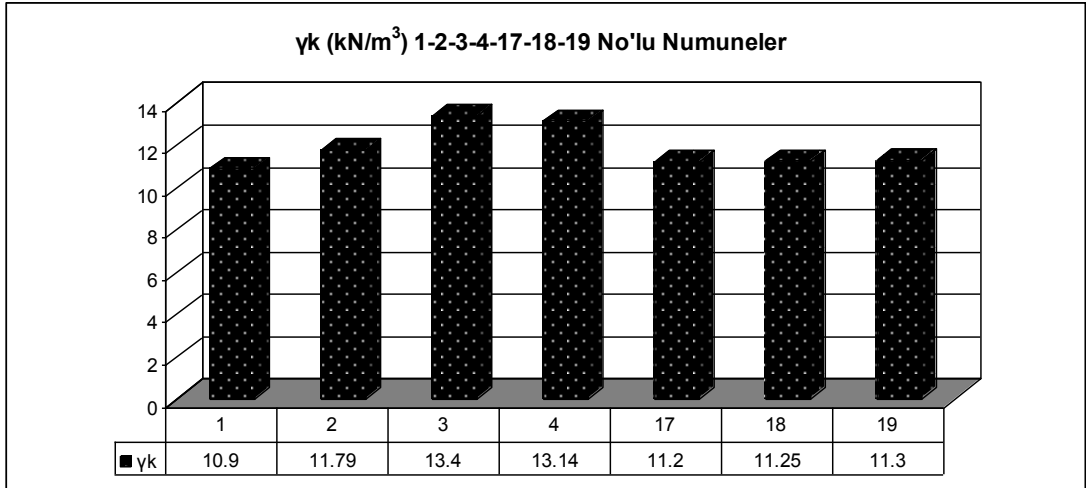
Şekil 7.52 1-2-3-4-8-9-10 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği



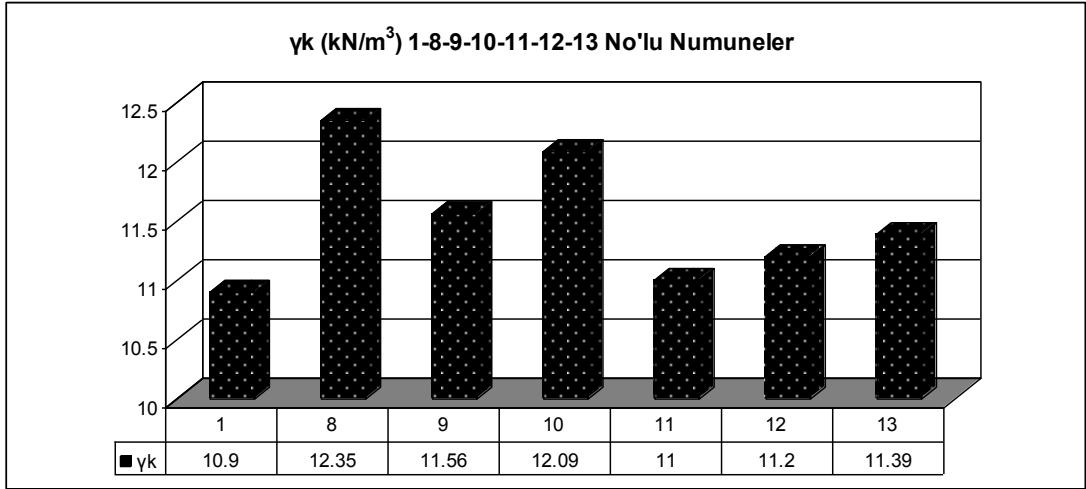
Şekil 7.53 1-2-3-4-11-12-13 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği



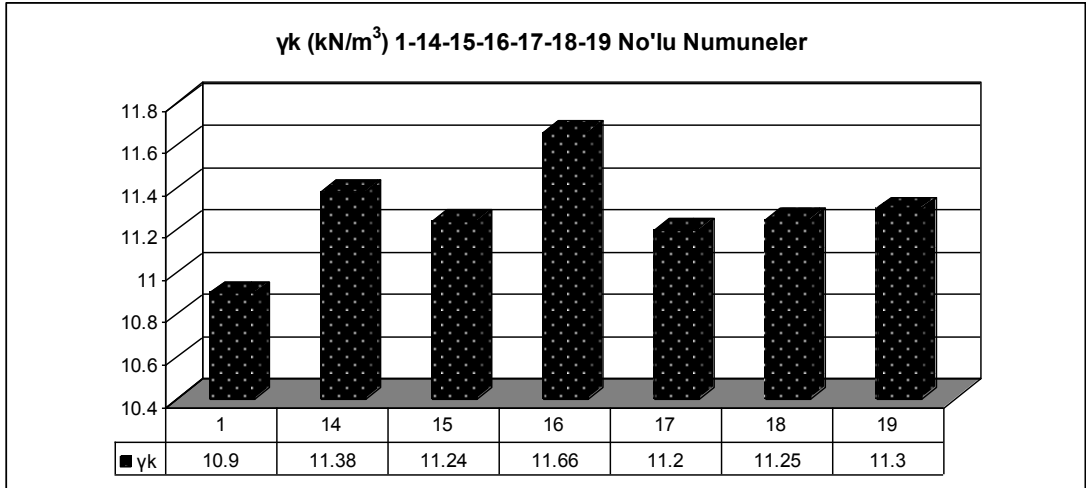
Şekil 7.54 1-2-3-4-14-15-16 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği



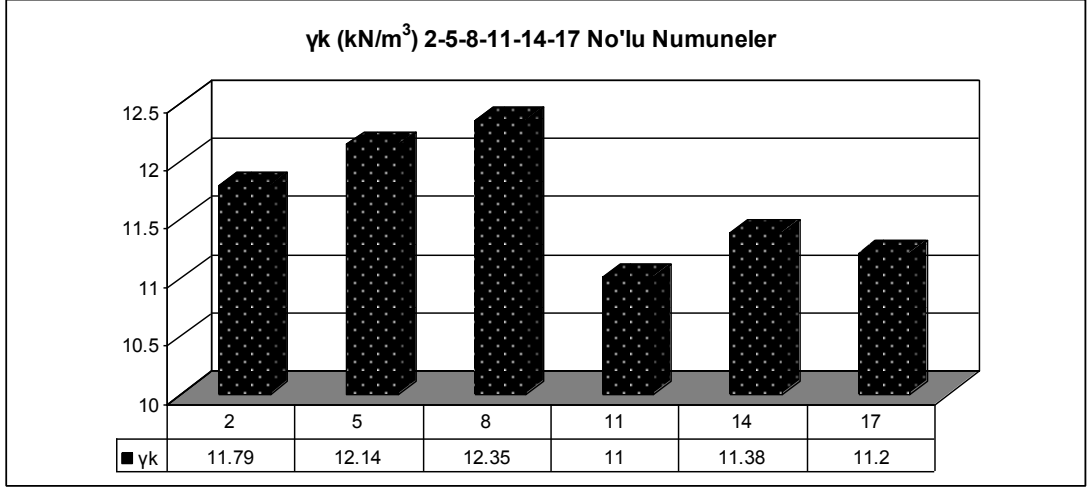
Şekil 7.55 1-2-3-4-17-18-19 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği



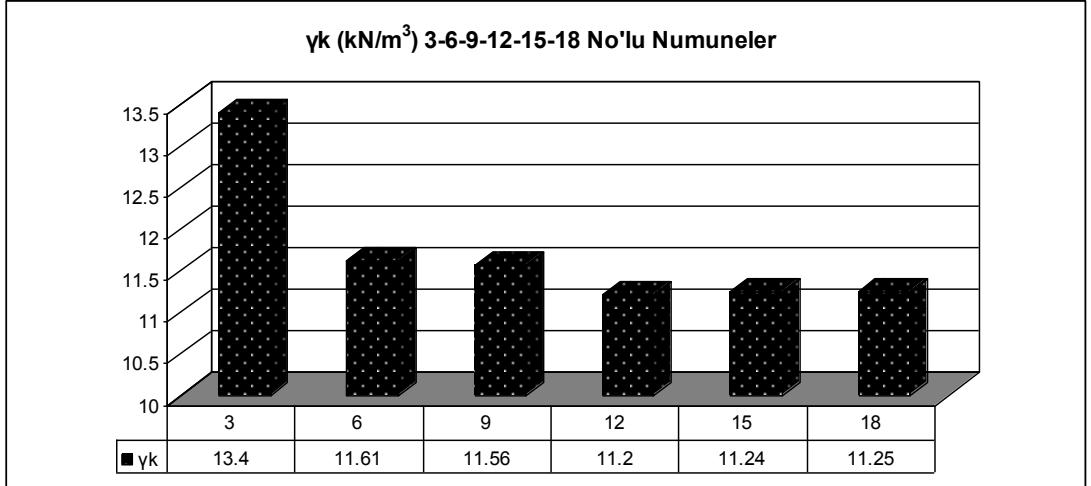
Şekil 7.56 1-8-9-10-11-12-13 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği



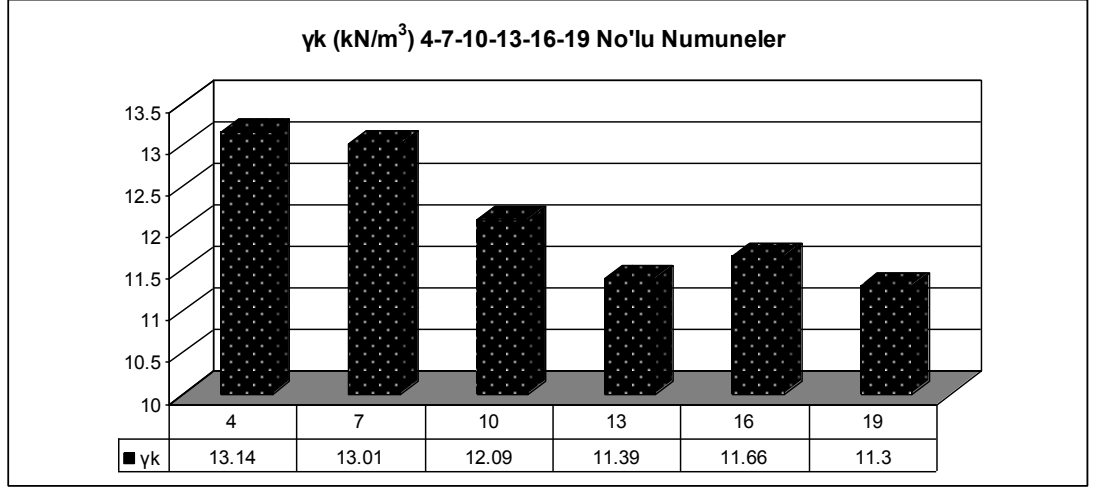
Şekil 7.57 1-14-15-16-17-18-19 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği



Şekil 7.58 2-5-8-11-14-17 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği



Şekil 7.59 3-6-9-12-15-18 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği

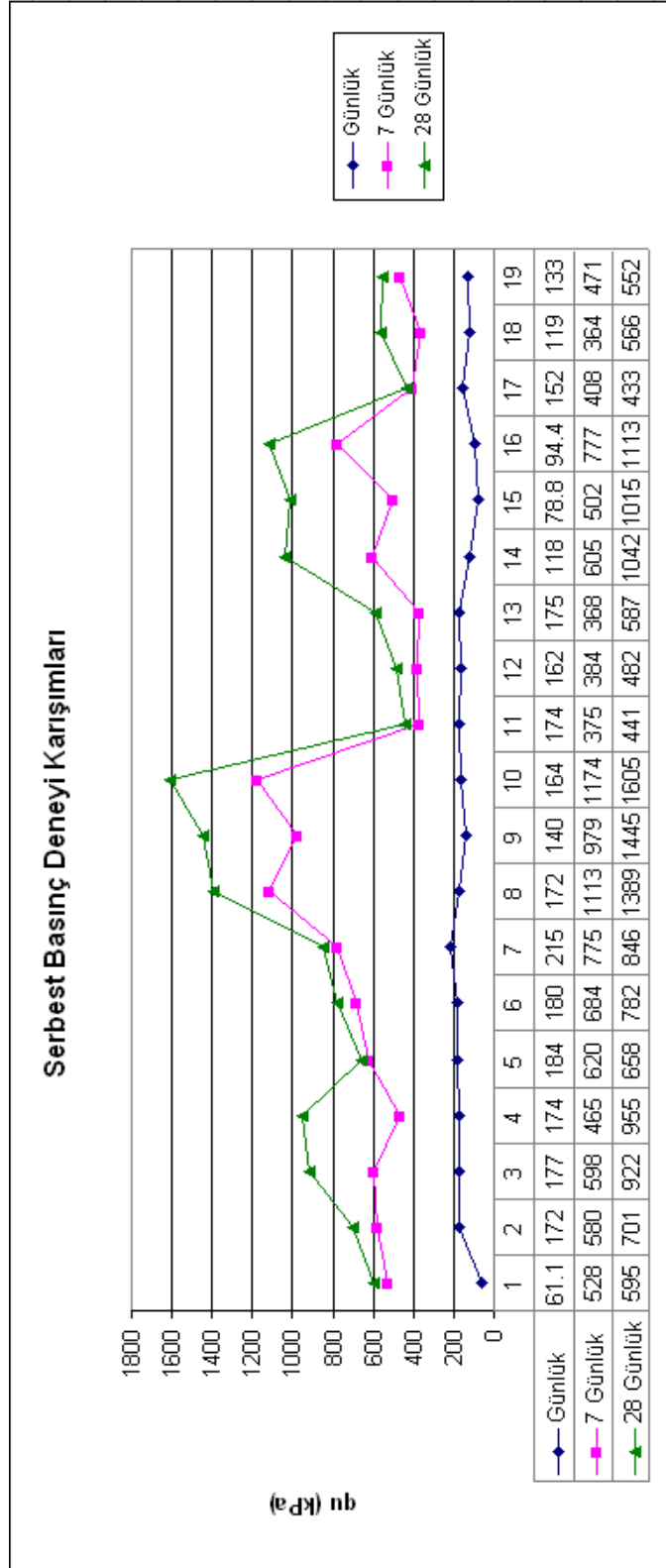


Şekil 7.60 4-7-10-13-16-19 No'lu numunelerin kuru birim hacim ağırlığı grafiği

7.6 Karışımların Serbest Basınç Deney Sonuçları

Serbest basınç deneyi için karışımlar optimum su içeriği değerlerinde hazırlanmış ve kürde bekletilmiştir. Kürde bekletilen numuneler gününde, 7. günde ve 28. günde deneye tabi tutulmuştur.

Serbest basınç deneyi sonunda yapılan hesaplar ve Şekil 7.61'deki grafikten görünen en yüksek mukavemeti 28 günlük kürde bekleyen numuneler göstermiştir. En iyi sonuçlar %100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit karışımında görülmüştür.



Şekil 7.61 Serbest basınç dayanımı grafiği

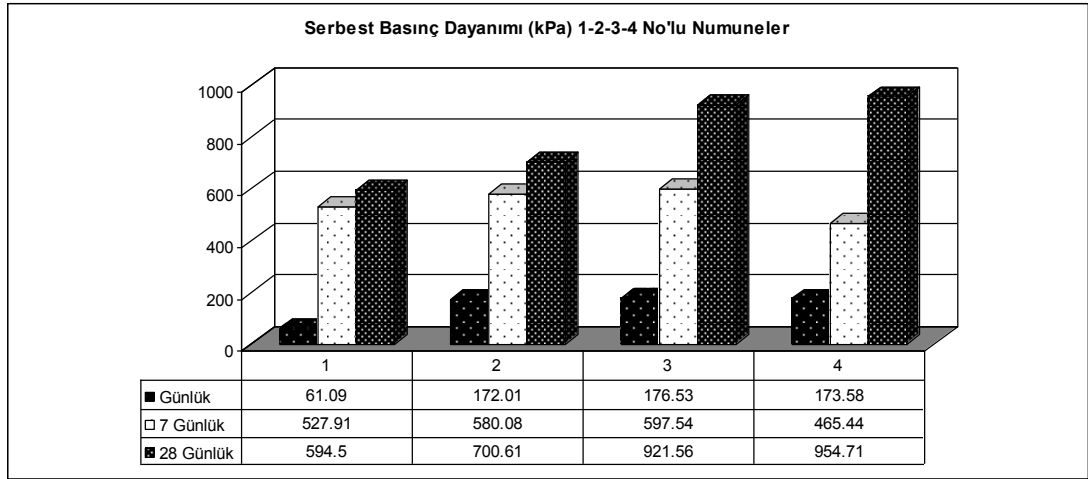
%100 Kil'e göre YFC katkılı karışımlarda günlük, 7 ve 28 günlük numunelerin genel olarak serbest basınç dayanımları arttırmıştır. En yüksek dayanımlar 28 günlük kürde bekleyen numunelerde görülmüştür. En yüksek dayanım 28 günlük kürde bekleyen %100 Kil + %15 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.62). %100 Kil'e göre YFC + Kireç katkısı dayanımları arttırmıştır. %100 Kil + YFC karışımına göre kireç katkısı günlük numunelerde dayanımları arttırmış, 28 günlük numunelerde azaltmıştır. En yüksek dayanım 28 günlük kürde bekleyen %100 Kil + %15 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.63).

%100 Kil'e göre YFC + Zeolit katkısı dayanımları arttırmıştır. %100 Kil + YFC karışımına göre zeolit katkısı 7 ve 28 günlük numunelerde dayanımı arttırmış, günlük numunelerde azaltmıştır. En yüksek dayanım 28 günlük kürde bekleyen %100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit karışımında görülmüştür (Şekil 7.64). %100 Kil'e göre YFC + Zeolit + Kireç katkısı günlük dayanımları arttırmıştır. %100 Kil + YFC karışımına göre zeolit katkılı karışımlara kireç katkısı 7 ve 28 günlük numunelerde dayanımı azaltmıştır. En yüksek dayanım 28 günlük kürde bekleyen %100 Kil + %15 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.65). %100 Kil + YFC + Zeolit karışımına göre kireç katkısı günlük dayanımları arttırmış, 7 ve 28 günlük dayanımları azaltmıştır (Şekil 7.68).

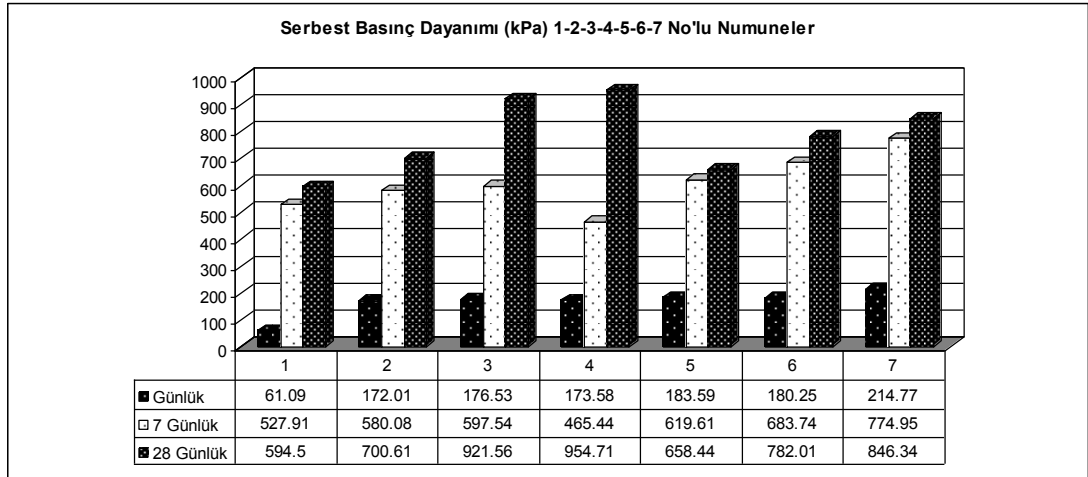
%100 Kil'e göre YFC + UK katkısı günlük ve 28 günlük dayanımları arttırmıştır. %100 Kil + YFC karışımına göre UK katkısı günlük dayanımları azaltmış, 28 günlük dayanımları arttırmıştır. En yüksek dayanım 28 günlük kürde bekleyen %100 Kil + %15 YFC + %15 UK karışımında görülmüştür (Şekil 7.66). %100 Kil'e göre YFC + UK + Kireç katkısı günlük dayanımları arttırmıştır. %100 Kil + YFC karışımına göre günlük, 7 ve 28 günlük dayanımları azaltmıştır. En yüksek dayanım 28 günlük kürde bekleyen %100 Kil + %15 YFC karışımında görülmüştür (Şekil 7.67). %100 Kil + YFC + UK karışımına göre kireç katkısı günlük dayanımları arttırmış, 7 ve 28 günlük dayanımları azaltmıştır (Şekil 7.69).

%100 Kil + %5 YFC karışımına göre günlük dayanımlarda kireç ve %5 Zeolit + Kireç katkıları, 7 günlük dayanımlarda kireç, %5 Zeolit ve %5 UK katkıları, 28 günlük dayanımlarda %5 Zeolit ve %5 UK katkıları dayanımları arttırmıştır. En

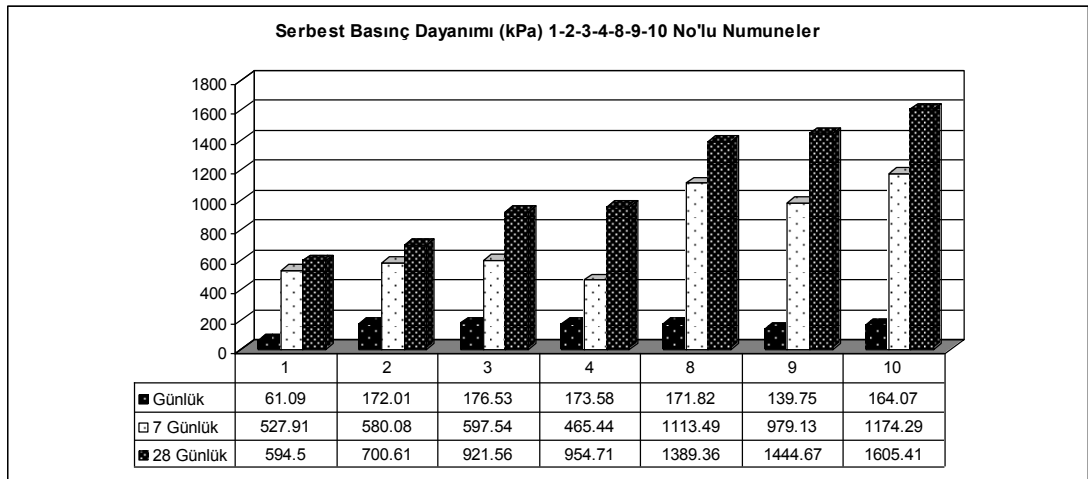
yüksek dayanım 28 günlük kürede bekleyen %100 Kil + %5 YFC + %5 Zeolit karışımında görülmüştür (Şekil 7.70). %100 Kil + %10 YFC karışımına göre günlük dayanımlarda kireç katkısı, 7 günlük dayanımlarda kireç ve %10 Zeolit katkıları, 28 günlük dayanımlarda %10 Zeolit ve %10 UK katkıları dayanımları arttırmıştır. En yüksek dayanım 28 günlük kürede bekleyen %100 Kil + %10 YFC + %10 Zeolit karışımında görülmüştür (Şekil 7.71). %100 Kil + %15 YFC karışımına göre günlük dayanımlarda kireç ve %15 Zeolit + Kireç katkıları, 7 günlük dayanımlarda kireç, %15 Zeolit, %15 UK ve %15 UK + Kireç katkıları, 28 günlük dayanımlarda %15 Zeolit ve %15 UK katkıları dayanımları arttırmıştır. En yüksek dayanım 28 günlük kürede bekleyen %100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit karışımında görülmüştür (Şekil 7.72).



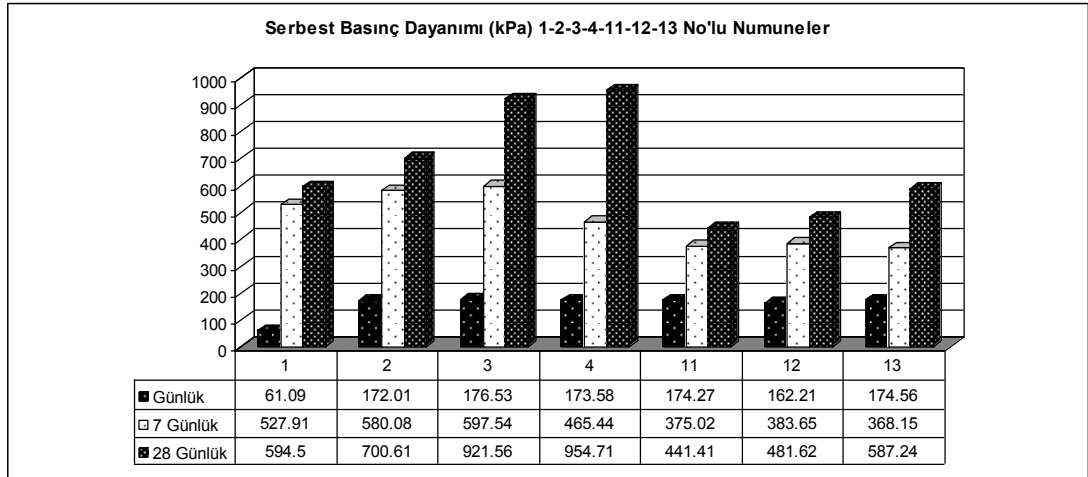
Şekil 7.62 1-2-3-4 No'lu numunelerin serbest basınç dayanımı grafiği



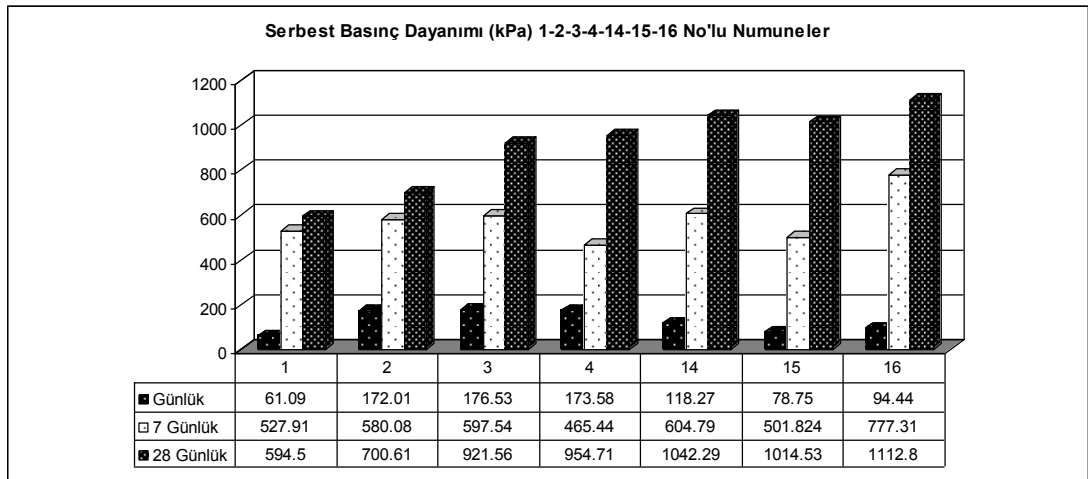
Şekil 7.63 1-2-3-4-5-6-7 No'lu numunelerin serbest basınç dayanımı grafiği



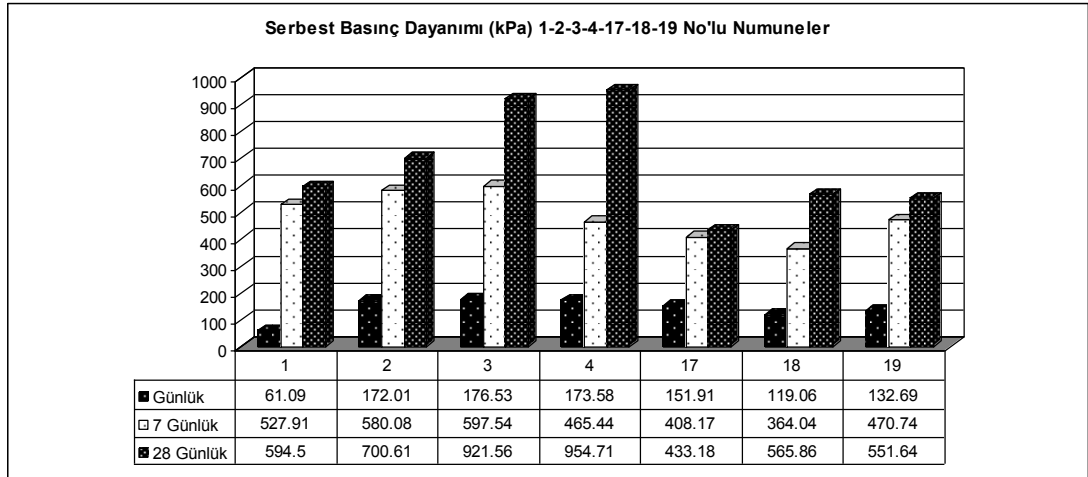
Şekil 7.64 1-2-3-4-8-9-10 No'lu numunelerin serbest basınç dayanımı grafiği



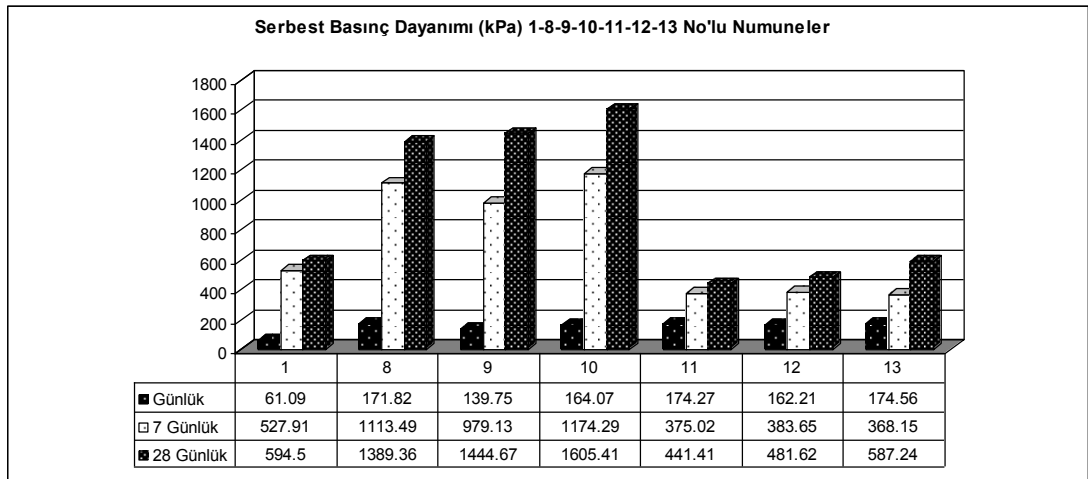
Şekil 7.65 1-2-3-4-11-12-13 No'lu numunelerin serbest basınç dayanımı grafiği



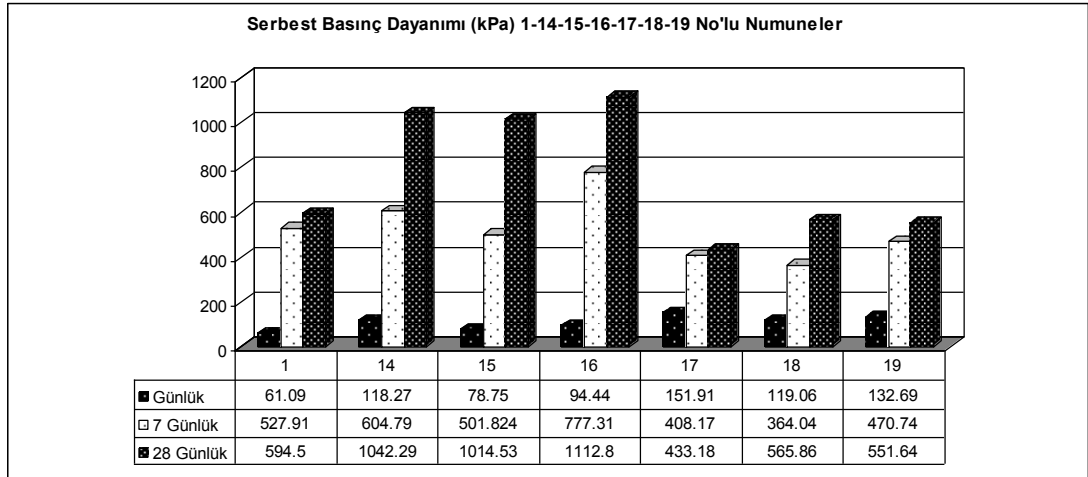
Şekil 7.66 1-2-3-4-14-15-16 No'lu numunelerin serbest basınç dayanımı grafiği



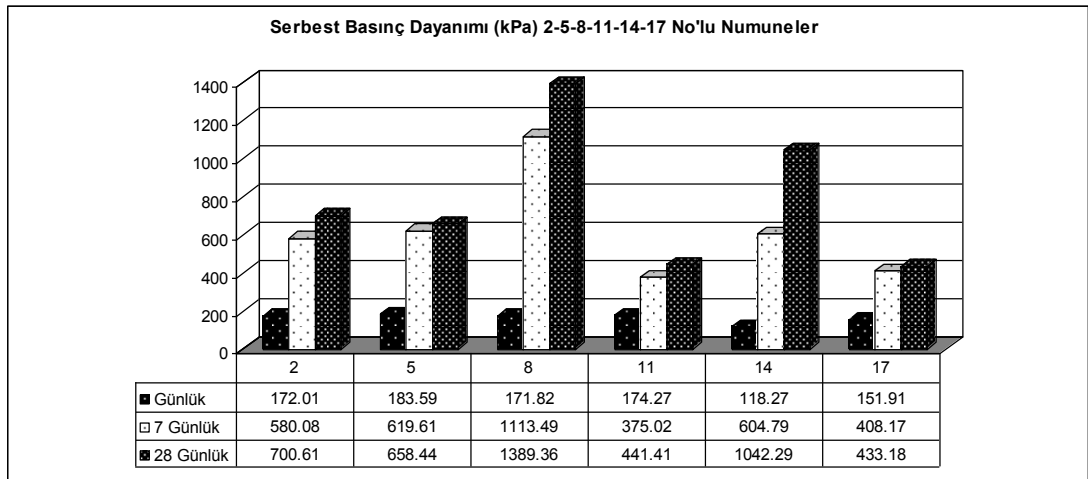
Şekil 7.67 1-2-3-4-17-18-19 No'lu numunelerin serbest basınç dayanımı grafiği



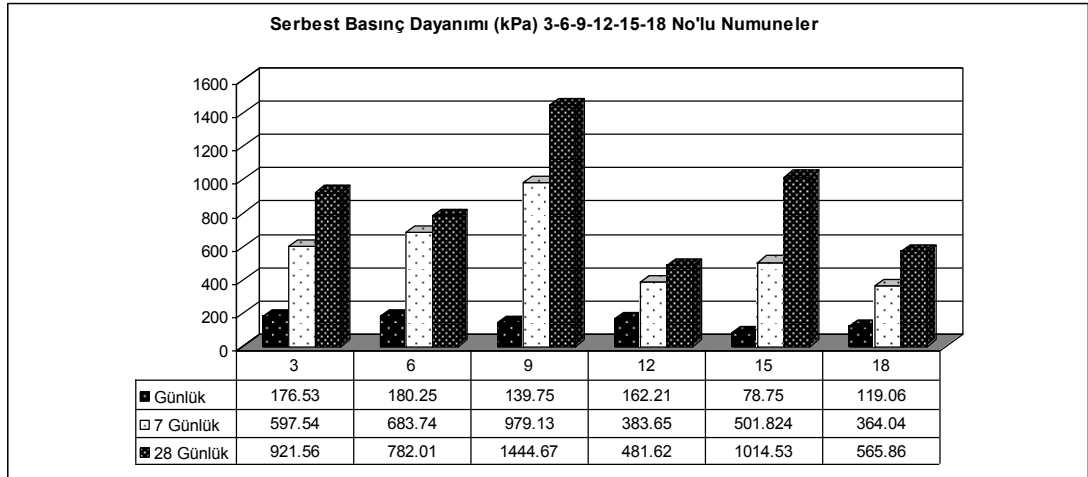
Şekil 7.68 1-8-9-10-11-12-13 No'lu numunelerin serbest basınç dayanımı grafiği



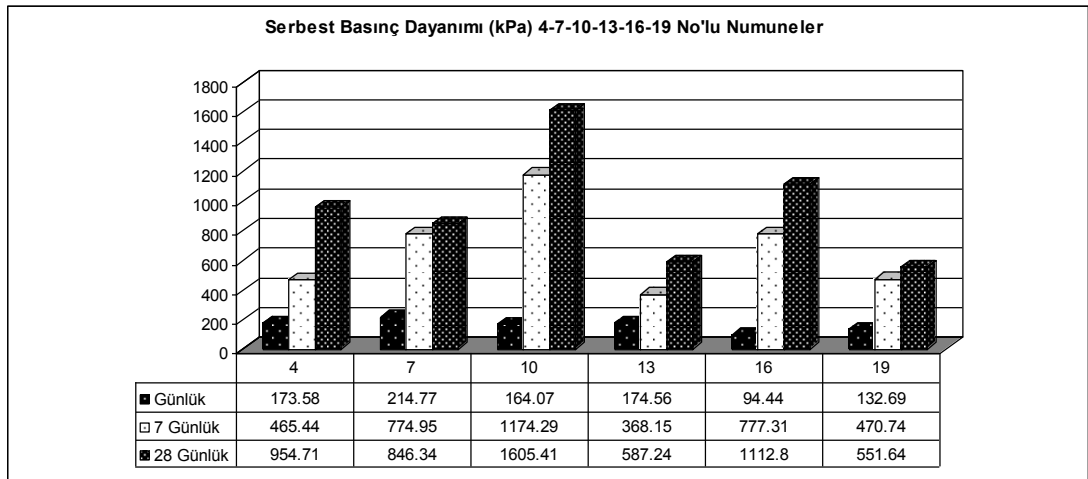
Şekil 7.69 1-14-15-16-17-18-19 No'lu numunelerin serbest basınç dayanımı grafiği



Şekil 7.70 2-5-8-11-14-17 No'lu numunelerin serbest basınç dayanımı grafiği



Şekil 7.71 3-6-9-12-15-18 No'lu numunelerin serbest basınç dayanımı grafiği



Şekil 7.72 4-7-10-13-16-19 No'lu numunelerin serbest basınç dayanımı grafiği

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada zemin olarak bentonit kili kullanılmıştır. Bu kil içerisine %10 kireç ve değişik oranlarda yüksek fırın cürufu, uçucu kül, zeolit katılarak katkılı zemin karışımları hazırlanmıştır. Bu katkıların zemin stabilizasyonu üzerine etkileri belirlenmiştir. Karışımlar üzerinde özgül yoğunluk, hidrometre, likit limit, plastik limit, kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri yapılmıştır.

Zemine, katkı maddeleri katıldığında %100 Kil'e göre plastisite indislerinin azaldığı görülmüştür. Kireç olmayan sadece YFC'li karışımlarda, YFC'nin artması plastik limitin artmasına sebep olduğu, kireç katkısının bütün karışımlarda genel olarak likit limitin artmasına neden olduğu, kireç olmayan zeolitli karışımlarda zeolit miktarı arttıkça likit limit ve plastik limitin düştüğü görülmüştür. Ancak daha önce yapılan bir çalışmada [62] yaptığı araştırmaya göre artan kireç yüzdesine göre likit limitin azaldığı plastik limitin ise arttığı görülmüştür. En düşük plastisite indisi %100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit karışımında yakalanmıştır. Plastisite indisinin azalması işlenebilirliği (zemin serme gibi) artırır, bu da istenilen bir özelliktir. Zeminin plastisitesinin artması, sıkışma ve şişme potansiyelinin artmasına, kazı ve dolgu işlerinde zorlukların ortaya çıkmasına yol açmaktadır.

Hidrometre analizi sonuçlarına göre zemine katılan katkı maddeleri genel olarak kil oranını arttırmış silt oranını azaltmıştır. %100 Kil + %5 YFC + %10 Kireç, %100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit, %100 Kil + %10 YFC + %10 Zeolit + %10 Kireç ve %100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit + %10 Kireç karışımlarında silt oranı daha yüksek görülmüştür. Silt oranının artması tanelerin boyutunun büyüdüğünü gösterir. Dolayısıyla bu boyut büyümesinin karışımların mukavemetinin artmasına da neden olacağı düşünülmektedir. YFC'li karışımlarda kireç katkısının kil oranını düşürdüğü, sadece YFC'li karışımlara göre Zeolit + Kireç katkısının kil oranını düşürdüğü ve sadece YFC'li karışımlara göre uçucu külün genel olarak kil oranını arttırdığı görülmüştür.

Karışımların %100 Kil'e göre özgül yoğunlukları artmıştır. Kireç katkılı karışımlarda daha yüksek özgül yoğunluklar bulunmuş ve en iyi sonuç %100 Kil + %5 YFC + %10 Kireç karışımında görülmüştür. Kireçsiz zeolitli karışımların, sadece YFC'li karışımlara göre özgül yoğunluğu düşürdüğü görülmüştür. YFC'nin özgül yoğunluğu yüksek olduğu için özgül yoğunlukların %100 Kil'e göre artması olası bir durumdur.

Kompaksiyon deneyinde elde edilen en düşük optimum su içeriği %100 Kil + %15 YFC + %10 Kireç karışımında görülmüştür. YFC katkısının su içeriklerini düşürdüğü; Zeolit, Zeolit + Kireç ve UK'nın sadece YFC'li karışımlara göre su içeriklerini yükselttiği görülmüştür. Daha önce yapılan bir çalışmaya göre de [58] UK'nın su içeriklerini arttırdığı görülmüştür. Optimum su içeriklerindeki artışın uçucu külün hidratlaşması için fazla suya ihtiyaç duyması nedeniyle olabileceği düşünülebilir. Zeolit + Kireç ve UK + Kireç karışımlarında su oranını kireç katkısının genel olarak düşürdüğü görülmüştür.

Karışımlar üzerinde yapılan kompaksiyon deneylerinde maksimum kuru birim hacim ağırlıklar %100 Kil numuneye göre artış göstermiştir. En yüksek maksimum kuru birim hacim ağırlık %100 Kil + %10 YFC ve %100 Kil + %15 YFC'de elde edilmiştir. YFC katkısının %100 Kil'e göre kuru birim hacim ağırlığı yükselttiği görülmüştür. Kuru birim hacim ağırlığındaki artış zeminin taşıma gücünün artmasına, geçirimsizliğin, boşluk oranı ve porozitenin azalmasına ve oturmaların engellenmesine neden olur. YFC'li karışımlara göre Zeolit + Kireç, UK ve UK + Kireç katkılarının ve genel olarak kireç katkısının kuru birim hacim ağırlığı düşürdüğü görülmüştür. Kuru birim hacim ağırlığındaki düşüşün katkı malzemelerinin düşük özgül yoğunluklarından ileri geldiği düşünülmektedir.

Karışımların günlük, 7 ve 28 günlük serbest basınç dayanımları %100 Kil numunesine göre daha yüksek değerler almıştır. 28 gün sonunda en yüksek dayanımlar elde edilmiştir. Serbest basınç deneyinde en yüksek mukavemet değeri günlük, 7 ve 28 günlük kürde bekleyen numunelerde zeolit ve yüksek fırın cürufu katkılı karışımlarda elde edilmiştir. Ayrıca kireç katkısının numuneyi

gevrekleştirdiği gözlemlenmiştir. Daha önce yapılan bir çalışmaya göre [17] %5 cüruf ve %7.5 Kireç katkılı karışımın 28 günlük basınç dayanımı ilk gün ki basınç dayanımına göre yaklaşık 25 kat arttığı görülmüş ancak bu çalışmada %10 kireç katkısının karışımlarda dayanımı düşürdüğü görülmüştür. UK ve Zeolit katkısının YFC'li karışımlara göre 28 günlük dayanımları yükseltmiştir. En yüksek mukavemet %100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit karışımında bulunmuştur. Yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve zeolit puzolanik malzemeler oldukları için dayanımlarını daha geç alırlar. Bu sebepten en yüksek mukavemet değerlerinin 28 günlük kürde bekleyen numunelerde görülmesi beklenen bir durumdur. Daha önce yapılan çalışmalara göre de [59, 30] artan bekleme süresinin mukavemeti arttırdığı görülmüştür.

Bentonit kiline ilave edilen zeolit katkısı mukavemette artış göstermiştir. Kireç katkısının daha çok yol inşaatında zemin suyunun giderilmesi için kullanılması önerilmektedir.

Çalışma kapsamında %100 Kil + %10 YFC ve %100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit katkılı karışımların stabilite edilecek zeminlerde temel tabakası olarak kullanılabilmesi görülmektedir. Stabilite için en iyi sonuçlar %100 Kil + %15 YFC + %15 Zeolit karışımında görülmüştür.

Çalışmanın daha fazla sayıda deneyler, kür süresi ve katkı oranlarının değiştirilerek detaylı araştırılması önerilmektedir.

Bu çalışmada sonuç olarak yüksek fırın cürufu, uçucu kül ve zeolit, yüksek plastisiteli zeminlerin stabilizasyonunda kullanılabilmesi ve böylece bu malzemelerin Türkiye ekonomisine katkı sağlayacağı ve çevre kirliliğini azaltacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Aytekin, M., “Deneysel Zemin Mekaniği”, Akademi Yayınevi, Trabzon, (2000).
- [2] Tunç, A., “Yol Mühendisliğinde Geoteknik ve Uygulamaları”, Atlas Yayın Dağıtım, İstanbul, (2002).
- [3] Uzuner, B., “Temel Mühendisliğine Giriş”, Derya Kitabevi, Trabzon, (2000).
- [4] Sağlamer, A., “Zemin İyileştirme Yöntemleri” Sunu, Trabzon
- [5] Önalp, A., “Geoteknik Bilgisi Cilt 2”, KTÜ Basımevi, Trabzon, (1997).
- [6] Tumluer, G., Çimento Katkılı Kumlu Zeminlerin Mukavemeti, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, (2006).
- [7] Tokyay, M. ve Erdoğan, K., “Cürüfler ve Cürüflü Çimentolar”, Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği, Ankara, (2002).
- [8] Pal, S. C., Mukherjee, A. ve Pathak, S. R., “Investigation of Hydraulic Activity of Ground Granulated Blast Furnace Slag in Concrete”, Cement and Concrete Research, **23**, (2003) 1-6.
- [9] Malhotra, V. M., “Properties of Fresh and Hardened Concrete Incorporating Ground Granulated Blast Furnace Slag”, Supplementary Chemistry Materials for Concrete”, Ottawa, (1987), pp. 231-331.
- [10] Neville, A. M., “Properties of Concrete”, 4th Edition, Longman, (1999).
- [11] Majumdar, A. J., “Properties of Some Blended High Alumina Cements”, Cement and Concrete Research, (1992), 1101 – 1114.
- [12] Ilıcalı, M., Karayolu Üstyapısında Erdemir Cürufunun Kullanılabilirliğinin Araştırılması, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (1998).
- [13] Bilim, C., Yüksek Fırın Cürufu Katkısının Çimento Tabanlı Malzemelerde Kullanılabilirliği, Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, (2006).
- [14] Newman, J. ve Choo, B. S., “Advanced Concrete Technology, Constituent Materials, Butterworth – Heinemann, Oxford, (2003).

- [15] Sönmez, H. T., Yüksek Fırın Cürufunun Kendiliğinden Yerleşen Betonlara Etkileri, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, (2008).
- [16] Öz, A., Doğal Zeolit ve Yüksek Fırın Cürufu Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Betonların Termo – Mekanik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, (2006).
- [17] Kavak, A. ve Bilgen, G., “Yüksek Fırın Cürufu ve Kirecin Katkı Olarak Kil Üzerindeki Etkileri ve Yol Yapımında Kullanımının Araştırılması”, I. Geoteknik Sempozyumu, Adana, (2005).
- [18] Öztürk, Y. Z., Gölbaşı (Ankara) Yerleşim Alanı Killerinin Şişme Potansiyelinin Belirlenmesi ve Kireç İle İyileştirme, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2009).
- [19] Çakılcıoğlu, İ., Yüksek Plastisiteli Killerin Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, (2007).
- [20] Dinç, O., Kireçtaşları, Dumlupınar Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya, (2004).
- [21] Özyayın, K., “Zemin Mekaniği”, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- [22] Akyarlı, A., Kavak, A., Atay, S. ve Aklaya, S., “Killi Zeminlerin Kireç İle İyileştirilmesi”, TSE Standart Dergisi, İzmir, (2009).
- [23] Gökçe, A., Farklı İnceliklerdeki Uçucu Küllerin Betondaki Performanslarının Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (1995).
- [24] Tokyay, M., “Betonda Uçucu Kül Kullanımı (Türkiye Deneyimi)”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanılması Sempozyumu, Ankara, (1983), 29-36.
- [25] Alkaya, D., “Uçucu Küllerin Zemin İyileştirmesinde Kullanılmasının İncelenmesi”, Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi, Denizli, (2009).
- [26] Tokyay, M. ve Erdoğan, K., Türkiye Termik Santrallerinden Elde Edilen Uçucu Küllerin Karakterizasyonu, TÇMB, (1998).
- [27] Joshi, R. C. ve Nagaraj, T. S., “Fly Ash Utilization for Soil Stabilization, Environmental Geotechnics and Problematic Soils and Rocks”, Eds. Balusubramaniam et al., Balkema Rotterdam, (1987), 77 – 93.
- [28] Erşan, H., Uçucu Küllerin Siltli Zeminlerin Kayma Mukavemeti Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (1996).

- [29] TS 639 Uçucu Küller, TSE, Ankara, (1998).
- [30] Öksüz, K., Afşin – Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Zemin Stabilizasyonunda Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, (2006).
- [31] Anonim, “Türkiye Uçucu Küllerinin Özellikleri ve Kullanım Özellikleri”, E.İ.E. Genel Yayın Direktörlüğü, Ankara, (1979).
- [32] Gürkan, A., Pomza ve Zeolitin Alkali Silika Reaksiyonu Üzerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, (2006).
- [33] Sarız, K. ve Nuhoğlu G., “Endüstriyel Hammedde Yatakları ve Madenciligi, Anadolu Üniversitesi, Yatın No: 636, Eskişehir, (1992).
- [34] Atanur, A., “Kireç Stabilizasyonu ve Yol Yapımındaki Tatbikatı, Bayındırlık Bak. Kgm Yayınları, Ankara, (1973), 180.
- [35] Önalp, A., “Geoteknik Bilgisi 1 Çözümlü Problemlerle Zeminler ve Mekanığı”, Birsan Yayınevi, İstanbul, (2007).
- [36] Karakaya, M. Ç., “Kil Minerallerinin Özellikleri ve Tanımlama Yöntemleri”, Bizim Büro Basımevi, Ankara, (2006).
- [37] Holtz, R. D. ve Kovacs, W. D., “Geoteknik Mühendisliğine Giriş”, Gazi Kitabevi, Ankara, (1981).
- [38] Yurtcu, Ş., Kil Zeminlerde Yer altı Suyu Davranışının Modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, (2001).
- [39] Çakı, M., Ünye Karahamza Bentonitlerinin Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji Fakültesi, İstanbul, (1995).
- [40] Esener, A. B., Toprak Dolgu Yapıların Projelendirilmesinde Geoteknik Çalışmalar, Yüksek Lisans Tezi, Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, (2005).
- [41] Rogers, W. F., “Composition and Properties of Oil Well Drilling: Fluids”, Gulf Pub. Co., (1963) 210 – 227.
- [42] Onar, N., “Bentonitin Petrol Sondajlarında Kullanılması”, Madencilik Dergisi, Ankara, (1971).
- [43] Uluğ, T., The Effect of Weighting Materials on the Viscosity and the Filtration Properties of Drilling Fluids, Master Thesis, The University of Texas, (1941).

- [44] Sağlamer, A. ve İncecik, M., “Bentonit Bulamaçlı Diyafram Duvarlar”, II. Ulusal Kil Sempozyumu, Ankara, (1985), 387 – 396.
- [45] Alataş, T., Afşin-Elbistan Termik Santrali Uçucu Külünün Yol Stabilizasyonunda Çeşitli Malzemelerle Birlikte Kullanımı Üzerine Bir Araştırma, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, (1996).
- [46] Elverici, Ü., Effect of Blast Furnace Slag and Flyash On The Stabilization of Base Materials, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Ankara, (1966), 90 s.
- [47] Tan, O. ve İyisan, R., “Uçucu Kül İle Zemin Stabilizasyonu”, ZMTM 6. Ulusal Kongresi, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, (1996), 417-426.
- [48] Atanur, A., “Uçucu Küllerin Kimyasal ve Fiziksel Vasıfları ve Yapı Malzemesi Olarak Kullanılması”, Bayındırlık Bak. KGM Yayınları, Ankara, (1971), 219 s.
- [49] Wasti, Y., “Uçucu Küllerin Geoteknik Özellikleri ve Kullanım Olanakları”, İMO Teknik Dergi, (1990), 177-188.
- [50] Türker, D., Şişen Zeminlerin C/F Tipi Kül ve Kum İle Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, ODTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2000).
- [51] Wasti, Y., “Uçucu Küllerin Geoteknik Uygulamalarda Kullanımı”, Endüstriyel Atıkların İnşaat Sektöründe Kullanımı Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, Ankara, (1993), 37-44.
- [52] Günal, R. G., Uçucu Külün Zemin Stabilizasyonunda Kullanılması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (1996), 76 s.
- [53] Değirmenci, N., Okucu, A. ve Turabi, A., “Application of Phosphogypsum in Soil Stabilization, Building and Environment”, 42 (2007), 3393-3398.
- [54] Okucu, A., Turabi, A. ve Değirmenci, N., “The Use of By-Product Phosphogypsum With Cement For Soil Stabilization”, 9th International Symp. On Concrete Roads, Proceedings CD, Istanbul, April 4-7, (2004), 160.pdf, pp.312-316.
- [55] Değirmenci, N., Okucu, A. ve Turabi, A., “The Using Possibilities of Phosphogypsum by-Product Phosphoric Acid Production as a Stabilization Material”, The 18th International Conference on Solid waste Technology and Management, Proceedings CD, session 3B, Industrial Wastes 1, Philadelphia, PA, USA, March 23-26, (2003), pp.314-323.

- [56] Turabi A., Okucu A. ve Değirmenci N. “Fosforik Asit Üretim Atığı Fosfojipsin Stabilizasyon Malzemesi Olarak Kullanım Olanaklarının Araştırılması”, Balıkesir Üniversitesi, IV. Mühendislik-Mimarlık Sempozyumu, Bildiriler CD, 11-12-13 Eylül, (2002), S:93-103.
- [57] İnan, G., Sezer, A., Ramyar, K. ve Yılmaz, H. R., “Değişik Uçucu Küllerin Yüksek Plastisiteli Kilin Serbest Basınç Dayanımına Etkisi”, Selçuk Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Konya, (2005).
- [58] Aksoy, H. S., Yılmaz, M. ve Akarsu, E. E., “Killi Bir Zeminin Tunçbilek Uçucu Külü Kullanılarak Stabilizasyonu”, 2. Geoteknik Sempozyumu, Adana, (2007).
- [59] Aytekin, S., Uçucu Küllerinin Killi Zeminlerin İslahında Kullanımı, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, (2009).
- [60] Aydın, S., Yenikent (Ankara) Yerleşim Alanı Killerinin Kireç ve Uçucu Külle Geoteknik Özelliklerinin İyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2010).
- [61] Süt, İ., Kohezyonlu Zeminlerin Kireçle İyileştirilmesinin CBR Değeri Üzerindeki Etkisinin İrdelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2006).
- [62] Alkaya, D., Erken, A., Alyanak, T. ve İnançlı, G., “Uçucu Küllerin Toprak Sanayinde Kullanılabilirliği”, Uluslar arası Pişmiş Toprak Sempozyumu, Tepebaşı Belediyesi, Eskişehir, (2002), 287 – 295.
- [63] Garaisayev, S., Şişen Zeminlerin Kimyasal Yöntemlerle Stabilizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, (2008).
- [64] Taşçı, G., Problemlili Kil Zeminin Geoteknik Özelliklerine Silis Dumanı ve Kireç Katkısının Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, (2011).
- [65] Kaya, A., Durukan, S., Ören, A. H. ve Yükselen, Y., “Bentonit-Zeolit Karışımlarının Mühendislik Özelliklerinin Belirlenmesi”, İMO Teknik Dergi, (2006), 3879-3892.
- [66] Yılmaz, I., Yıldırım, M. ve Keskin, İ., “Zemin Mekaniği Laboratuar Deneyleri ve Problemler”, Teknik Yayınevi, Ankara, (2009).
- [67] TSE 1900 – 1, “İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuar Deneyleri – Bölüm 1: Fiziksel Özelliklerin Tayini”, Ankara, (2006).
- [68] Şekercioğlu, E., “Yapıların Projelendirilmesinde Mühendislik Jeolojisi”, 28, Jeoloji Mühendisleri Odası, Ankara, (2008), 85-511.

- [69] Mitchell, J. K., “Fundamentals of Soil Behavior”, John Wiley&Sons, Inc., U.S.A., (1976).
- [70] TS 1500, “İnşaat Mühendisliğinde Zeminlerin Sınıflandırılması”, TSE, Ankara, (2000).
- [71] TSE 1900-2, “İnşaat Mühendisliğinde Zemin Laboratuar Deneyleri – Bölüm 2: Mekanik Özelliklerin Tayini”, Ankara, (2006).