

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KİMYASAL KATKILARIN UÇUCU KÜLLÜ DOLGULARDA ETKİLERİNİN**  
**İNCELENMESİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Mad. Yük. Müh. İbrahim ÇAVUŞOĞLU**

**NİSAN 2013**  
**TRABZON**

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ**

**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**MADEN MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**KİMYASAL KATKILARIN UÇUCU KÜLLÜ DOLGULARDA ETKİLERİNİN  
İNCELENMESİ**

**Maden Yüksek Mühendisi İbrahim ÇAVUŞOĞLU**

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde  
"DOKTOR (MADEN MÜHENDİSLİĞİ)"  
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 12.03.2013**

**Tezin Savunma Tarihi : 01.04.2013**

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ**

**Trabzon 2013**

## ÖNSÖZ

“Kimyasal Katkıların Uçucu Küllü Dolgularda Etkilerinin İncelenmesi” başlıklı çalışma, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak hazırlanmıştır. Bu tez içerisinde sunulan deneysel çalışmalar, KTÜ Maden Müh. Bölümü, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü ve Fizik Böl. Laboratuvarları ile Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği (TÇMB) Ar-Ge Laboratuvarı ve Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarları’nda gerçekleştirilmiştir. Bu tez kapsamında sadece bilgi ve değerli görüşlerinden değil tezin içerisinde grafiksel gösterimlerim yapılması konusuna kadar bir çok konuda büyük desteğinden yararlandığım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Yine çalışmam boyunca öneri ve desteklerinden faydalandığım tez izleme komitesi üyeleri Sayın Prof. Dr. Ayhan KESİMAL ve Sayın Prof. Dr. Necati TÜYSÜZ hocalarıma teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim. Laboratuarda deneylerin yapım aşamasında emeği geçen Araş. Gör. Mehmet ÇAPİK’e ve Araş. Gör. Kadir KARAMAN’a lisans öğrencileri Ahmet ÖZKAN, Ata SUÇİN, Kaya ŞAHİN, Şahin GÜVEN, Muhammet İZKİ ve Resul KARAMAHMUT’a teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca bu çalışmayı yapmama olanak sağlayan, malzeme temininde bana yardımcı olan PARK TERMİK A.Ş. Genel Müdürü Maden Müh. Levent ŞENFİLO’ya ve Genel Müdür Yardımcısı Maden Yük. Müh. Oktay ERARSLAN’a sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Yine deneysel çalışmalarımda bana bilgi ve önerilerini sunan PARK TERMİK A.Ş. çalışanları Malzeme Müh. Teoman ZENGİN ve Malzeme Müh. Senem ZENGİN’e teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma, 2009.112.008.2 No’lu KTÜ BAP’01 Bilimsel Araştırma Projesince desteklenmiştir. Bilimsel Araştırma Projesi çalışanlarına teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, çalışmam boyunca sağlamış olduğu doktora bursu (TÇMB İz Bırakanlar Bursu) nedeniyle Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği’ne teşekkürlerimi sunarım. Tez çalışmamı; çalışmalarım boyunca bana desteklerini esirgemeyen aileme ithaf ediyorum.

İbrahim ÇAVUŞOĞLU  
Trabzon, 2013

## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY.....	IX
ŞEKİLLER.....	X
TABLolar.....	XVII
SEMBOLLER VE KISALTMALAR.....	XIX
1. GENEL BİLGİLER .....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tezin Gerekçesi ve Amacı .....	2
1.3. Madencilikte Yeraltı Dolgusu .....	3
1.3.1. Dolgu Yöntemleri .....	6
1.3.1.1. Kaya Dolgusu.....	6
1.3.1.2. Hidrolik Dolgu .....	8
1.3.1.3. Macun Dolgu .....	10
1.4. Yeraltı Dolgularında Kullanılan Malzemeler .....	13
1.5. Santral Atığı Uçucu Küller .....	14
1.5.1. Uçucu Küllerin Fiziksel, Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri .....	15
1.5.2. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması .....	18
1.5.3. Uçucu Küllerin Kullanım Alanları.....	20
1.5.3.1. Uçucu Küllerin Beton İçerisinde Kullanımı .....	21
1.5.3.2. Uçucu Küllerin Çimento Üretiminde Kullanılması .....	23
1.5.3.3. Uçucu Küllerin Yeraltı Dolgu Malzemesi Olarak Kullanımı .....	24
1.5.3.3.1. Bağlayıcı Alternatifi veya İkamesi Olarak Kullanımı .....	25
1.5.3.3.2. Atık Malzeme Olarak Kullanılması .....	27
1.5.4. Uçucu Küllerin Çevresel Etkileri.....	32
1.5.5. Uçucu Küllerin Mekanize Yeraltı Kömür İşletmelerinde Dolgu Malzemesi Olarak Kullanımı.....	35
1.5.6. Uçucu Kül-Çimento Karışımları.....	45

1.5.6.1.	Uçucu Kül İlavesinin Dayanıma Etkisi.....	45
1.5.6.2.	Uçucu Kül İlavesinin Priz Süresine Etkisi.....	48
1.5.6.3.	Uçucu Kül İlavesinin İşlenebilirliğe Etkisi.....	50
1.5.6.4.	Uçucu Kül İlavesinin Mineralojik Yapıya Etkisi.....	51
1.6.	Dolgularda Kimyasal Katkı Kullanımı.....	52
1.6.1.	Akışkanlaştırıcı Kullanımı.....	54
1.6.1.1.	Dayanıma Etkisi.....	56
1.6.1.2.	Reolojiye Etkisi.....	58
1.6.1.3.	Priz Süresine Etkisi.....	62
1.6.1.4.	Boşluk Oranına Etkisi.....	66
1.6.2.	Priz Hızlandırıcı Kullanımı.....	69
1.6.2.1.	Dayanıma Etkisi.....	71
1.6.2.2.	Priz Süresine Etkisi.....	75
1.6.2.3.	Reolojiye Etkisi.....	77
1.6.2.4.	Boşluk Oranına Etkisi.....	77
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR.....	80
2.1.	Giriş.....	80
2.2.	Malzemeler.....	81
2.2.1.	Uçucu Kül.....	81
2.2.2.	Çimento.....	82
2.2.3.	Kimyasal Katkılar.....	82
2.3.	Karışım Dizaynı.....	82
2.3.1.	Karışım Malzeme Miktarı Hesabı.....	88
2.3.2.	Karışım Numuneleri Hazırlama.....	91
2.4.	Numunelere Yapılan Deneyler.....	94
2.4.1.	Taze Numunelere Yapılan Deneyler.....	94
2.4.2.	Sertleşmiş Numunelere Yapılan Deneyler.....	96
3.	BULGULAR VE DEĞERLENDİRME.....	99
3.1.	Malzemelerin Karakterizasyonu.....	99
3.1.1.	Uçucu Kül (Atık Malzeme).....	99
3.1.2.	Çimento.....	104
3.1.3.	Kimyasal Katkılar.....	106
3.2.	Taze Karışımlara Yapılan Çalışmalar.....	107

3.2.1.	Taze Karışımların Reolojik Özellikleri.....	108
3.2.1.1.	Çimento Tipi ve Miktarının S/Ç Oranına Etkisi .....	108
3.2.1.2.	Malzeme İnceliğinin S/Ç Oranına Etkisi .....	109
3.2.1.3.	Akışkanlaştırıcı Katkıların S/Ç Oranına Etkisi .....	110
3.2.1.4.	Priz Hızlandırıcıların S/Ç Oranına Etkisi.....	113
3.2.2.	Taze Karışımların Priz Özellikleri .....	113
3.2.2.1.	Çimento Tipi ve Miktarının Priz Sürelerine Etkisi .....	113
3.2.2.2.	Priz Hızlandırıcı ve Miktarının Priz Sürelerine Etkisi .....	116
3.2.2.3.	Akışkanlaştırıcı ve Priz Hızlandırıcı Katkıların Priz Sürelerine Etkisi .....	119
3.2.2.4.	Malzeme İnceliğinin Priz Sürelerine Etkisi .....	122
3.3.	Sertleşmiş Numunelere Yapılan Çalışmalar .....	124
3.3.1.	Dayanım Deneyleri .....	124
3.3.1.1.	Bağlayıcı Tipi ve Miktarının Dayanıma Etkisi .....	125
3.3.1.2.	Akışkanlaştırıcı Tipi ve Miktarının Dayanıma Etkisi .....	129
3.3.1.3.	Priz Hızlandırıcı ve Miktarının Dayanıma Etkisi .....	139
3.3.1.4.	Akışkanlaştırıcı ve Priz Hızlandırıcı Katkıların Dayanıma Etkileri .....	142
3.3.1.5.	Malzeme İnceliğinin Dayanıma Etkisi.....	151
3.3.2.	Mikro Yapı İncelemeleri .....	154
3.3.2.1.	XRD İncelemeleri .....	155
3.3.2.2.	SEM Analizi.....	157
3.3.2.3.	Boşluk Tayini.....	165
3.4.	Dolgu Ekonomisi .....	170
4.	SONUÇLAR .....	180
5.	ÖNERİLER.....	183
6.	KAYNAKLAR .....	186
7.	EKLER.....	201

ÖZGEÇMİŞ

Doktora Tezi

ÖZET

KİMYASAL KATKILARIN UÇUCU KÜLLÜ DOLGULARDA ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

İbrahim ÇAVUŞOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Maden Mühendisliği Anabilim Dalı  
Danışman: Prof. Dr. Ali Osman YILMAZ  
2013, 204 Sayfa, 6 Sayfa Ek

Akışkanlaştırıcılar betonun taze ve sertleşmiş haldeki özellikleri üzerine olumlu etkilerinden dolayı inşaat endüstrisinde son yıllarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Dolgu içerisinde de benzer etkiyi göstermesine rağmen madencilik alanında kullanımı oldukça yetersizdir. Bu çalışmada, mekanize uzun ayak işletmesinde uygulanan yeraltı dolgusunda kimyasal katkı kullanımının etkileri incelenmiştir. İlk olarak ağırlıkça %25-75 oranında (1. karışım oranı) çimento-uçucu kül ile birlikte priz hızlandırıcı (sodyum silikat tipi) kullanılan yeraltı dolgusunun karakteristiği yapılan deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur. Daha sonra çimento miktarı kademeli olarak %22,5 (2. karışım oranı) ve %20 (3. karışım oranı) oranına düşürülmüştür. Yeni karışım oranlarında normal akışkanlaştırıcı (NA) ve süperakışkanlaştırıcı (SA) tipinde katkılar %1 ve %2 oranında kullanılmıştır. Üç karışım oranında da bağlayıcı olarak iki farklı çimento tipi (CEM I-CEM II) denenmiştir. 20 cm çökme değerine sahip numuneler 5 cm kübik kalıplarda hazırlanmış ve yüksek nem oranına (>%90) ve 20°C (±2) ısı değerine sahip dolap içerisinde 2, 7, 28 ve 90 günlük kür sürelerinde bekletilmiştir. Numunelerin dayanım, priz süresi, mikro yapıları ve ekonomileri incelenmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, akışkanlaştırıcı katkıların karışımların sabit kıvamda su miktarlarını %3-7 oranında azalttığı, dayanımlarını ise %8-32 oranında artırdığı belirlenmiştir. Mikro yapı incelemelerinde akışkanlaştırıcı kullanımının oluşan kılcal boşluk miktarında ve etrenjit jeli oluşumunda azalma sağladığı tespit edilmiştir. Akışkanlaştırıcıların priz süreleri üzerinde bir uzama etkisi, priz hızlandırıcıların ise bir kısalma sağladığı belirlenmiştir. Ayrıca priz hızlandırıcı katkıların kısa kür sürelerinde dayanımı artırdığı uzun kür sürelerinde ise dayanımı azalttığı belirlenmiştir. 2. karışım oranında akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı katkı kullanılan karışımların dayanım ve ekonomik açıdan yeraltı dolgusunda kullanımının uygun olacağı öngörülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Akışkanlaştırıcı katkılar, Mekanize uzun ayak, Priz hızlandırıcı katkı, Priz süresi, Uçucu küller, Yeraltı dolgusu

PhD. Thesis

SUMMARY

THE INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF CHEMICAL ADMIXTURES ON BACKFILL  
WITH FLY ASH

İbrahim ÇAVUŞOĞLU

Karadeniz Technical University  
The Institute of Science and Technology  
Mining Engineering Graduate Program  
Supervisor: Assoc. Prof. Ali Osman YILMAZ  
2013, 204 Pages, 6 Pages Appendix

In recent years, plasticizers have been widely used in construction industry due to having positive effects on properties of fresh and hardened concrete. Although the plasticizers show similar effects on properties of backfill, their usage in the area of mining is quite inadequate. In this study, effects of use of plasticizers in backfill applications of mechanized longwall were investigated. First, characteristics of underground backfill containing cement-fly ash ratio of 25-75% by weight (1st mix ratio) and accelerator (sodium silicate type) were revealed using experimental studies. Then, amount of cement was gradually reduced to 22,5% (2nd mix ratio) and 20% (3rd mix ratio). Addition %1 and %2 of normal plasticizers (NA) and superplasticizers (SA) were used in these new mixing ratios (2nd and 3rd). Two type cements (CEM I and CEM II) were used in all mixing ratios. The backfill samples with 20 cm slump value were molded in 5 cm cubic molds, cured at higher than %90 humidity and temperature 20°C ( $\pm 2$ ), then pastes were kept for different time intervals 2, 7, 28 and 90 days. Strengths, setting times, micro-structures and economies of samples were studied.

Results of experimental studies showed that plasticizers reduced water content of mixtures by %3 to %7 at constant consistency, increased compressive strength of mixtures by %8 to %32. Micro structural investigations identified that the cumulative pore size and formation of ettringite gel of samples was reduced by addition plasticizers. It was also determined that plasticizers delayed in setting time of samples but accelerator declined in setting time of samples. However, it was observed that accelerator additive increased in early strength of samples but adverse effect in ultimate strength of samples. It was foreseen that mixtures prepared with plasticizers and accelerator at 2nd mix ratio can be use in underground mechanized longwall backfill applications in terms of strength and economic.

**Key Words:** Plasticizers, Mechanized longwall, Accelerator, Setting time, Fly ash, Underground backfill

## ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1. Çimentolu kaya dolgusu boşluklara yerleştirilirken .....	7
Şekil 1.2. Hidrolik dolgu barikatı .....	9
Şekil 1.3. Hidrolik dolguda su drenajı .....	9
Şekil 1.4. Macun dolguda malzeme görünümü .....	10
Şekil 1.5. Macun dolgunun hazırlanması ve yeraltına transfer edilmesi .....	11
Şekil 1.6. Dolgu karışımlarında kullanılan malzemeler ve etkilerinin şematik gösterimi .....	13
Şekil 1.7. Kanada’da dolgu malzemelerinin kullanım oranları .....	14
Şekil 1.8. Küllerin termik santrallerde oluşumu .....	15
Şekil 1.9. Uçucu külün SEM ile çekilmiş görüntüsü .....	16
Şekil 1.10. Değişik renge sahip uçucu küller .....	16
Şekil 1.11. Uçucu küllerin bazı özelliklerine göre kullanım alanları .....	20
Şekil 1.12. Uçucu küllü macun dolgu .....	29
Şekil 1.13. Yeraltı mekanize uzun ayak madenciliğinde dolgulu çalışma planı .....	30
Şekil 1.14. Birincil enerji kaynaklarının tükenme ömrü.....	33
Şekil 1.15. Küllerin depolanmasından kaynaklanan çevresel etkiler .....	34
Şekil 1.16. Yer bulduru haritası .....	36
Şekil 1.17. B sahası ayak plan görünümü .....	38
Şekil 1.18. C ve G sahaları ayak plan görünümleri .....	38
Şekil 1.19. Yerüstü dolgu karışım istasyonu .....	39
Şekil 1.20. Yeraltı dolgu işleyiş şeması .....	40
Şekil 1.21. Yeraltı dolgu istasyonu karışım tesisi.....	41
Şekil 1.22. Ayakbaşı kalıbına dolgu yapılışı .....	41
Şekil 1.23. Mekanize ayaklarda kesici-yükleyici ile arın kesim yöntemi.....	42
Şekil 1.24. Çayırhan yeraltı mekanize ayaklarda kesici-yükleyici makine üretim çizelgesi .....	44
Şekil 1.25. Mekanize ayakta dolgu açıklığı .....	44
Şekil 1.26. Uçucu kül-çimento hamurunun dayanımına uçucu kül ilave oranının etkisi; suda kür edilmiş numuneler (a), ilk 7 gün suda sonra hava koşullarında kür edilmiş numuneler (b) .....	46

Şekil 1.27. Çimento yerine kütlece aynı oranda uçucu kül ilavesinin çimento hamuru dayanımına etkisi .....	47
Şekil 1.28. Çimento üzerine kütlece ekstra uçucu kül ilavesinin çimento hamuru dayanımına etkisi .....	47
Şekil 1.29. Uçucu kül ikameli çimento karışımlarının dayanım değişimleri .....	48
Şekil 1.30. Ögütülmüş uçucu kül ikame oranının çimento hamuru priz sürelerine etkisi .....	49
Şekil 1.31. Çimento hamurunda çimento yerine uçucu kül ikamesinin priz sürelerine etkisi .....	49
Şekil 1.32. Uçucu kül ikamesinin çimento hamuru içerisinde su gereksinimine etkisi .....	51
Şekil 1.33. Çimento ve çimento-uçucu kül hamurunun farklı kür zamanlarında XRD profili .....	51
Şekil 1.34. Çimento (a) ve çimentolu-uçucu küllü karışımların (b) zamana bağlı olarak içerdiği farklı fazların hacimsel görünümü .....	52
Şekil 1.35. Akışkanlaştırıcı katkıların dolgu dayanım ve dürabilitesine etkisi .....	57
Şekil 1.36. Çimento hamuru üzerine süperakışkanlaştırıcı etkisi, A: Çimento+Su; B: Çimento+Su+Süperakışkanlaştırıcı .....	58
Şekil 1.37. Süperakışkanlaştırıcı ilavesiyle gözlemlenen su azaltma .....	59
Şekil 1.38. Süperakışkanlaştırıcı etki mekanizması .....	60
Şekil 1.39. Üç farklı akışkanlaştırıcı tipinin macun dolguda S/Ç oranına etkisi .....	61
Şekil 1.40. Farklı tipte akışkanlaştırıcı katkıların çimento hamuru priz süresine etkisi .....	64
Şekil 1.41. Kimyasal katkı miktarının çimento hamuru priz süreleri üzerine etkisi .....	64
Şekil 1.42. Kimyasal katkıların (akışkanlaştırıcı-priz hızlandırıcı) uçucu küllü dolgularda priz süresine etkisi .....	65
Şekil 1.43. Akışkanlaştırıcı katkı dozajının çimento hamuru üzerindeki toplam porozite ve ortalama boşluk çapına 2 günlük kür süresinde etkisi .....	67
Şekil 1.44. Akışkanlaştırıcı katkı dozajının çimento hamuru üzerindeki toplam porozite ve ortalama boşluk çapına 28 günlük kür süresinde etkisi .....	68
Şekil 1.45. Çeşitli tipte kimyasal katkı ile elde edilen sertleşmiş numunelerin boşluk hacimleri, (a) 28 gün (b) 91 gün .....	69
Şekil 1.46. Farklı tipteki akışkanlaştırıcıların taze haldeki çimento hamuru yığın yapısına etkisi .....	69
Şekil 1.47. Alkali-aktif fosfor cüruf çimentosunun dayanımına sodyum silikat modül oranının etkisi .....	73
Şekil 1.48. Priz hızlandırıcı katkının %80 katı ve %7 ve %9 bağlayıcı oranına sahip dolgu karışımlarında dayanıma etkisi .....	74
Şekil 1.49. Priz hızlandırıcı katkının %83 katı ve %7 ve %9 bağlayıcı oranına sahip dolgu karışımlarında dayanıma etkisi .....	74

Şekil 1.50. Sodyum silikat modül oranının priz süresine etkisi .....	76
Şekil 1.51. Priz hızlandırıcı katkıların dolgu priz sürelerine etkisi .....	77
Şekil 1.52. Sodyum silikat katkısının dolgu boşluk miktarına etkisi, katkı kullanılmayan numune (a), %2 sodyum silikat katkısı kullanılan numune (b) ve %4 sodyum silikat katkısı kullanılan numune .....	78
Şekil 2.1. Tez çalışmasında kullanılan malzemeler ve oranları.....	83
Şekil 2.2. Bütün karışımlar için malzemelerin dolgu kalıbı içerisinde hacimce ve ağırlıkça yaklaşık bulunma oranları.....	91
Şekil 2.3. Karışım numuneleri hazırlama akış diyagramı.....	92
Şekil 2.4. Dolgu karışımında kullanılan mikser (a), karışım malzemelerinin miksere konulmadan yapılan ön karıştırma işlemi (b) .....	93
Şekil 2.5. Karışımında kullanılan kimyasal katkılar .....	93
Şekil 2.6. Çalışmada kullanılan numune kalıpları (a), numunelerin bırakıldığı kür ortamı (saklama dolabı) (b) ve taze karışım numunelerinin kalıplandıktan sonra tabii tutulan vibrasyon masası (c) .....	94
Şekil 2.7. Taze ve sertleşmiş numunelere yapılan deneysel çalışmaların akış şeması .....	95
Şekil 2.8. Taze karışıma yapılan çökme deneyi (a) ve priz başlangıç-bitiş süresi ölçer vikat deney aleti (b) .....	95
Şekil 2.9. S/Ç oranını etkileyen parametreler .....	96
Şekil 2.10. Priz süresini etkileyen parametreler .....	96
Şekil 2.11. Tek eksenli basınç dayanımına etki eden parametreler .....	97
Şekil 2.12. Sertleşmiş numunelere yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan cihazlar; tek eksenli basma dayanım aleti (a), SEM analizi deney aleti (b), XRD analizi deney aleti (c) ve civa porozimetresi deney aleti (d) .....	97
Şekil 2.13. Mikro yapıya etki eden parametreler .....	98
Şekil 3.1. Uçucu küllerin tane boyu analizleri.....	99
Şekil 3.2. Uçucu külün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı .....	102
Şekil 3.3. Uçucu küllere ait SEM görüntüsü, normal kül (a), 5 dk öğütülmüş kül (b) ve 15 dk öğütülmüş kül (c) .....	103
Şekil 3.4. CEM I ve CEM II çimentosuna ait tane boyu analizi.....	104
Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan çimentoların ve külün $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ternary diyagramı (a), çimentolu malzemelerin $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ standart ternary diyagramı (b) .....	106
Şekil 3.6. Çimento tiplerine göre (CEM I, CEM II) çimento miktarına bağlı olarak S/Ç ve su miktarı değişimleri .....	108
Şekil 3.7. Öğütülmüş kül malzemesi (15 dk ve 5 dk) ilave oranlarına bağlı olarak S/Ç ve su miktarı değişimleri .....	109
Şekil 3.8. İkinci karışım oranlarıyla hazırlanan numunelerde akışkanlaştırıcıların su azaltma oranları .....	111

Şekil 3.9. Üçüncü karışım oranlarıyla hazırlanan numunelerde akışkanlaştırıcıların su azaltma oranları .....	111
Şekil 3.10. İkinci karışım oranlarında akışkanlaştırıcıların S/Ç oranına etkisi.....	112
Şekil 3.11. Üçüncü karışım oranlarında akışkanlaştırıcıların S/Ç oranına etkisi .....	112
Şekil 3.12. Çimento tipi ve miktarının priz süresine etkisi.....	114
Şekil 3.13. Çimento (CEM I ve CEM II) miktarına bağlı olarak priz başlangıç-bitiş süresi değişimleri .....	116
Şekil 3.14. Priz hızlandırıcı katkı ve kullanım oranının priz süresine etkisi .....	117
Şekil 3.15. Her iki çimento tipinde (CEM I-CEM II) priz hızlandırıcı miktarına bağlı olarak priz başlangıç-bitiş süresi değişimleri .....	119
Şekil 3.16. Üçüncü karışım oranında %1 priz hızlandırıcı ve akışkanlaştırıcı katkı kullanımının priz başlangıç-bitiş sürelerine etkisi.....	120
Şekil 3.17. İkinci karışım oranlarında CEM I ve CEM II çimentosuyla oluşturulan numunelerde %1 ve %2 oranında NA ve SA akışkanlaştırıcı katkıların priz hızlandırıcı ile birlikte kullanımının priz süresine etkisi.....	121
Şekil 3.18. Öğütülmüş külün (5 ve 15 dk öğütülmüş malzeme) dolgu içerisinde atık malzeme yerine ikame kullanımının priz süresine etkisi.....	122
Şekil 3.19. Basma dayanım deneyi sonunda kırılan numunelerin uygun ve uygun olmayan biçimleri .....	124
Şekil 3.20. Tek eksenli basınç dayanım deneyi sonunda kırılan numune şekilleri.....	125
Şekil 3.21. Farklı tipte çimento ile farklı çimento-kül değerlerinde oluşturulan katkısız dolgu karışımlarının kısa dönemli (2-7 gün) dayanım değerleri.....	126
Şekil 3.22. Farklı tipte çimento ile farklı çimento-kül değerlerinde oluşturulan katkısız dolgu karışımlarının kısa dönemli (28-90 gün) dayanım değerleri...	126
Şekil 3.23. İkinci ve üçüncü karışım oranları ile hazırlanan numunelerin birinci karışım oranlarıyla hazırlanan numunelerle dayanım kıyaslaması.....	127
Şekil 3.24. Saf çimento bileşenlerinin dayanım gelişimi .....	129
Şekil 3.25. İkinci karışım oranında CEM I çimentosuyla yapılan karışımlarda akışkanlaştırıcı tipi (SA ve NA) ve oranının kısa (2-7 gün) dönemli dayanıma etkisi .....	130
Şekil 3.26. İkinci karışım oranında CEM I çimentosuyla yapılan karışımlarda akışkanlaştırıcı tipi (SA ve NA) ve oranının uzun (28-90 gün) dönemli dayanıma etkisi .....	131
Şekil 3.27. İkinci karışım oranında CEM II çimentosuyla yapılan karışımlarda akışkanlaştırıcı tipi (SA ve NA) ve oranının kısa (2-7 gün) dönemli dayanıma etkisi .....	132
Şekil 3.28. İkinci karışım oranında CEM II çimentosuyla yapılan karışımlarda akışkanlaştırıcı tipi (SA ve NA) ve oranının uzun (28-90 gün) dönemli dayanıma etkisi .....	133

Şekil 3.29. Üçüncü karışım oranında CEM I çimentosuyla yapılan karışımlarda akışkanlaştırıcı tipi (SA ve NA) ve oranının kısa (2-7 gün) dönemli dayanıma etkisi .....	134
Şekil 3.30. Üçüncü karışım oranında CEM I çimentosuyla yapılan karışımlarda akışkanlaştırıcı tipi (SA ve NA) ve oranının uzun (28-90 gün) dönemli dayanıma etkisi .....	135
Şekil 3.31. Üçüncü karışım oranında CEM II çimentosuyla yapılan karışımlarda akışkanlaştırıcı tipi (SA ve NA) ve oranının kısa (2-7 gün) dönemli dayanıma etkisi .....	136
Şekil 3.32. Üçüncü karışım oranında CEM II çimentosuyla yapılan karışımlarda akışkanlaştırıcı tipi (SA ve NA) ve oranının uzun (28-90 gün) dönemli dayanıma etkisi .....	137
Şekil 3.33. Hidratasyon gelişme derecesinin fiziksel açıklaması .....	139
Şekil 3.34. Priz hızlandırıcı miktarının CEM I çimentosuyla oluşturulan karışımların kısa dönemli (2-7 gün) dayanım gelişimine etkisi .....	139
Şekil 3.35. Priz hızlandırıcı miktarının CEM II çimentosuyla oluşturulan karışımların kısa dönemli (2-7 gün) dayanım gelişimine etkisi.....	140
Şekil 3.36. Priz hızlandırıcı miktarının CEM I çimentosuyla oluşturulan karışımların uzun dönemli (28-90 gün) dayanım gelişimine etkisi.....	141
Şekil 3.37. Priz hızlandırıcı miktarının CEM II çimentosuyla oluşturulan karışımların uzun dönemli (28-90 gün) dayanım gelişimine etkisi .....	142
Şekil 3.38. Her iki çimento tipinde hazırlanan ve priz hızlandırıcı katkının %0,5 ve %1 oranında kullanıldığı 1. karışım oranındaki numuneler ile aynı oranlarda priz hızlandırıcılar ile birlikte %1 oranında NA ve SA katkısının kullanıldığı 2. ve 3. karışım oranındaki numunelerin 2 günlük dayanım karşılaştırması .....	143
Şekil 3.39. Her iki çimento tipinde hazırlanan ve priz hızlandırıcı katkının %0,5 ve %1 oranında kullanıldığı 1. karışım oranındaki numuneler ile aynı oranlarda priz hızlandırıcılar ile birlikte %2 oranında NA ve SA katkısının kullanıldığı 2. ve 3. karışım oranındaki numunelerin 2 günlük dayanım karşılaştırması .....	144
Şekil 3.40. Her iki çimento tipinde hazırlanan ve priz hızlandırıcı katkının %0,5 ve %1 oranında kullanıldığı 1. karışım oranındaki numuneler ile aynı oranlarda priz hızlandırıcılar ile birlikte %1 oranında NA ve SA katkısının kullanıldığı 2. ve 3. karışım oranındaki numunelerin 7 günlük dayanım karşılaştırması .....	145
Şekil 3.41. Her iki çimento tipinde hazırlanan ve priz hızlandırıcı katkının %0,5 ve %1 oranında kullanıldığı 1. karışım oranındaki numuneler ile aynı oranlarda priz hızlandırıcılar ile birlikte %2 oranında NA ve SA katkısının kullanıldığı 2. ve 3. karışım oranındaki numunelerin 7 günlük dayanım karşılaştırması .....	146
Şekil 3.42. Her iki çimento tipinde hazırlanan ve priz hızlandırıcı katkının %0,5 ve %1 oranında kullanıldığı 1. karışım oranındaki numuneler ile aynı oranlarda priz hızlandırıcılar ile birlikte %1 oranında NA ve SA	

katkısının kullanıldığı 2. ve 3. karışım oranındaki numunelerin 28 günlük dayanım karşılaştırması .....	147
Şekil 3.43. Her iki çimento tipinde hazırlanan ve priz hızlandırıcı katkının %0,5 ve %1 oranında kullanıldığı 1. karışım oranındaki numuneler ile aynı oranlarda priz hızlandırıcılar ile birlikte %2 oranında NA ve SA katkısının kullanıldığı 2. ve 3. karışım oranındaki numunelerin 28 günlük dayanım karşılaştırması .....	148
Şekil 3.44. Her iki çimento tipinde hazırlanan ve priz hızlandırıcı katkının %0,5 ve %1 oranında kullanıldığı 1. karışım oranındaki numuneler ile aynı oranlarda priz hızlandırıcılar ile birlikte %1 oranında NA ve SA katkısının kullanıldığı 2. ve 3. karışım oranındaki numunelerin 90 günlük dayanım karşılaştırması .....	149
Şekil 3.45. Her iki çimento tipinde hazırlanan ve priz hızlandırıcı katkının %0,5 ve %1 oranında kullanıldığı 1. karışım oranındaki numuneler ile aynı oranlarda priz hızlandırıcılar ile birlikte %2 oranında NA ve SA katkısının kullanıldığı 2. ve 3. karışım oranındaki numunelerin 90 günlük dayanım karşılaştırması .....	150
Şekil 3.46. Öğütülmüş (5 dk) malzemenin dayanıma etkisi .....	151
Şekil 3.47. Öğütülmüş (15 dk) malzemenin dayanıma etkisi .....	153
Şekil 3.48. Öğütülmüş malzeme kullanılan numunelerde S/Ç oranı ve su miktarına bağlı olarak 2 ve 7 günlük dayanım değişimi .....	154
Şekil 3.49. X-ışınları kırınımölçeri ile priz hızlandırıcı kullanılan ve kullanılmayan 2 günlük numunelerin mineralojik yapısının incelenmesi [Anh.= anhidrit ( $\text{CaSO}_4$ ); $\text{C}_3\text{S}$ = tri kalsiyum silika ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ); CH = portlandit ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ); Hem. = hematit ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ); Kv. = kuvars ( $\text{SiO}_2$ )]......	155
Şekil 3.50. X-ışınları kırınımölçeri ile priz hızlandırıcı kullanılan, kullanılmayan ve akışkanlaştırıcı kullanılan 90 günlük numunelerin mineralojik yapısının incelenmesi [C-(A)-S-H = kalsiyum alumina silika hidrat, Ett.= etrenjit ( $\text{Ca}_6\cdot\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3\cdot(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ); C-H = portlandit ( $\text{Ca}\cdot(\text{OH})_2$ ); Ms. = monosülfat ( $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{SO}_4)\cdot 14\text{H}_2\text{O}$ )].....	156
Şekil 3.51. CEM I çimentosuyla oluşturulan katkısız numunenin SEM görüntüsü .....	158
Şekil 3.52. CEM I çimentosuyla oluşturulan priz hızlandırıcılı numunenin SEM görüntüsü .....	159
Şekil 3.53. CEM I çimentosuyla oluşturulan akışkanlaştırıcı (SA) kullanılan numunenin SEM görüntüsü .....	160
Şekil 3.54. Beton içerisinde artan S/Ç oranına bağlı olarak boşluk gelişimi (Mindess vd., 2003). .....	161
Şekil 3.55. CEM I çimentosuyla katkısız oluşturulan numunenin SEM görüntüsü ve EDX analizi .....	162
Şekil 3.56. CEM I çimentosuyla priz hızlandırıcı katkı ile oluşturulan numunenin SEM görüntüsü ve EDX analizi .....	163
Şekil 3.57. CEM I çimentosuyla akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı kullanılan numunenin SEM görüntüsü ve EDX analizi (Örnek 1). .....	163

Şekil 3.58. CEM I çimentosuyla akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı kullanılan numunenin SEM görüntüsü ve EDX analizi (Örnek 2).....	164
Şekil 3.59. CEM I çimentosuyla akışkanlaştırıcı kullanılan numunenin SEM görüntüsü ve EDX analizi.....	164
Şekil 3.60. Çimento miktarı ve priz hızlandırıcının boşluk oranına etkisi .....	166
Şekil 3.61. Farklı çimento miktarı ve priz hızlandırıcı kullanılan numunelerin kümülatif boşluk oranları.....	167
Şekil 3.62. Akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcının boşluk miktarına etkisi.....	168
Şekil 3.63. Akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı kullanılan numunelerin kümülatif boşluk oranları .....	168
Şekil 3.64. %1 priz hızlandırıcı katkı ile birlikte farklı oranlarda akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerin 1 m <sup>3</sup> dolgu içerisinde oluşan maliyeti .....	172
Şekil 3.65. Mekanize ayakta 1500 m boyunda bir panoda dolgu kalıbı toplam hacmi ....	172
Şekil 3.66. İkinci ve üçüncü karışım oranlarında CEM I çimentosu ve %1 NA-%1 priz hızlandırıcı katkısı ile oluşturulan numunelerin birinci karışım oranında %1 priz hızlandırıcı ile oluşturulan karışım numunesi ile maliyet-dayanım-priz süreleri karşılaştırması .....	175
Şekil 3.67. İkinci ve üçüncü karışım oranlarında CEM I çimentosu ve %1 SA-%1 priz hızlandırıcı katkısı ile oluşturulan numunelerin birinci karışım oranında %1 priz hızlandırıcı ile oluşturulan karışım numunesi ile maliyet-dayanım-priz süreleri karşılaştırması .....	176
Şekil 3.68. İkinci ve üçüncü karışım oranlarında CEM II çimentosu ve %1 NA-%1 priz hızlandırıcı katkısı ile oluşturulan numunelerin birinci karışım oranında %1 priz hızlandırıcı ile oluşturulan karışım numunesi ile maliyet-dayanım-priz süreleri karşılaştırması .....	177
Şekil 3.69. İkinci ve üçüncü karışım oranlarında CEM II çimentosu ve %1 SA-%1 priz hızlandırıcı katkısı ile oluşturulan numunelerin birinci karışım oranında %1 priz hızlandırıcı ile oluşturulan karışım numunesi ile maliyet-dayanım-priz süreleri karşılaştırması .....	179
Şekil 5.1. Mekanize üretimde yeraltı malzeme karışım mikseri için yeni önerilen yer .....	184
Şekil 5.2. Dolguda yetersiz dayanımın neden olduğu tahkimat elemanında bozulmalar .....	185

## TABLolar LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1.1. Kaya dolgusunun üstünlükleri ve sakıncaları .....	8
Tablo 1.2. Hidrolik dolgunun üstünlükleri ve sakıncaları .....	10
Tablo 1.3. Macun dolgunun üstünlükleri ve sakıncaları .....	12
Tablo 1.4. Temel dolgu yöntemlerine ait özelliklerin karşılaştırması .....	12
Tablo 1.5. Farklı kaynaklı uçucu küllerin kimyasal bileşimi .....	17
Tablo 1.6 Farklı kömür tiplerinden üretilen uçucu küllerin kimyasal bileşimleri.....	18
Tablo 1.7. Amerikan ve Avrupa standardına göre uçucu küllerin sınıflandırılması .....	19
Tablo 1.8. Amerikan “Uçucu Kül Kullanımı” (Fly Ash Utilization) kurumuna göre uçucu küllerin sınıflaması .....	19
Tablo 1.9. Amerika’da uçucu külün kullanım alanları .....	21
Tablo 1.10. Kimyasal katkı tipleri .....	53
Tablo 2.1. İki farklı çimento tipi ile farklı oranlarda yapılan karışım tasarımı. ....	84
Tablo 2.2. Farklı tipte çimento ile farklı oranlarda priz hızlandırıcı katkı kullanarak hazırlanan karışım tasarımı .....	84
Tablo 2.3. Farklı oranlarda ve farklı tipte akışkanlaştırıcı katkı ve çimento ile hazırlanan karışım tasarımı .....	86
Tablo 2.4. Farklı oranlarda akışkanlaştırıcı katkıların dolgu içerisindeki etkilerinin değişik priz hızlandırıcı oranları ile incelenmesi için yapılan karışım tasarımı .....	87
Tablo 2.5. Öğütülen (5-15 dk) uçucu külün normal kül yerine ilave edildiği karışım miktarları tablosu.....	88
Tablo 3.1. Uçucu külün kimyasal analizi ve standartları ile karşılaştırması .....	101
Tablo 3.2. Çimentolara ait kimyasal analiz sonuçları, standartlar ve kimyasal bileşenleri .....	105
Tablo 3.3. Kullanılan kimyasal katkıların özellikleri .....	106
Tablo 3.4. Kullanılan priz hızlandırıcının kimyasal yapısı .....	107
Tablo 3.5. Farklı çimento miktarlarının priz başlangıç-bitiş süreleri. ....	114
Tablo 3.6. Farklı oranlarda priz hızlandırıcı katkının dolgu priz başlangıç-bitiş süreleri.....	118
Tablo 3.7. Öğütülmüş malzemenin farklı oranlarda kullanımı ile dolgu priz sürelerinin değişimi .....	123
Tablo 3.8. Çimento hamurundaki boşlukların tanımlanması .....	169

Tablo 3.9. Boşluk tayini deneyinde kullanılan numunelerin S/Ç oranı ve su miktarları .....	170
Tablo 3.10. Bir panodaki malzeme miktarlarının örnek hesap tablosu .....	173

## SEMBOLLER VE KISALTMALAR

ASTM	: Amerikan standardı
C	: C sınıfı uçucu kül
C-(A)-S-H	: Al modifiyeli kalsiyum silika hidrat jeli
C <sub>2</sub> S	: Di kalsiyum silika
C <sub>3</sub> A	: Tri kalsiyum alümina
C <sub>3</sub> S	: Tri kalsiyum silika
C <sub>4</sub> AF	: Tetra kalsiyum alümino ferrit
Ca(OH) <sub>2</sub>	: Portlandit
CE	: Poliakrilat tipi akışkanlaştırıcı
CEM I 42,5 R	: Erken yüksek dayanıma sahip normal portland çimentosu
CEM II 42,5 R	: Erken yüksek dayanıma sahip katkılı portlant çimentosu
C-S-H	: Kalsiyum silika hidrat jeli
EDX	: Enerji saçınım spektroskopisi
EN	: Avrupa birliği standardı
F	: F tipi uçucu kül
LS	: Lignosülfonat tipi akışkanlaştırıcı
MLS	: Modifiye lignosülfat tipi akışkanlaştırıcı
NA	: Normal akışkanlaştırıcı
PC	: Polikarboksilat tipi akışkanlaştırıcı
S/Ç	: Su/çimento oranı
S+A+F	: SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O oksitli bileşikler toplam değeri
SA	: Süperakışkanlaştırıcı
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu (Scanning electron microscope)
SMF	: Sülfone edilmiş melamin formaldehit tipi akışkanlaştırıcı
SNF	: Sülfone edilmiş naftalin formaldehit tipi akışkanlaştırıcı
SS	: Sodyum silikat
TÇMB	: Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği
XRD	: X-ışını kırınım yöntemi (mineralojik tayin için)

## 1. GENEL BİLGİLER

### 1.1. Giriş

Atık, ihtiyaç duyulmayan ve uzaklaştırılan veya mevzuat hükümlerine göre bertaraf edilmek zorunda olan her türlü madde olarak tanımlanmaktadır (Karapınar, 2009). Atıklar endüstrinin hemen her alanında çeşitli biçimlerde meydana gelmektedir. Gelişen teknoloji ve artan nüfus ile birlikte çoğalan atıklar çevreye ve insan sağlığına olan olumsuz etkileri ile büyük bir sorun haline gelmektedir. Özellikle ülkelerin kalkınmasında önemli bir faktör olan enerji sektöründeki hızlı büyüme ile bu alanda meydana gelen atık malzemelerin çoğalması bu sorunun artmasında etkili olmaktadır.

Günümüz enerji ihtiyacının büyük bir kısmı, ömrü en uzun olan birincil enerji kaynağı kömür ile karşılanmaktadır. Ancak enerji üretiminde kömürün kullanılması ile bazı çevresel sorunlar ortaya çıkmaktadır. Özellikle termik santrallerde elektrik üretmek amacıyla kullanılan kömürün yanmasıyla oluşan hava emisyonları ve küller, çevresel açıdan zararlı bir takım olumsuzlukları meydana getirmektedir (Avcı, 2005; Meegoda vd., 2011). Termik santraller genellikle düşük kalorili kömür (linyit) yataklarının bulunduğu bölgelere yakın yerlerde kurulmaktadır. Bu kömürler madencilik faaliyetleri sonrasında yerkabuğundan çıkartılarak termik santrallere beslenmektedirler. Tüm dünyada elektrik enerjisi üretmek için yanma ürünü olarak kullanılan kömürün santrallerde yakılması sonucunda yaklaşık olarak 600 milyon ton atık kül ortaya çıkmaktadır (Blissett ve Rowson, 2012). Son yıllarda atık malzemelerin değerlendirilmesi ile ilgili çalışmaların yoğunluğu göze çarpsa da endüstriyel bir atık olan küllerin dünyada %25'inden daha azı değerlendirilmektedir (Şengül, 2002; Aruntaş, 2006; Meegoda vd., 2011). Az miktarda da olsa küller puzolanik özelliklerinden dolayı genellikle inşaat sektöründe kullanılmaktadır. Son zamanlarda atık malzemelerin depolanma alanlarında ve çevresel problemlerden kaynaklı yaşanan sıkıntılar nedeniyle, santral atığı küllerin özellikle madencilik ve inşaat sektörlerinde dolgu malzemesi olarak kullanılarak bertaraf edilmesinde büyük bir artış söz konusu olmaktadır (Çavuşoğlu, 2008).

Madencilikte, yeraltından cevherin çıkarılmasından sonra doldurulması gerekli büyük boşluklar oluşmaktadır. Maden dolgusu, ekonomik olarak çalışma ortamını güvenli halde tutmak için madencilik faaliyetleri esnasında oluşturulan bu boşlukların tamamı veya

büyük bir kısmının doldurulması işlemi olarak tanımlanmaktadır. Boşluklara doldurulan malzemelere ise dolgu malzemesi adı verilir. Özellikle son yıllarda dolgu malzemesi olarak genellikle maden işletmelerinin atıkları kullanılmaktadır. Maden atıklarının yeraltında kullanılmasıyla, yüzeyde yeniden atık barajlarının veya atık depolama alanlarının yapılmayacak olmasından dolayı çevresel etki azaltılmış olmaktadır. Ayrıca bölgesel stabilite ve madenin bulunduğu faaliyet alanının daha güvenli olması ve ekonomik madencilik için kullanılabilir bir malzeme temin edilmiş olur (Benzaazoua vd., 2002; Rankine, 2002; Sivakugan vd., 2006a).

Madencilikte yeraltı dolgusu, çimento, su ve atık malzemedan oluşan bir karışımdır. Karışımda atık malzeme olarak kayaç, agrega, kum, tesis atıkları, cüruflar, küller vb. gibi malzemeler kullanılmaktadır (Hassani ve Archibald, 1998; Çavuşoğlu, 2008). Özellikle son yıllarda tesis atıkları ve termik santral atığı küllerin dolgu malzemesi olarak kullanımında büyük artış söz konusu olmaktadır. Bu tip atıkların ince boyutlu olmaları yeraltı boşluklarına nakliyesini kolaylaştırdığı için kullanımlarını artırmaktadır. Santral atığı uçucu küllerin dolgu içerisinde hem atık malzeme hem de puzolanik özelliği ile çimentoya ek veya kendi başına bağlayıcı malzeme olarak kullanılması söz konusudur. Bu durum küllerin dolgu içerisinde kullanımlarını daha da önemli kılmaktadır.

Dolgu içerisinde atık malzeme, çimento ve su dışında kimyasal katkı malzemeleri de kullanılmaktadır. Özellikle inşaat sektöründe yaygın kullanım alanı bulan kimyasal katkılar özellikle taze ve sertleşmiş betonun özelliklerini değiştirerek olumlu katkılar sağlamaktadırlar. Benzer etkileri sağlamasına rağmen inşaat sektöründe oldukça yaygın kullanımı olan katkıların madencilikte yaygın hale gelmemiş olması düşündürücüdür. Kimyasal katkıların dolgu içerisinde kullanımına yönelik literatürde de çok fazla çalışmanın olmayışı katkıların madencilik alanında yaygın kullanımını sınırlamıştır. Ayrıca yapılan çalışmaların eksik olması aynı zamanda madencilik alanında çalışanların katkı kullanımını ile ilgili eksik veya yetersiz bilgisine sebebiyet vermiştir.

## **1.2. Tezin Gerekçesi ve Amacı**

Madencilikte yeraltı dolgularında genellikle maden üretimi veya cevher hazırlama tesisi sonrasında meydana gelen atık malzemeler kullanılmaktadır. Bu atıkların kullanılmasıyla hem ekonomik madencilik sağlanmakta hem de çevresel açıdan sorun teşkil eden atık malzemeler bertaraf edilmektedir. Ancak tüm yeraltı madencilik

uygulamalarında atık malzemeler bu şekilde bertaraf edilmeyerek çevresel açıdan büyük sorun teşkil etmektedir. Özellikle yeraltı madencilik metodu ile üretilen düşük kalorili kömür uygulamalarında kömürün elektrik üretimi için termik santrallerde yakılması sonrasında ortaya çıkan küller farklı endüstriyel alanlarda kullanılmadıklarında çevresel açıdan büyük sorun teşkil etmektedirler. Genellikle de madencilik alanına yakın yerlerde yüzeyde yığın şeklinde biriktirilmektedirler. Bunun önüne geçilmesi için, küllerin yeraltı uygulamalarında üretim sonrası açığa çıkan boşluklara doldurularak bertaraf edilmesi gerekmektedir.

Kömüre dayalı enerji politikasının önem kazandığı ülkemizde mekanize yöntemle kömür üretiminin artması ve enerji üretimi sonrasında açığa çıkacak atık malzemelerin de artması anlamına gelmektedir. Bu durumda atık malzemelerin uygun biçimlerde değerlendirilmesi ve/veya bertaraf edilmesi gerekmektedir. Bu tez kapsamında yeraltı mekanize kömür işletmelerinde santral atığı uçucu küllerin dolgu malzemesi olarak kullanılarak bertaraf edilmesi anlatılmıştır. Ülkemizde sadece Çayırhan Yeraltı Kömür İşletmesinde uygulanan dolgulu mekanize uzun ayak yönteminde dolgu boşluğunun oluşması, dolgunun yöntem için önemi, dolgu priz süresi-yöntem ilişkisi ve kullanılan priz hızlandırıcı kimyasal katkının dolgu için önemi bu tez kapsamında ayrıntılı bir biçimde ele alınmıştır. Ayrıca dolgu içerisinde priz hızlandırıcı ve akışkanlaştırıcı kimyasal katkı maddelerinin kullanılabilirliği incelenmiştir. Burada ki amaç; kimyasal katkı kullanımının dolgunun bir takım özelliklerine olumlu etkilerinin ve potansiyel faydalarının ortaya konulmasıdır. Bununla birlikte uygulamada kullanımlarına yönelik gerekli katkıların sağlanmasıdır.

### **1.3. Madencilikte Yeraltı Dolgusu**

Madencilikte dolgu, yeraltı maden işletmelerinde cevher üretimi sonucunda oluşan boşlukların bölgesel stabilite, ekonomik madencilik ve atık malzemelerin depolanması gibi mühendislik gereksinimlerinin sağlanması amacıyla uygun malzemeler kullanarak doldurulması işlemidir (Archibald vd., 1993; Grice, 1998). Yeraltı dolgu işlemi dünyada artan bir şekilde hem metal madenciliği hem de kömür madenciliğinde yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Üretim sonrası oluşan boşlukların doldurulması ve yakın diğer üretim bölgelerindeki çalışma ortamının emniyeti bakımından önemlidir. Boşlukların doldurulmasıyla oluşturulan yeraltı dolgusu bir anlamda tahkimat görevi üstlenmektedir.

Yeraltında yapılan dolgunun amacı tavan yükünü yaymak değil, kaya kütlelerinin gevşemelerini azaltmaktır. Böylece, kaya kendi kendine yük taşıma kapasitesini sürdürüp topuk ve kemerlerdeki yükü azaltarak yeraltı işletmesindeki zemin koşullarının daha az bozulmasına sebep olmaktadır (Grice, 1998).

Madencilikte uygulanan yeraltı dolgusunun sağladığı faydalar aşağıdaki şekilde sıralanabilir (Verburg, 2001; Benzaazoua vd., 2002; Fall vd., 2004; Kesimal vd., 2005; Huynh vd., 2006; Fall vd., 2008; Shrestha, 2008);

- Yeraltı maden işletmesinin çevresel (bölgesel) zemin koşullarını desteklemek
- Emniyetli çalışma koşullarını sağlamak
- Kaya patlama riskini azaltmak
- Topuklardaki cevherin kazanılması
- Çevresel koruma
- Atık bertaraf ve iyileştirme maliyetlerini azaltmak
- Tasman oluşumuna engel olmak
- Havalandırmayı iyileştirmek

Dolgular uygulandıkları maden işletmelerinde genel faydalarının dışında maden tipine ve ocaktaki işletme yöntemine göre değişik faydalar da sağlamaktadırlar. Yeraltı kömür işletmelerinde yapılan dolgunun bazı faydalarını ise aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz (İstanbuluoğlu, 1995; Didari, 1992; Shimada vd., 2003; Çavuşoğlu, 2008);

- Özellikle oda-topuk ve uzunayak madencilik sistemlerinde kömür kayıplarının azaltılması,
- Göçük içine oluşabilecek hava kaçaklarını önleyerek taban yolunda yangın ve zehirli gaz oluşma riskinin azaltılması,
- Yakın madencilik faaliyetleri arasında kısa devre havalandırmanın azaltılması.

Madencilikte dolgu uygulamaları çok uzun zamanlara dayanmaktadır. Eski yunanda kaya sütunlarının gümüş madenlerinde tahkimat olarak kullanıldığı bilinmektedir (Udd, 1989). Araştırma ve geliştirmeler ışığında dolgunun önemi 20 yy'da ortaya koyulmuş ve dolgunun yeraltı madenciliğinin ayrılmaz bir parçası olduğu ortaya çıkmıştır. 20 yy. başlarında dolgular elle veya pnömatik olarak yerleştirilen kum malzemesinden oluşmaktaydı. Ancak bu dolgular yeterli tahkimatı sağlamıyordu. Daha sonrasında tahkimat ve dolgu kapsamında ahşap kullanılmaya başlanmıştır. Ancak ahşap kullanılması da dolgu işlevini tam olarak yerine getirmede yetersiz kalmıştı (Grice, 1998; Petrolito vd., 2005). 1940'larda hidrolik kum dolgu tekniği ile tanışılmıştır. Hidrolik dolgu bir boru hattı

yardımıyla atık taşıma tekniğine dayanır. Bu dolgu tekniği ile madencilğe ucuz ve etkili bir dolgu metodu getirilmiştir. Aynı zamanda madencilerin dolgu malzemesini fiziksel olarak taşıma, yerleştirme ve yayma işlemleri de bu teknik ile ortadan kaldırılmıştır. Ancak yine de daha yüksek dayanımlı bir dolguya her zaman ihtiyaç duyulmuştur (Petrolito vd., 2005).

Çimentolu dolgu ile ilk kez 1957 yılında Falconbridge Nikel maden işletmesinde başarılı bir şekilde uygulanması ile tanışılmıştır. Dolguda bağlayıcı olarak o zamanlarda en ucuz ve pratik bağlayıcı madde olan portland çimentosu kullanılmıştır. Çimentolu dolgunun uygulanışı 1960 ve 1970'li yıllarda devam etmiştir (Hassani ve Archibald, 1998). Ancak o zamanlarda çimentonun taşıma ve üretim maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı çimentolu dolgu işletme maliyetinin yaklaşık %50-80'ini oluşturuyordu. Çimentosuz dolgu ise işletme maliyetinin %5-10'unu kapsıyordu (Petrolito vd., 2005).

İşletmeler üzerindeki bu ekonomik baskılar çimentonun yerine alternatif bağlayıcı kullanımı ile ilgili birçok araştırmaya da zemin hazırlamıştır. Bu araştırmalarda çimentonun tamamının veya bir kısmının yerine alternatif bağlayıcıların kullanılması ön plana çıkmıştır. Örneğin; Thomas (1971), McGuire (1978), Yu ve Counter (1983) ve Atkinson vd. (1989) gibi araştırmacılar cüruf, Askew vd. (1978), Manca vd. (1983) ve Udd ve Annor (1993) gibi araştırmacılar uçucu kül, Archibald vd. (1995), De Souza vd. (1997) ve Archibald vd. (1999) gibi araştırmacılar öğütülmüş atık cam malzeme ve Contini vd. (1983), Udd ve Annor (1993) ve Amaratunga ve Hmidi (1997) gibi araştırmacılar da kalsiyum sülfat gibi bağlayıcı özelliği bulunan veya bağlayıcı özelliği arttırıcı etki eden malzemeleri alternatif olarak denemişlerdir. Bu araştırmalar ile hem dolgu maliyetinin azaltılması hem de çimentolu dolgunun fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilebilirliği incelenmiştir.

1980'lerden sonra araştırmalar daha çok yeni bir hidrolik dolgu tipi olan macun dolgu üzerine yoğunlaşmıştır. Hidrolik dolgunun basit bir uyarlaması olan macun dolgu çevrenin ve kaynakların korunması baskısı nedeniyle ortaya çıkmıştır. Macun dolgu yöntemiyle dolgu maliyeti çimento miktarının azaltılmasıyla düşürülmüş, dolgu dayanımında kazanımlar artmış ve atık malzemelerin bertaraf edilmesi sağlanarak depolama maliyetleri azaltılmıştır (Petrolito vd., 2005).

Dünyada yeraltı maden işletmelerinde en yaygın dolgu tekniği olarak hidrolik yöntem kullanılmaktadır (Razavi, 2007). Hidrolik yöntem ile uygulanan dolgu çeşitleri, geçmişten günümüze birçok isimle adlandırılmalarına karşın, temelde kaya dolgusu (rock

fill), hidrolik dolgu (sand fill) ve son zamanlarda artan biçimde macun dolgu (paste fill) kullanılmaktadır. Bu dolgu tipleri arasındaki fark kullanılan malzeme ve boyutundan kaynaklanmaktadır (Çavuşoğlu, 2008). Dolgular kendi içlerinde çimentolu veya çimentosuz yapılar şeklinde de ayrılabilir (Sivakugan vd., 2006a). Uygulamada kullanılacak dolgu tipinin belirlenmesi için öne çıkan başlıklar şu şekilde sıralanabilir;

- Madencilik yöntemi, üretim kapasitesi ve işletme programı,
- Dolgunun amacı ve dayanım gereksinimi,
- Dolgu malzemesinin uygunluğu, hazırlanması, yeraltı boşluklarına yerleştirme sistemi ve tesisleri,
- Çevresel gereksinimler,
- Herhangi bir dolgu sistemi üzerinde kazanılmış deneyim ve uzmanlık,
- Dolgu yerleşim bölgesinin yüzeyden olan mesafesi,
- Cevher jeolojisi, boyutları, yönelimi ve derecesi,
- Çevre kayaçların ve cevherin mevcut fiziksel ve mekanik özellikleri,
- Tüm ekonomik analiz,

### **1.3.1. Dolgu Yöntemleri**

Madencilikteki dolgu yöntemlerinin el ile yapılan, mekanik, hidrolik pompalı, monolitik, çimentolu ve çimentosuz dolgu vb. gibi pek çok isimle adlandırılmasına karşın temelde kaya dolgusu, hidrolik dolgu ve son zamanlarda artan biçimde macun dolgu kullanılmaktadır. Dolgu yöntemi hangi tip olursa olsun genel olarak üretim sonrası açılan boşlukları doldurmak için yapılır ve madencilik faaliyeti esnasında veya sonrasında tahkimat görevi görür.

#### **1.3.1.1. Kaya Dolgusu**

Yeraltı maden işletmelerinde üretim veya hazırlık çalışmaları sonrasında veya yerüstü taş ocağı işletmesiyle üretilen kayaçların yeraltında üretim sonrasında ortaya çıkan boşluklara kamyonlar veya konveyörler aracılığıyla doldurulması işlemidir. Kaya dolgusunda kullanılan atık kayaçların boyutları hidrolik metot ile boru hattı kullanarak transferini zorlaştırmaktadır. Bazı kaynaklarda malzemelerin hidrolik metot ile transferi

için maksimum malzeme boyutunun 60 mm olması gerektiği belirtilmiştir. Ancak atık kayalar genellikle 300 mm'ye kadar konveyör ve kamyonlarla transfer (Şekil 1.1) edilerek dolgu malzemesi olarak kullanılması mümkün olmaktadır (Bloss, 1992; Hassani ve Archibald, 1998; Dorricott ve Grice, 2002; Kermani, 2008).

Kaya dolgusu çimentolu ve çimentosuz şekilde yapılmaktadır. Çimentolu kaya dolgusunda atık kayalara yeraltı boşluklarına yerleştirilmeden önce çimentolu karışım ilavesi yapılır. Daha sonra dik açılmış bir kuyu içerisinde boru hattı ile dolgu malzemesi yeraltı boşluklarına yerleştirilir (Peterson, 1996; Shrestha, 2008).



Şekil 1.1. Çimentolu kaya dolgusu boşluklara yerleştirilirken (Dorricott ve Grice, 2002).

Kaya dolgusunun diğer dolgu yöntemlerine göre üstünlükleri ve sakıncaları Tablo 1.1'de verilmiştir. Genel olarak kaya dolgusunun diğer dolgulara göre en büyük üstünlüğü kolay bir şekilde hazırlanmasıdır. Ayrıca kaya dolgusu için farklı bölgelerden kayaç almaya gerek kalmadan madencilik faaliyetinin olduğu yerlerde atık olarak ortaya çıkan her türlü kayaç kullanılmaktadır.

Tablo 1.1. Kaya dolgusunun üstünlükleri ve sakıncaları (Kermani, 2008).

Üstünlükleri	Sakıncaları
<ul style="list-style-type: none"> <li>☺ Kolay hazırlanır,</li> <li>☺ Atık kayaçlar kullanıldığından maliyeti düşüktür,</li> <li>☺ Atık kayaçlar yeraltı boşluklarına doldurularak yüzeyde bertaraf edilmesine gerek kalmaz,</li> <li>☺ Çimentolu uygulandığında oldukça yüksek dayanım sağlar,</li> <li>☺ Maden işletmesinde susuzlaştırmayı önler,</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☹ Kayaçların kırılması gerektiği için kırma ve taşıma maliyetleri ortaya çıkar,</li> <li>☹ Kaya dolgusunun iyi yerleştirilmesinin sağlanması için dolgu boşluklarına akıcı kıvamlı ince malzeme ile bir bağlayıcı gereksinimi duyar,</li> <li>☹ Yerleştirilme esnasında kaba malzemeler ayrışmaya uğrar,</li> <li>☹ Cevheri alınmış bölgenin sıkı bir biçimde doldurulması için uygun değildir,</li> <li>☹ Atıkların yalnızca bir kısmı kullanıldığından diğer kısmı için yerüstünde bertaraf gereksinimi duyulur.</li> </ul>

### 1.3.1.2. Hidrolik Dolgu

Hidrolik dolgular genel olarak hiçbir kil fraksiyonu içermeyen siltli kum veya kumlu silt olarak tarif edilir. Hidrolik dolgu, kum boyutundaki bu malzemelerin bir bağlayıcı ve su ile karışımıyla oluşur. Hidrolik dolgular ağırlıkça %65-75 katı yoğunluğunda bulamaç şeklindeki karışımlardır. Bu karışımlar bir boru vasıtasıyla yeraltında oluşan boşluklara transfer edilir ve kendi ağırlıkları ile yerleşirler. Hidrolik dolguların önüne dolgunun sabit şekilde kalması ve maden içerisinde yayılmasını önlemek için bir barikat inşa edilir (Şekil 1.2). Barikatın üzerine dolgu içerisindeki fazla suyun drenajının sağlanması amacıyla yatay olarak delikler açılır (Şekil 1.3). Barikat içerisinden dışarıya drene edilen su sayesinde barikata gelen yükler azalmakta ve daha sağlam bir dolgu elde edilmektedir. Ayrıca barikatların genel olarak sağlamlığını artırmak için bir miktar kavisli yapılmaları gerekmektedir (Sivakugan vd., 2006a; Sivakugan vd., 2006b).



Şekil 1.2. Hidrolik dolgu barikatu (Sivakugan vd., 2006a).

Hidrolik dolgunun diğerk dolgu yöntemlerine göre üstünlükleri ve sakıncaları Tablo 1.2’de verilmiştir. Hidrolik dolgu madencilikte en yaygın kullanılan dolgu biçimidir ve en büyük avantajı karmaşık bir hat tasarımına gerek duyulmamasıdır.



Şekil 1.3. Hidrolik dolguda su drenajı (Sivakugan vd., 2006b).

Tablo 1.2. Hidrolik dolgunun üstünlükleri ve sakıncaları (Sivakugan vd., 2006a; Sivakugan vd., 2006b; Shrestha, 2008).

Üstünlükleri	Sakıncaları
<ul style="list-style-type: none"> <li>☺ Dolgu altyapısının kurulması ve devreye alınması için az teknik yardım gerekir ve nispeten basittir,</li> <li>☺ Dolgu tesisindeki bütün bileşenlerin daha iyi kontrolü ile dolgu kalitesi ve karışım yoğunluğunun güvence altına alınması,</li> <li>☺ Basit bir şlam uzaklaştırma yöntemi ile persolasyon (süzülme) oranında artış sağlama (genellikle hidrokarbon kullanılarak yapılır),</li> <li>☺ Karmaşık bir boru hattı dizaynına gerek duyulmaz,</li> <li>☺ Tesis atıkları kullanılarak yüzeydeki atık depolama işlemi azaltılır.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☹ Dolgu içerisinde fazla suyun varlığı, yerüstüne pompalama işini beraberinde getirmektedir,</li> <li>☹ Fazla suyun varlığından dolayı tepkimeye girmeyen çimentonun ayrışması sebebiyle cevheri alınmış bölgeye yerleştirilen dolguda dayanım kaybı meydana gelmektedir,</li> <li>☹ Çalışma bölgesinde fazla suyun drenajı esnasında şlam oluşmakta ve bu ise ilave şlam temizleme maliyetine neden olmaktadır,</li> <li>☹ Dolgu işlemi esnasında, yeraltı madencilik faaliyetlerinde kısa veya uzun süreli aksamalar meydana gelmektedir.</li> </ul>

### 1.3.1.3. Macun Dolgu

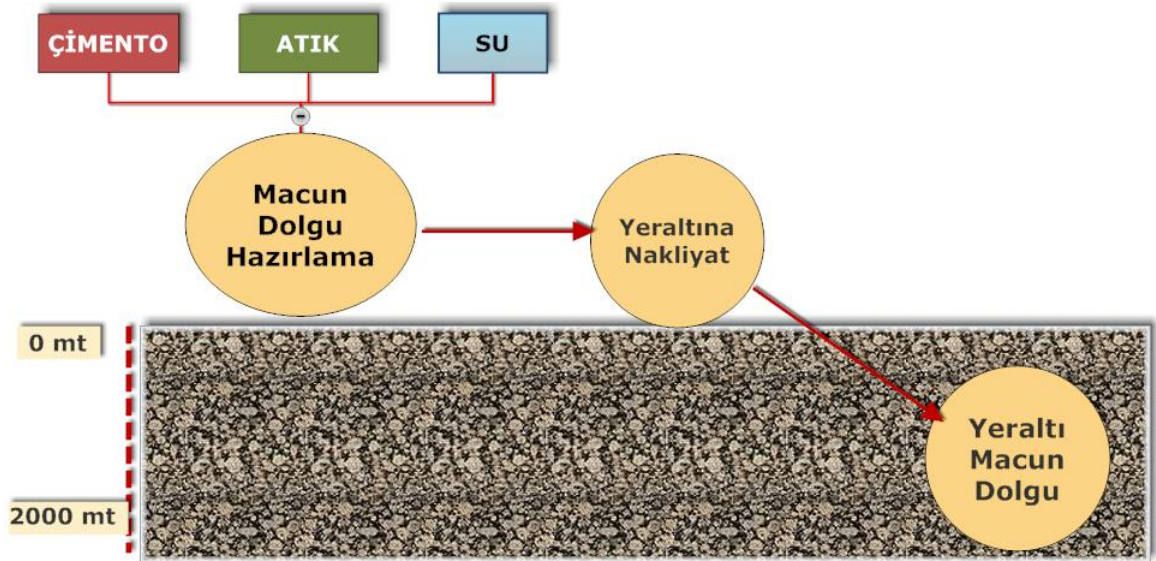
Macun kıvamı, su ve ince parçacıkların yüksek yoğunluklu karışımı olarak ifade edilir. Çimentolu macun dolgu ise ağırlıkça %70-85 arasında katı oranına sahip hidrolik bağlayıcı, su ve susuzlandırılmış maden tesis atıklarından (çok ince taneli) oluşan bir mühendislik karışımı olarak ifade edilir (Brackebusch, 1994; Fall vd., 2005). Macun dolguda karışım malzemesinin görünümü Şekil 1.4'te verilmiştir.



Şekil 1.4. Macun dolguda malzeme görünümü

Çimentolu macun dolgu genellikle yerüstü tesislerinde hazırlanır. Hazırlanan macun sonrasında bir boru hattı veya açılmış kuyu vasıtasıyla yeraltı boşluklarına gönderilir (Benzaazoua vd., 2002; Ouellet vd., 2007). Şekil 1.5'te macun dolgunun yerüstünden hazırlık ve yeraltı boşluklarına kadar olan nakliye süreci gösterilmiştir.

Macun dolgu tekniği oldukça yeni bir teknolojidir. İlk olarak 1980'li yıllarda Almanya'da Grund madeninde başarı ile uygulamaya konulmuştur (Brackebusch, 1994). Sonrasında özellikle Kanada başta olmak üzere tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaya başlanmış ve yeraltı dolgu tekniklerinde en popüler metotlardan biri haline gelmiştir. Ülkemizde de Çayeli Bakır İşletmelerinde macun dolgu yönteminin başarılı bir şekilde uygulandığını görmekteyiz. Macun dolgu kullanımı ile atıkların yerüstünde depolanmasının önüne geçilmektedir. Aynı zamanda diğer dolgu teknikleri ile karşılaştırıldığında oldukça ekonomik olduğu belirtilmektedir (Yılmaz, 2003; Fall vd., 2004; Fall vd., 2005; Hassani vd., 2007; Fall vd., 2008).



Şekil 1.5. Macun dolgunun hazırlanması ve yeraltına transfer edilmesi (Benzaazoua vd., 2002).

Macun dolgunun diğer dolgu yöntemlerine göre üstünlükleri ve sakıncaları Tablo 1.3'de verilmiştir. Macun dolgunun diğer yöntemlere göre en büyük avantajı düşük miktarda bağlayıcı kullanarak yapılmasıdır. Bunun yanında işletmede oluşabilecek atıkların bertarafında da önemli rol üstlenerek avantajlı hale gelmektedir.

Tablo 1.3. Macun dolgunun üstünlükleri ve sakıncaları (Yılmaz, 2003; Erçikdi, 2009).

Üstünlükleri	Sakıncaları
☺ Aynı dayanımı sağlamak için daha az çimentolu bağlayıcı gerektirir,	☹ Taşıma borularında oluşan yüksek basınç gelişimi dolayısıyla uygun bir boru dizaynı gerektirir,
☺ Dolguda atıkların hemen hemen tamamı kullanılabilir ve böylece dikkate değer bir biçimde yüzeyde atık depolama işlemleri ve onun çevresel maliyeti azaltılır,	☹ İnce malzemeleri kaybetmeksizin gerekli macun-akış kıvamını sağlayacak konsantrasyonu elde edebilmek için çok iyi bir susuzlandırma işlemi gerektirir,
☺ Fazla suyun çok az veya hiç drene olmamasından dolayı herhangi bir su-drenaj işlemi gereksinimi olmaz ve bu nedenle madencilik doğa dengesini etkilenmemiş olur.	☹ Sıvılaşma problemi oluşabilir,
	☹ İleri teknoloji gerektirir.

Hidrolik dolgu ve macun dolgu genellikle açılmış boşlukların sıkı bir şekilde doldurulmasında kullanılırken, kaya dolgusu ile en iyi tahkimat dayanımı sağlanabilmektedir. Kaya dolgusu, hidrolik dolgu ve macun dolgunun değişik özellikleri bakımından karşılaştırması Tablo 1.4'de verilmiştir. Kullanılan madencilik yönteminin ihtiyacına göre bu dolgu metotlarından birisi tercih edilmektedir.

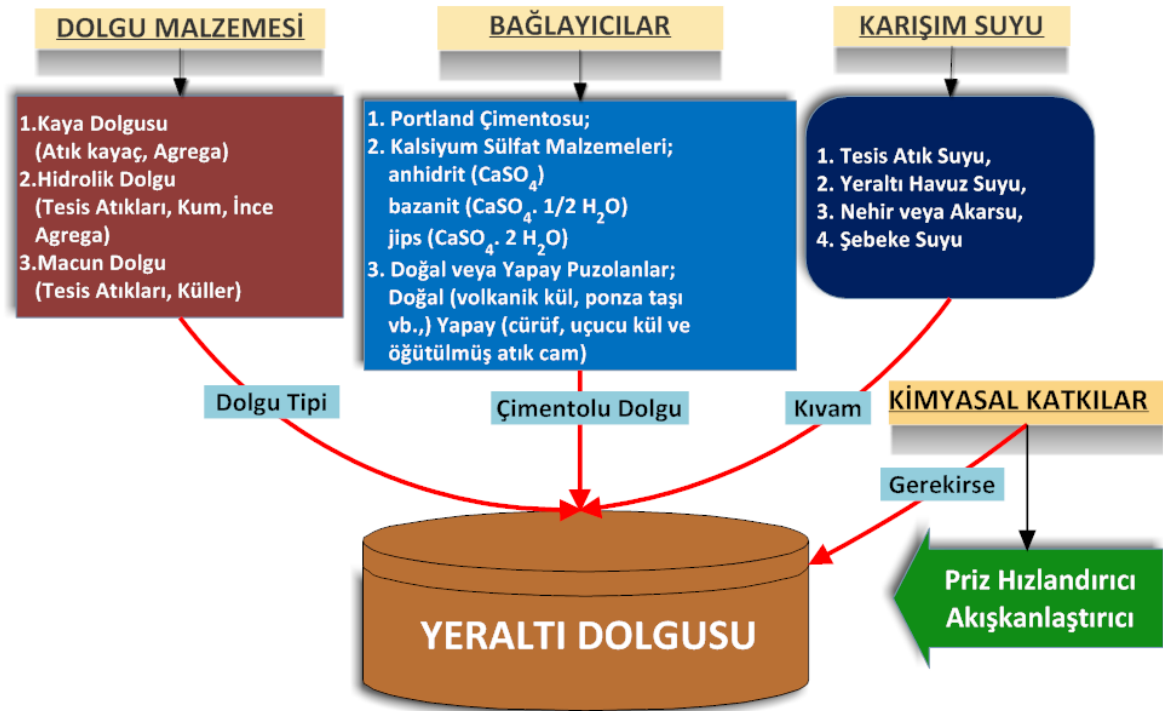
Tablo 1.4. Temel dolgu yöntemlerine ait özelliklerin karşılaştırması (Shrestha, 2008).

Özellikler	Kaya Dolgusu	Hidrolik Dolgu (Kum Dolgusu)	Macun Dolgu
Yerleştirme durumu	kuru	ağırlıkça %60-75 katı	ağırlıkça %75-85 katı
Yeraltı taşıma sistemi	taşınabilir ekipman, ayrı çimento sistemi	gravite yardımıyla boru hattı veya kuyu ile	gravite veya pompa yardımıyla boru hattı veya kuyu ile
S/Ç oranı (*)	düşük	yüksek	düşük-yüksek
Bağlayıcı dayanımı	yüksek	düşük	düşük-yüksek
Ayrışma	yerleştirmede ayrışma (dayanım düşmesi ve katılık)	malzeme oturma ve ayrışma (düşük dayanım gelişimi)	ayrışma yok
Katılık	doğru yerleştirildiğinde yüksek katılık	düşük	düşük-yüksek
Sıkı doldurma	çok zor	daha az gerekir	kolay
Bağlayıcı miktarı	makul	fazla	genellikle düşük
Dolgu barikatı	gerekmez	pahalı	ucuz
Su drenajı (su çıkışı)	yoktur	yoğun	önemsiz
Yatırım maliyeti	makul	düşük	yüksek
İşletme maliyeti	yüksek	transfer maliyeti düşük (çimentosuz dolgularda en düşük)	en düşük (çimentolu dolgular içerisinde)

(\*)S/Ç = su/çimento oranı

#### 1.4. Yeraltı Dolgularında Kullanılan Malzemeler

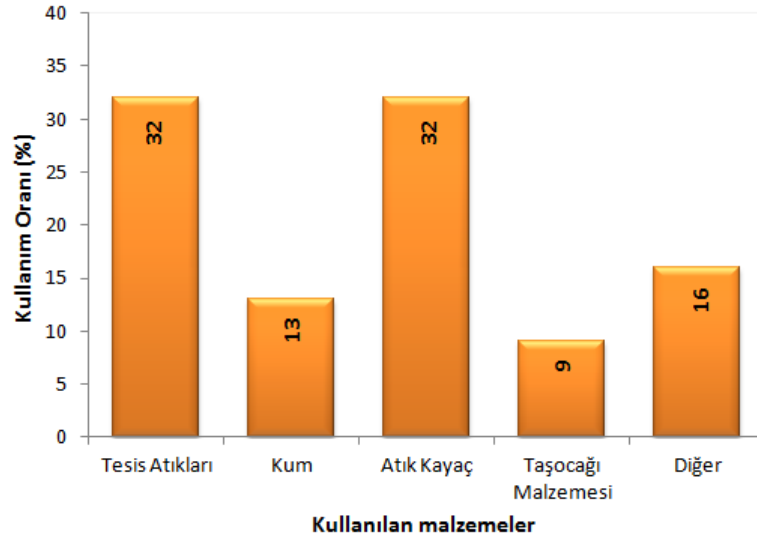
Madencilikte yeraltı dolgusu; atık malzeme, bağlayıcı madde, su ve kimyasal katkı (gerekli görüldüğünde) karışımından oluşan bir malzemedir (Şekil 1.6). Atık malzeme olarak yaygın bir şekilde tesis atıkları, santral atıkları (uçucu kül, taban külü), kum, agrega ve atık kayalar kullanılmaktadır. Dolgu içerisinde dayanımı belirleyici malzeme olan bağlayıcı madde olarak ise genellikle portland çimento, bağlayıcı özelliği bulunan kalsiyum sülfat malzemeleri ve doğal veya yapay puzolanlar kullanılmaktadır. Gerekli görüldüğü takdirde bazı dolgularda kıvam artırmak için akışkanlaştırıcı ve erken dayanım için priz hızlandırıcı katkıları da kullanılmaktadır. Dolgunun transferinin ve bağlayıcı ile reaksiyona girerek mekanik özelliklerinin oluşmasını sağlamak için şebeke suyu, tesis atık suyu, nehir veya akarsu ve yeraltı havuz suları kullanılmaktadır (Archibald vd., 1999; Benzaazoua vd., 2002; De Souza vd., 2003; Abbasy, 2009; Çavuşoğlu vd., 2011).



Şekil 1.6. Dolgu karışımlarında kullanılan malzemeler ve etkilerinin şematik gösterimi (Benzaazoua, vd., 2002'den değiştirilmiştir).

Kanada'da yeraltı madenciliğinde dolguda en çok kullanılan malzemeler atık kayalar ve tesis atıkları olarak göze çarpmaktadır (Şekil 1.7). Atık kayalar madene

ulaşmak için yapılan her türlü faaliyet ve üretim sonrasında ortaya çıkan iri boyutlu kaya malzemeleridir. Genellikle işletmelerde yerüstü ve/veya yeraltı dolgu malzemesi olarak değerlendirilirler. Bu malzemenin eksikliğinde yeniden malzeme elde etmek için taşocağı malzemesi kullanılır. Tesis atıkları ise üretilen madenden bir takım cevher hazırlama işlemleri sonrasında elde edilen ince taneli atık malzemelerdir. Bu tip atıklar genellikle metal madenlerinde elde edilmektedir. Bunun dışında ince taneli maden atıkları, düşük kalorili kömür üreten maden işletmelerinin elektrik üretmek amacıyla santrale beslediği kömürün yanması sonrasında da elde edilmektedirler. Uçucu kül adı verilen bu atıkların santrale yakın yerüstü alanlarda bertaraf edilmesi, çevresel açıdan oldukça sakıncalıdır. Uçucu küllerin puzolanik özelliklerinden dolayı genellikle inşaat endüstrisinde kullanımı yaygındır. Ancak bu özellikleri yetersiz olan ve bu endüstride kullanılmayan atıklar çeşitli biçimlerde bertaraf edilmektedir. En uygun bertaraf biçiminin başında yeraltı boşluklarına doldurulmaları gelmektedir.

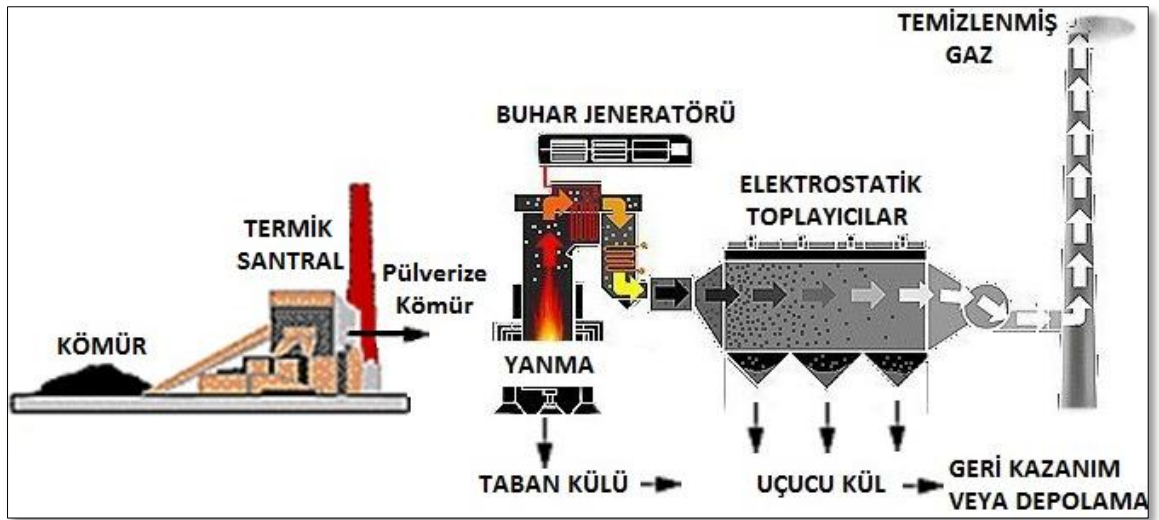


Şekil 1.7. Kanada’da dolgu malzemelerinin kullanım oranları (De Souza, vd., 2003).

### 1.5. Santral Atığı Uçucu Küller

Genellikle termik santrallere elektrik üretmek amaçlı beslenen pülverize hale getirilmiş düşük kalorili linyit kömürünün yanması sonucunda yanma kazanlarından dışarı çıkan gazlar tarafından taşınan ve atmosfere çıkmadan önce elektrostatik toplayıcılar

tarafından toplanan çok ince tanelere uçucu kül denir (Şekil 1.8). Termik santrallerde oluşumlarının dışında evsel katı atık yakma, kömür gazlaştırma ve çelik izabe gibi işlemler sonucu da oluşmaktadır. Bu tip maddelere puzolanik özelliklerinden dolayı yapay puzolan madde de denmektedir (Haktanır ve Karaca, 1996; Anon, 2003; Aruntaş, 2006; Üstüner, 2009). Puzolan, kendi başına bağlayıcılık özelliği çok az olan veya hiç olmayan ancak öğütülmüş halde, normal sıcaklıkta ve rutubetli ortamlarda kalsiyum hidroksitle (sönmüş kireç) reaksiyona girip ilave bağlayıcı bileşikler meydana getiren ince toz halindeki silisli veya silisli ve alüminli malzemelerdir. Bu özellikleri taşıyan maddelere ise puzolan malzemeler denir (Iyer ve Scott, 2001; Vasilev vd., 2005; Gündeşli, 2008). Uçucu küllerin puzolanik özelliğe sahip olması onların çimento ve beton üretiminde katkı maddesi olarak kullanılmasını sağlamaktadır (Ahmaruzzaman, 2010). Uçucu küllerin kullanım alanlarının belirlenmesi için özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir.

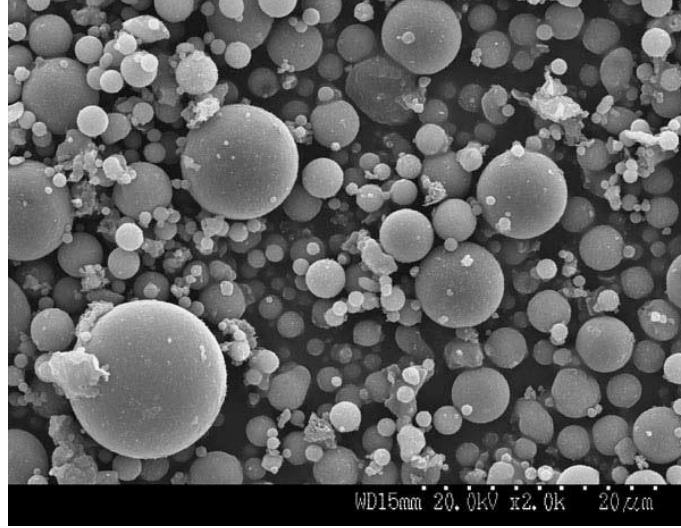


Şekil 1.8. Küllerin termik santrallerde oluşumu (URL 1; URL 2)

### 1.5.1. Uçucu Küllerin Fiziksel, Kimyasal ve Mineralojik Özellikleri

Boyutları 1-200  $\mu\text{m}$  arasında değişen uçucu küllerin taneleri çoğunlukla küresel yapıdadır (Şekil 1.9). Uçucu küllerin tane boyu dağılımları genellikle santraldeki kül toplama yöntemi, donanımı ve kömür tipine bağlıdır. Bitümlü kömürden elde edilen uçucu küller genellikle silt boyutunda yani 75  $\mu\text{m}$ 'dan küçük boyuttadırlar. Yarı bitümlü

kömürden elde edilen uçucu küller de silt boyutundadırlar fakat 75  $\mu\text{m}$ 'dan daha büyük boyutta da olabilmektedir (Ahmaruzzaman, 2010).



Şekil 1.9. Uçucu külün SEM ile çekilmiş görüntüsü (URL 3).

Uçucu küller genellikle açık bej, kahverengi, gri ve siyah gibi renklerde görülmektedirler (Şekil 1.10). Bünyesindeki yanmamış karbon miktarı arttıkça renkleri koyulaşmaktadır (Yazıcı, 2004). Özgül ağırlıkları 2,1-3,0  $\text{gr}/\text{cm}^3$  arasında değişmektedir. Özgül yüzey alanları ise 170-1000  $\text{m}^2/\text{kg}$  arasında değişmektedir (Mattigod vd., 1990).



Şekil 1.10. Değişik renge sahip uçucu küller (URL 3; URL 4; URL 5; URL 6).

Yalnızca kömürün yanması değil evsel katı atık yakma, kömür gazlaştırma ve çelik izabe gibi farklı kaynaklardan da elde edilebilen uçucu küllerin kimyasal bileşimleri birbirlerinden farklıdır (Tablo 1.5). Kömür yanması sonucunda oluşan uçucu küller en yaygın olanıdır ve yeniden kullanılmaları çevresel açıdan önemlidir. Uçucu küllerin yeniden kullanımları için mineralojik özellikleri kadar fiziksel ve kimyasal özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Çünkü küllerin bu özellikleri yeniden kullanım alanlarını belirlemede önemli rol oynamaktadır (Wang ve Wu, 2006; González vd., 2009).

Tablo 1.5. Farklı kaynaklı uçucu küllerin kimyasal bileşimi (Mudavaki vd., 1999; Moreno vd., 2005; Font vd., 2007; Pan vd., 2008).

Uçucu Kül Kaynağı	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	KK
Evsel katı atık yakma	13,6	0,9	3,8	45,4	3,2	-
Kömür yanma	50	27	8	5	2	4
Kömür gazlaştırma	57	19	3,8	6,4	0,8	4
Çelik izabe	8,3	6,4	49,9	24,3	8,2	2,3

KK: Kızdırma kaybı.

Kömürden elde edilen uçucu küllerin kimyasal kompozisyonları santralde kullanılan kömürün içerdiği mineral safsızlıkların tipi ve miktarına bağlıdır. Genellikle uçucu küllerin %85'ini SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO ve MgO oluşturur (Yazıcı, 2004; Erol, vd., 2008).

Uçucu küller temelde antrasit, bitümlü, yarı bitümlü ve linyit gibi 4 farklı kömürden elde edilirler. Antrasit kömürü santrallerde yanma ürünü olarak pek kullanılmadığı için ondan elde edilen küllerin miktarı da çok azdır. Bitümlü kömürden elde edilen uçucu küllerin temel bileşenleri silisyum dioksit, alüminyum oksit, demir oksit ve kalsiyum oksitten oluşur. Linyit ve yarı bitümlü kömürden elde edilen uçucu külden ise kalsiyum ve magnezyum oksit bileşen değerleri artarken silisyum dioksit ve demir oksit bileşen değerleri azalmaktadır (Tablo 1.6).

Uçucu küllerin mineral kompozisyonları kömür yatağı ve formasyonu ile bağlantılı olan jeolojik faktörlere ve kömürün yanma koşullarına bağlıdır. Uçucu küllerin mineral bileşenleri x-ışını kırınımı (XRD) analiz yöntemi ile belirlenmektedir (Ahmaruzzaman, 2010).

Tablo 1.6 Farklı kömür tiplerinden üretilen uçucu küllerin kimyasal bileşimleri (Ahmaruzzaman, 2010).

İçerik (%)	Bitümlü	Yarı bitümlü	Linyit
SiO <sub>2</sub>	20-60	40-60	15-45
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5-35	20-30	10-25
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10-40	4-10	4-15
CaO	1-12	5-30	15-40
MgO	0-5	1-6	3-10
SO <sub>3</sub>	0-4	0-2	0-10
Na <sub>2</sub> O	0-4	0-2	0-6
K <sub>2</sub> O	0-3	0-4	0-4
KK	0-15	0-3	0-5

Uçucu küllerin mineral ve faz yapılarını yüksek (>%10), orta (%1-10), düşük (%0,1-1) ve eser miktarda (<%0,1) oluşturan mineraller şeklinde sıralayabiliriz. Yüksekten aza doğru mineraller sırasıyla şu şekildedir; camsı faz, mullit, kuvars, hematit-manyetit, anhidrit-jips, feldspat, kireç-portlandit, kil ve mika mineralleri, kristobalit-tridimit, kalsit-ankerit, korindon, jarosit ve bazı kalsiyum ve kalsiyum-magnezyum silikatları. Bunların dışında Ba, Ce, Cl, Cr, Cu, F, La, Mn, P, Nb, Pb, Sb, Sr, Th, Ti, U, Y, W, Zn, Zr, Ag, As, Ga, Ge, Hf, Mo, Sn, ve V gibi bazı elementler uçucu küller içerisinde eser miktarda mineral ve faz olarak bulunabilirler (Vassilev vd., 2005; Vassilev ve Vassileva, 2007).

### 1.5.2. Uçucu Küllerin Sınıflandırılması

Uçucu küller endüstriyel uygulamalar için (genelde çimento ve beton) dünyada yaygın olarak C ve F sınıfı olmak üzere iki kimyasal sınıfa ayrılır (Vassilev ve Vassileva, 2007). Amerikan standartlarına göre (ASTM C618, 2005) yapılan bu sınıflamada küllerin birinci tip kül sınıfına (F) girmesi için kimyasal kompozisyonlarında SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toplamının %70'den daha fazla olması istenmektedir. İkinci tip kül sınıfına (C) girmesi için SiO<sub>2</sub>+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> toplamı %50-70 arasında olmalıdır (Tablo 1.7). Bu sınıflama standardı dünyada en yaygın kullanılanıdır. Düşük kalsiyum içerikli F sınıfı küller genellikle yüksek sınıflı bitümlü kömür ve antrasitlerin yanmasıyla oluşurlar. F sınıfı küller doğal puzolanlar olarak bilinirler. Yani Ca(OH)<sub>2</sub> ve su ile reaksiyona girdiklerinde sertleşme gösterirler. Diğer taraftan yüksek kalsiyumlu C sınıflı küller düşük sınıflı linyit ve yarı-bitümlü kömürlerin yanmasıyla oluşurlar. C sınıfı küller hem çimento gibi

bağlayıcı özellik gösterirler hem de puzolanik özelliğe sahiptirler (Oner, vd., 2005). Bununla birlikte pek çok düşük sınıflı kömürden oluşan küller F sınıfı küllerin gereksinimlerini de karşılayabilirler (Manz, 1999). Avrupa standartlarına (EN 450-1) göre ise küller A, B ve C sınıfı olarak 3 çeşittir. A sınıfı küller  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$  toplamı %70'den daha fazla olan,  $\text{SO}_3$  yüzdesi %3'ten küçük ve reaktif silis içeriği %25'ten büyük olan küllerdir. B ve C sınıfı küller ise kızdırma kaybı oranı ile belirlenirler (Tablo 1.7).

Tablo 1.7. Amerikan ve Avrupa standardına göre uçucu küllerin sınıflandırılması

ASTM C618	Sınıf	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	$\text{SO}_3$ (%)	Nem (%)	KK (%)
	C	>50	<5	<3	<6
F	>70				<12
EN 450-1	Sınıf	$\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (%)	$\text{SO}_3$ (%)	Reaktif silis (%)	KK (%)
	A	>70	<3	>25	<5
	B				2-7
	C				4-9

Uçucu küllerin sınıflaması ile ilgili Amerika'da "Fly Ash Utilization" adlı alt kuruluşun yapmış olduğu sınıflamaya göre ise küller 4 gruba ayrılır (Tablo 1.8). Bu sınıflamada birinci gruba dahil olan küllerin  $\text{SiO}_2$  oranı yüksek, ikinci gruptaki küllerin ise  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oranı daha yüksektir. Üçüncü ve dördüncü gruptaki küllerin ise CaO oranı diğerlerine göre oldukça yüksektir (Vassilev ve Vassileva, 2007).

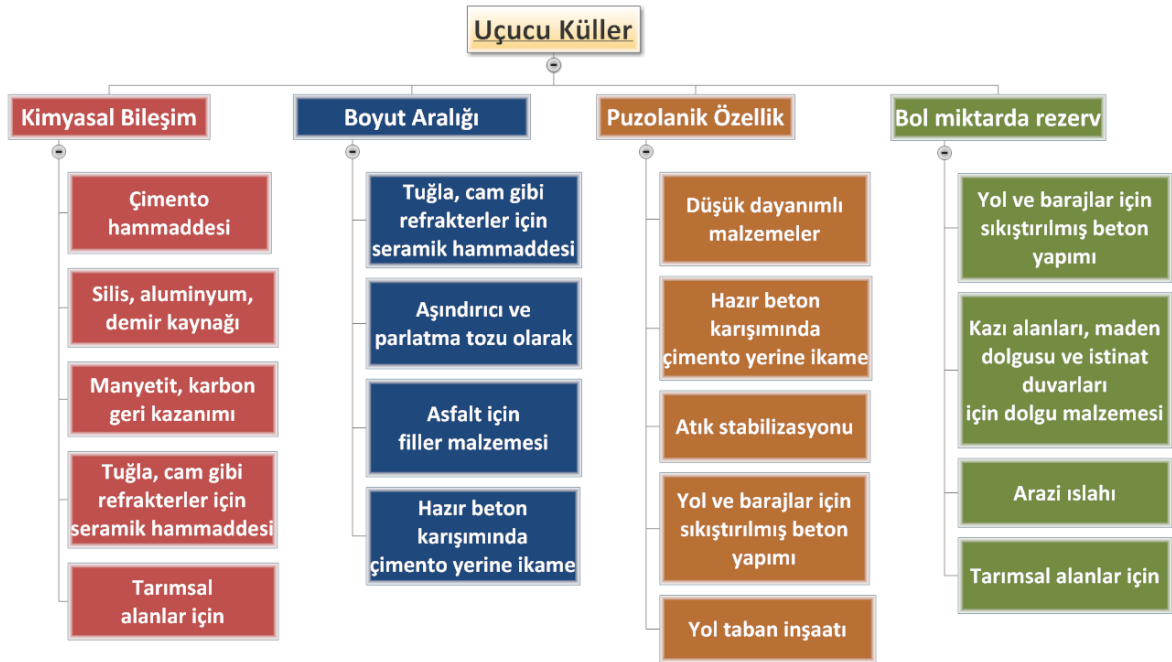
Tablo 1.8. Amerikan "Uçucu Kül Kullanımı" (Fly Ash Utilization) kurumuna göre uçucu küllerin sınıflaması

Grup	Tip	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ (%)	CaO (%)	$\text{SO}_3$ (%)
Grup I	silika-alüminat	$\geq 2$	< 15	
Grup II	alümino-silikat	< 2	< 15	< 3
Grup III	kalsiyum oksit - sülfat		> 15	> 3
Grup IV	esas		> 15	< 3

### 1.5.3. Uçucu Küllerin Kullanım Alanları

Kömürün termik santrallerde elektrik üretmek amaçlı yanmaya başladığı 1920’li yıllardan beri uçucu küllerin üretimi her yıl artarak devam etmektedir. Blissett ve Rowson (2012), Ahmaruzzaman (2010) ve González vd. (2009) gibi kaynaklara göre dünyada yıllık yaklaşık 600 milyon ton uçucu kül üretimi gerçekleşmektedir. Her yıl artan bu atıkların yeniden kullanım miktarları ise %25’ler civarında kalmaktadır. Bu kullanım miktarlarının en önemli kısmını ise inşaat sektörü oluşturmaktadır.

Uçucu küller genellikle inşaat ve karayolları mühendislik uygulamalarının içerdiği; portland çimentolu betonlar, çimento üretimi, toprak veya yol stabilizasyonlarında, dolgular ve zeminler gibi alanlarda kullanılmaktadır (Anon, 2003). Uçucu küllerin çeşitli özelliklerine göre kullanım alanları ise Şekil 1.11’de verilmiştir.



Şekil 1.11. Uçucu küllerin bazı özelliklerine göre kullanım alanları

Amerika’da yıllık uçucu kül üretimi yaklaşık 60 milyon ton olduğu Anon (2003) kaynağında ifade edilmiştir. Bu üretimin yaklaşık %32’si (20 milyon ton) çeşitli endüstriyel alanlarda tekrar kullanılmaktadır (Tablo 1.9). Bu kullanımlarda en çok paya %60’lık oranıyla inşaat sektörü sahiptir.

Tablo 1.9. Amerika’da uçucu külün kullanım alanları (Anon, 2003).

<b>Uygulama alanı</b>	<b>Ton (10<sup>6</sup>)</b>	<b>Yüzde (%)</b>
Çimento ve beton	12,16	60,9
Yapısal dolgu	2,91	14,6
Atık stabilizasyonu	1,31	6,3
Yol tabanı/alt taban	0,93	4,7
Madencilik	0,74	3,7
Akışkan dolgu	0,73	3,7
Toprak düzenlenmesi	0,67	3,4
Mineral katkı	0,10	0,5
Tarım	0,02	0,1
Diğer	0,41	2,1
<b>Toplam</b>	<b>19,98</b>	<b>100</b>

Uçucu küllerin çimento sektöründe kullanılmasında üç farklı yöntem mevcuttur;

- Beton içerisinde çimento yerine ikame olarak,
- Katkılı çimento üretiminde puzolan malzeme olarak,
- Alçı taşı yerine ikame olacak biçimde, çimentoya priz geciktirici katkı maddesi olarak

Uçucu küller inşaat ve yapı sektörü dışında santrallerde baca gazlarının temizlenmesi için bünyesindeki karbon içeriğinden dolayı adsorban olarak da kullanılmaktadır. Genellikle bacalarda kömür yanmasından sonra atmosfere salınan NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> ve Civa gibi hava kirletici toksik maddelerin bastırılması ve uzaklaştırılmasında kullanılırlar (Al-Shawabkeh vd., 1995; Rubel vd., 2005). Bunların yanında atık sulardan toksik metal, organik ve inorganik bileşikler ve boya maddelerinin uzaklaştırılması için de kullanılmaktadırlar (Ahmaruzzaman, 2010). Bu kullanımlarının dışında özellikle inşaat ve madencilik alanında dolgu malzemesi olarak kullanımında da son yıllarda artış görülmektedir (Anon, 2003; Çavuşoğlu, 2008).

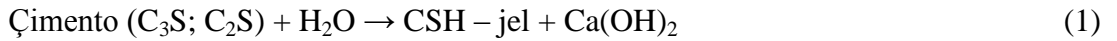
### **1.5.3.1. Uçucu Küllerin Beton İçerisinde Kullanımı**

Çimento betonun en maliyetli ve enerji yoğun bir bileşenidir. Bundan dolayı betonun mekanik özelliklerini kaybetmeden hatta biraz daha artırmak hedefiyle çimentoya alternatif katkıları kullanarak betonun maliyeti düşürülmektedir. Betonun birim maliyeti çimento yerine uçucu kül ikame edildiğinde azalır. Uçucu külün çimento yerine ikame puzolan

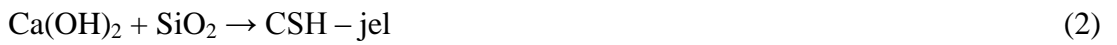
olarak kullanımı kısmen beton ekonomisi ve çevresel hususlar ile ilgilidir. Ancak bunun yanında aynı işlenebilirlikte daha az su ihtiyacı sağlaması, betonun terlemesini azaltması ve düşük hidratasyon ısı gelişimi sağlaması gibi beton için faydalı özellikleri sunması ile de alakalıdır (Oner, vd., 2005; Ahmaruzzaman, 2010).

Portland çimentosu ile karşılaştırıldığında puzolan katkılı çimentolar ile daha düşük geçirimli beton elde edilir ve daha yoğun kalsiyum silika hidrat (C-S-H) jelleri gözlemlenir. Puzolanik malzemeler ilave edildiğindeki süreçte kalsiyum hidroksit (Ca(OH)<sub>2</sub>) ikincil kalsiyum silika hidrat (C-S-H) şekline dönüşür ve bunun sonucunda mineral katkıların puzolanik reaksiyonu sebebiyle beton içerisinde oluşabilecek büyük boşlukların daha küçük boşluklara dönüşümüne sebep olunmaktadır (Manmohan ve Mehta, 1981). Hidratasyona uğramış çimento karışımı yaklaşık olarak %70 C-S-H, %20 Ca(OH)<sub>2</sub>, %7 sulfo-alüminat ve %3 oranında ikincil fazlar içermektedir (Eşitlik 1.). Hidratasyon sonucu ortaya çıkan Ca(OH)<sub>2</sub>'nin suda çözünürlüğünden dolayı şekillenen boşluklar ve düşük dayanımından dolayı betonun kalitesi negatif biçimde etkilenir. Ancak mineral katkıların portlandit ile reaksiyona girerek yeniden C-S-H jellerini oluşturmaları (Eşitlik 2) dayanım bakımında olumlu olarak nitelendirilir. Genel olarak mineral katkıların betonda kullanımı beton kalitesi üzerine olumlu bir etkiye sahiptir (Memon, vd., 2002; Papadakis, ve Tsimas, 2002);

Çimento hidratasyonu:



Puzolanik reaksiyon:



C sınıfı uçucu küller yüksek oranda kalsiyum ve reaktif silis gibi bileşikler içerdiğinden dolayı portland çimento üretiminde kullanıma daha uygundur. Yüksek dayanımlı betonlar ise F sınıfı küller ile üretilebilirler. Uçucu küllerin küresel yapılarından dolayı betonda geçirimliliği düşürmektedir. F sınıfı küller beton üretiminde yaklaşık olarak %15-25 gibi bir oranda çimento yerine ikame olarak kullanılmaktadır.

Uçucu küllerin beton içerisinde en çok etkilediği özelliklerden birisi işlenebilirliktir. Uçucu küllerin camsı ve emici olmayan yüzey yapısına sahip olması onların çimento yerine ikame kullanıldığı harçlarda daha fazla silisli yan ürün içeren karışımlar

oluşturmasına ve dolayısıyla taze haldeki harçların işlenebilirliğinde artış sağlamasına sebep olmaktadır. Diğer yandan uçucu kül taneciklerinin küresel şekilli olmaları, daha az sürtünmeye yol açtığı için daha az su ihtiyacı olmasına neden olmaktadır. Uçucu küllü betonların su ihtiyacı, uçucu külün inceliğine ve kullanıldığı miktara da bağlı olmaktadır. İncelik arttıkça su ihtiyacında artma olmaktadır (Ramachandran, 1995; Yijin vd., 2004; Özel, 2007).

Uçucu külün beton içerisinde kullanımlarında C ve F tipi olmalarının yanında inceliğinin de etkisi büyüktür. Kiattikomol vd. (2001) yaptıkları çalışmada uçucu külleri ince, orta ve kaba boyutta sınıflandırmış ve bu malzemelerden beton içerisinde %20 oranında çimento yerine ikame olarak kullanarak harçlar oluşturmuşlardır. Çalışmada uçucu külün inceliğinin artmasıyla küllerin puzolanik aktivite indekslerinin arttığını ve harçların dayanım değerlerinin de arttığını belirtmişlerdir. Ayrıca uçucu kül inceliğinin aktivite indeksi üzerine olan etkisinin kimyasal bileşimlerinden daha önemli olduğunu vurgulamışlardır.

Çimento yerine %30 oranında uçucu kül kullanılan betonların dayanımları portland çimentolu betonların dayanımlarına göre erken kür sürelerinde daha düşüktür. Ancak nihai dayanımlarda daha yüksek değerdedir. Uçucu küllü betonlarda ki dayanım artışı uçucu külün tipi, inceliği, miktarı ve kullanılan çimentonun tipine bağlı olarak değişmektedir. Örneğin C tipi küllerin erken yaşlarda dayanıma olan katkısı F tipi küllere göre daha yüksek olduğu ifade edilmektedir (Erdoğan, 2007; Yazıcı ve Arel, 2012). Ayrıca uçucu külün inceliğinin artması puzolanik özelliğini ve yoğunluğunu artırmaktadır. Bunun sonucu olarak da uçucu kül içeren betonların dayanım ve dürabilitesi olumlu biçimde etkilenmektedir (Erdoğan, 2007; Kiattikomol vd., 2001).

### **1.5.3.2. Uçucu Küllerin Çimento Üretiminde Kullanılması**

Tipik bir çimento üretiminde silisyum dioksit, alüminyum oksit ve demir oksitli içerikler çimento ham karışımı için gerekli bileşenlerdir. Uçucu küller bu bileşenlerden zengin olduğu için çimento hammaddesi olarak kullanılabilirler (Bhatty vd., 2003).

Uçucu küller, çimentonun ana hammaddeleri olan kil ve kalkere hammadde olarak karıştırılarak klinker üretiminde kullanılmaktadır. Bu kullanım ile çimentonun öğütülme işlemi kolaylaşmakta ve öğütülme süresi kısaltılmaktadır. Böylelikle daha az enerji ile çimento üretimi gerçekleştirilmekte ve çimentonun bazı mekanik özelliklerinin iyileşmesi

sağlanmaktadır (Topçu ve Canbaz, 2001; Aruntaş, 2006). Çimento üretimi sırasında büyük miktarlarda doğal hammadde ve enerji tüketilmektedir. Bu üretim esnasında çimento fabrikalarından atmosfere sera etkisi yapan CO<sub>2</sub> gazı salınmaktadır. Uçucu küllerin çimento üretiminde kullanılması ile doğadan hammadde temini azalır ve böylelikle doğal çevrenin bozulmasının önüne geçilmiş olur (Ferreira vd., 2003). Ayrıca enerji tüketimi azalacağından CO<sub>2</sub> salınımı düşer ve küresel ısınmaya etkisi en aza indirilmiş olur. Enerji tasarrufundan dolayı da çimento maliyetinin azalması söz konusudur (Aruntaş, 2006).

Bhatty vd. (2002) yaptıkları çalışmalarında yüksek karbon içerikli (%20) küllerin çimento üretiminde kullanılabilirliğini incelemişlerdir. Uçucu kül kullanımı ile fabrikada kullanılan malzeme, üretim, enerji ve çevresel açıdan birçok faydalar sağlandığını belirtmişlerdir. Çalışmada kül kullanımı ile fabrikanın çimento üretiminde %4 enerji tasarrufu sağladığını ve ayrıca fabrikanın %10 daha fazla üretim yaptığını belirtmişlerdir. Öte yandan yapılan deneysel çalışmalar sonrasında uçucu küllerin, çimento hamuru içerisinde ek bağlayıcı madde olarak da kullanılabilceği belirlenmiştir (Papayianni, 1993; Krishnamoorthy vd., 2002).

Uçucu küllerin çimento üretiminde kullanılmalarını sahip oldukları incelik etkilemektedir. Kül inceliğinin artması puzolanik aktivite indekslerinin artmasına sebebiyet vermektedir. Ayrıca inceliği artan küllerin çimentolu harçlarda bazı özelliklere olumlu etkilerinin olduğu tespit edilmiştir. Chindaprasirt vd. (2005) çalışmalarında uçucu kül inceliğinin çimentolu harçlarda boşluk boyutu, porozite ve dayanıma etkilerini incelemiştir. İki farklı inceliğe sahip F tipi uçucu külü çimento yerine %20 ve %40 seviyelerinde ikame olarak kullanmışlardır. Çalışmalarında bütün kür sürelerinde portland çimentosu ile hazırlanan harçların basınç dayanımlarının uçucu küllerle hazırlanandan daha yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca en ince öğütülmüş uçucu külle yapılan harçların erken dayanımlarının öğütülmemiş kaba külle yapılanlara göre daha yüksek çıktığını ortaya koymuşlardır. İnceltmiş külle yapılan çimentolu harçların orijinal külle yapılanlara göre daha kompakt ve yoğun olduğu ve bununda dayanıma olumlu yansıdığını belirtmişlerdir.

### **1.5.3.3. Uçucu Küllerin Yeraltı Dolgu Malzemesi Olarak Kullanımı**

Uçucu küllerin yeraltı dolgusunda puzolanik özelliklerinden dolayı hem bağlayıcı malzemelere alternatif veya ikame olarak hem de atık malzeme sınıfında kullanılmaktadır.

Küllerin büyük bir çoğunluğunun kökeni kömür olduğu için genellikle kömür ocaklarında özelliklerine bağlı olarak hem atık malzeme hem de dolguda bağlayıcı hammadde olarak kullanılmaları mümkün olmaktadır. Özellikle farklı endüstriyel alanlarda kullanılmadıklarında bertaraf edilmeleri için yeraltı ve yerüstü kömür işletmelerinde dolgu içerisinde kullanımları söz konusu olmaktadır. Dolgu içerisinde uçucu kül kullanımı ile hem ekonomik hem de çevresel açıdan uygun malzeme temin edilmiş olunurken diğer yandan da madencilikte potansiyel rezervlerin kullanılabilirliği arttırılmış olur. Çevresel açıdan bakıldığında farklı bir kaynaktan malzeme gereksinimi duyulmadığından doğal kaynakların korunması gibi önemli bir etken söz konusu olmaktadır.

#### **1.5.3.3.1. Bağlayıcı Alternatifi veya İkamesi Olarak Kullanımı**

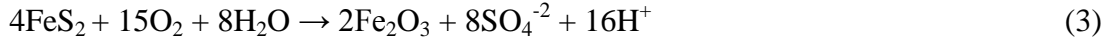
Dolgularda genellikle bağlayıcı olarak hidrolik bağlayıcılar kullanılmaktadır. Bağlayıcılar dolgu içerisinde mekanik özelliklerin belirlenmesinde kullanılmaktadır. Ancak işletmeler için en büyük sorunlardan biri dolgu maliyetidir. Maliyetin ise büyük bir kısmını bağlayıcılar oluşturmaktadır. Benzaazoua vd. (2004) çalışmasında macun dolgu içerisinde çimento maliyetinin 1 \$/ton civarında olduğunu belirtmiştir. Bu sebeple dolgunun mekanik özelliklerinin etkilenmeksizin dolgu teknolojisinde bağlayıcı oranının azaltılarak maliyetin optimize edilmesi gerekmektedir. Bunu gerçekleştirmek için çimento yerine daha ucuz bağlayıcıların kullanımının arttırılması gerekmektedir.

Çimentodan daha ucuz olan ve yapay puzolan olarak bilinen uçucu kül, yüksek fırın cürufu, öğütülmüş atık cam malzeme vb., gibi malzemelerin özellikle macun dolgu içerisinde ikame olarak kullanımına yönelik bazı çalışmalar yapılmıştır (Archibald vd., 1999; Benzaazoua vd., 1999; Hassani vd., 2001; Benzaazoua vd., 2002; Mohammed vd., 2002; Tariq ve Nehdi, 2007; Erçikdi, 2009). Yapılan bu çalışmalar genellikle sülfür içeriği yüksek atıklardan kaynaklı dayanım ve dürabilite sorunlarının giderilmesine yönelik olmuştur. Bunun yanında dolgunun ekonomik olarak optimize edilmesi de bu çalışmalarda ön plana çıkmaktadır.

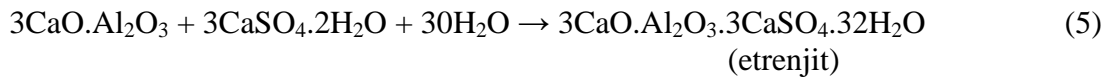
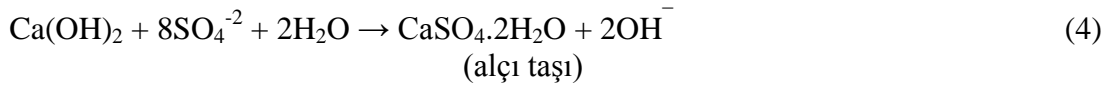
Bazı maddelerin betonun bileşenleri ile onun bütünlüğüne zarar vererek yıkıcı bir etkileşim içinde bulunduğu bilinmektedir. Bunlar genellikle reaktif mineral agregaları (yani sülfütlü agregalar), karışım suyundaki yüksek sülfat konsantrasyonu ve kurumaya bağlı atmosferik ortamda gelişen yoğun CO<sub>2</sub> varlığıdır. Bu oluşumlar beton içerisinde (Kosmatka vd., 1995; MEND, 2006);

- Karbonatlaşma,
- Alkali-agrega reaksiyonları,
- Sülfat atak,
- Suda çözünme gibi betonun bütünlüğünü etkileyen bu süreçlere sebebiyet vermektedirler. Bu etkileşimler birbirine benzer yapılarıyla dolgular içinde geçerli olmaktadır.

Macun dolgularda genellikle sülfür içeriği yüksek atıkların (özellikle pirit) oksidasyona uğraması sonucunda oluşan asit ( $H^+$ ) ve sülfatın ( $SO_4^{-2}$ ) dolgunun dayanım ve dürabilitesini olumsuz yönde etkilemektedir (Eşitlik 3) (Erçıkıdı, 2009).



Benzaazoua vd. (1999), Hassani vd. (2001), Benzaazoua vd. (2002), Tariq ve Nehdi (2007) ve Erçıkıdı (2009) tarafından yapılan çalışmalarda oksidasyon sonucu açığa çıkan asidin hidratasyon ürünlerini olumsuz etkilediğini ve bundan dolayı da dolgu dayanım ve dürabilitesini azalttığını belirtmişlerdir. Yine sülfat varlığının dolguda kullanılan bağlayıcı ürün yapısında bulunan portlandit ( $Ca(OH)_2$ ) ve trikalsiyum alümina ( $3CaO.Al_2O_3$ ) ile reaksiyona girerek genleşme özelliğine sahip ikincil jelleri (Eşitlik 4 ve 5) (etrenjit-alçı taşı) oluşturduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca bu jellerin oluşumunda hacim genleşmesi yaşandığından dolgu içerisinde içsel bir gerilme oluşturarak çatlamalara ve dayanım kaybına neden olmaktadır (Bernier vd., 1999).



Macun dolguda yaşanan bu dayanım ve dürabilite kaybının katkılı portland çimento veya çimento ile birlikte puzolanik özelliğe sahip mineral katkı maddeleri (uçucu kül, yüksek fırın cürufu vb.) kullanarak giderilebileceği belirtilmiştir. Uçucu küller ile dolgu içerisinde ikincil jel oluşumu sonrası yaşanan dayanım kaybının giderilmesine yönelik çalışmalar Hassani vd. (2001), Benzaazoua vd. (2002) ve Mohamed vd. (2002) gibi araştırmacılar tarafından incelenmiştir.

Hassani vd. (2001) sülfür içeriği yüksek malzemelerle yaptığı macun dolgu karışımlarında, çimento yerine uçucu kül ilave (%40-60 oranında) ederek uzun dönemli dayanım kaybının azaldığını ancak uçucu külün bağlayıcı özelliğinin çimentoya kıyasla düşük olmasından dolayı dolgu için yeterli dayanım kazanımının sağlanamadığını belirtmiştir. Mohamed vd. (2002) yüksek sülfür içerikli atıklarla yaptığı çalışmalarında bağlayıcı olarak, bağlayıcı özelliği yüksek olan C sınıfı uçucu kül kullanmışlardır. Uçucu külün dolgunun işlenebilirliği, kıvamı ve hacim sabitliğini iyileştirdiği belirtilmiştir. Benzaazoua vd. (2002) 3 farklı (yüksek, orta, düşük) sülfür içerikli malzemeler ile yaptıkları karışım deneylerinde portland çimentosu yerine ikame uçucu kül (%50 oranında) kullanmışlardır. Çalışmalarında uçucu külün özellikle yüksek kükürt içerikli atık malzemelerle oluşturulan numunelerin uzun dönemli dayanımına olumlu etkidiğini belirtmişlerdir.

Mishra ve Karanam (2006) ise yaptıkları çalışmalarında uçucu küle kireç ve alçı taşı ilave ederek hidrolik dolguda bağlayıcı malzeme olarak kullanmayı denemişlerdir. Yaptıkları çalışmaların sonucunda hidrolik dolguda kum yerine alternatif olarak kireç ve alçı taşı ilavesiyle uçucu kül kullanımının malzemede herhangi bir dayanım kaybı yaşanmaksızın kullanılabileceğini belirtmişlerdir. Ayrıca külün yeraltı boşluklarına taşınmasının daha kolay olabileceğini ifade etmişlerdir.

Uçucu kül gibi yapay puzolanların dolgu içerisinde kullanımının temel faydaları aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

- Karışımın kıvamını iyileştirmek,
- Karışımın boşluk oranı ve geçirgenliğinin azaltılması,
- Alkali-silika reaksiyonu ve asit-sülfat etkisiyle oluşan dayanım ve dürabilite kaybının azaltılması,
- Çimentolu bağlayıcılar yerine veya ikame kullanılarak enerji kaybını azaltmak ve çevresel açıdan uygun bir malzeme temini elde etmek
- Ekonomiklik sağlamak

#### **1.5.3.3.2. Atık Malzeme Olarak Kullanılması**

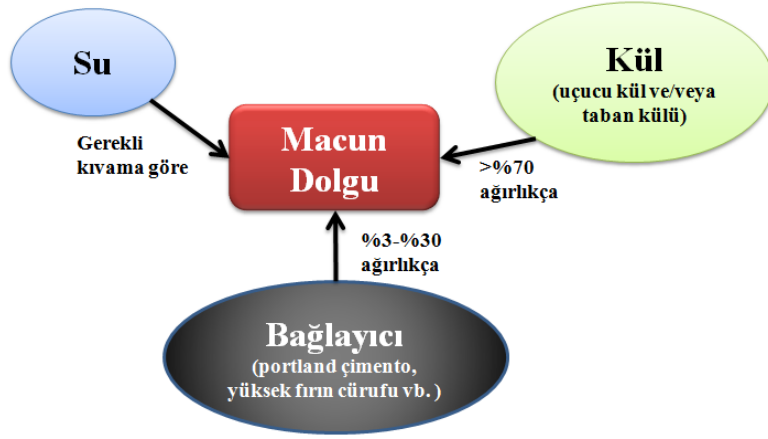
Küller herhangi bir endüstri alanında yeniden kullanılmadıklarında atık malzeme olarak genellikle termik santrallere yakın yerlerde depolanıp bertaraf edilmektedir. Bunun

dışında bazı yeraltı ve yerüstü kömür işletmelerinde yeni bir malzeme bulma gereksinimi duymaksızın dolgu malzemesi olarak kullanılarak bertarafı gerçekleştirilmektedir. Kömür ocaklarında yeraltı veya yerüstü dolgu malzemesi olarak kullanımı ile ilgili Palarski (1998), Grice vd. (1999), Matsui vd. (2000), Matsui vd. (2001), Sasaoka vd. (2001), Sasaoka vd. (2002), Chugh vd. (2003), Shimada vd. (2003), Xie-xing vd. (2008), Zhou vd. (2004), Ward vd. (2006), Çavuşoğlu (2008), Yu vd. (2008), Yanli vd. (2010), Jixiong vd. (2011a), Jixiong vd. (2011b), Wen-biao ve Xue-sheng (2011) ve Qiang vd. (2012) gibi çeşitli kaynaklarda bahsedilmiştir.

Uçucu küllerin uzun ayak madenciliğinde zemin kontrolü sağlamak, tasman etkisini azaltmak ve kömür rezervinin geri kazanımını artırmak için yapılan yeraltı dolgusunda dolgu malzemesi olarak kullanımı, Almanya, Amerika, Çin, Polonya, vb. gibi çeşitli ülkelerde mevcuttur (Palarski, 1998; Grice vd., 1999; Ward vd., 2006; Jixiong vd., 2011a).

Özellikle Çin’de uçucu küllerin yeraltı madenciliğinde kullanımına yönelik çalışmaların fazlalığı göze çarpmaktadır. Çin’de bulunan kömür madenlerinin çoğunluğu yapıların, suların ve demir yollarının mevcut olduğu bölgelerin altında yer almaktadır. Bu tip kömür madenlerinde hızlı üretim yapmak ve kömürü yeraltından yerüstüne çıkarmak için seçilen madencilik metotlarından birisi de mekanize yöntemdir. Ancak kömür madenlerinin bulunduğu bölgelerdeki yerleşim yerlerinden dolayı, mekanize yöntem için göçertmeli yöntemden ziyade dolgulu oda-topuk yöntemi kullanmak zorunlu hale gelmektedir. Düşük kalorili bu kömür madenlerinin yakınlarında kurulan termik santrallerden elde edilen atık küller yine bu ocaklarda dolgu malzemesi olarak kullanılarak bertaraf edilmektedir (Jixiong vd., 2011a).

Bazı yeraltı işletmelerinde uçucu kül ve çimento karışımli dolgular kullanılmaktadır (Şekil 1.12). Bu tip dolgu karışımlarında artan kül miktarıyla dayanım düşmektedir. Yeraltı dolgusunun gerekli mekanik büyüklüğü ise madenin bulunduğu jeolojik koşullara bağlı olarak değişmektedir. Bu koşullar; derinlik, yan kayaç-toprak tipi ve özellikleri, madencilik yöntemi vs. şeklindedir. Derin olmayan maden ocaklarında gerekli mekanik büyüklükler derin madenlerle kıyaslandığında ciddi boyutlarda değildir (Sasaoka vd., 2002). Wagner ve Galvin (1979) çalışmalarında derin olmayan oda-topuk yöntemiyle çalışan kömür işletmelerinde uçucu kül ile yapılan dolguların tavan şartlarında iyileştirme yaparak maden işletme koşullarını düzenlediği ve üretim miktarını arttırdığını belirtmişlerdir.



Şekil 1.12. Uçucu küllü macun dolgu (CIMFR, 2012'den değiştirilerek).

Matsui vd. (2000) ve Sasaoka vd. (2001) çalışmalarında uçucu küllerin atık kayaçlar ile birlikte yüksek arınlı açık ocak kömür işletmelerinde sürekli kazı sistemiyle kazı yapan makinelerin cevheri kazdıktan sonra oluşan boşluklara dolgu yapıldığını belirtmişlerdir. Üretim yöntemi oda-topuk olan açık ocak madeninde dolgunun, kazılmış bölgenin daha sağlam kalmasını ve zemin kontrolünün sağlanmasını gerçekleştirdiği belirtilmiştir.

Zhou vd. (2004) yaptıkları çalışmada uçucu küllerin yeraltı kömür işletmesinde kömür kazıldıktan sonra ortaya çıkan boşlukların doldurulmasında kum ile beraber kullanıldığını belirtmişlerdir. Yeraltı işletmeciliği ile çıkartılan kömürün bulunduğu bölgede yerüstünde yerleşim yerlerinin olması dolgu yapılmasını zorunlu hale getirmektedir. Tasman oluşumunun önüne geçen dolgunun 28 günlük dayanımının 1 MPa civarında olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca dolgu içerisinde uçucu kül kullanımının dolgu maliyetini düşürdüğünü belirtmişlerdir.

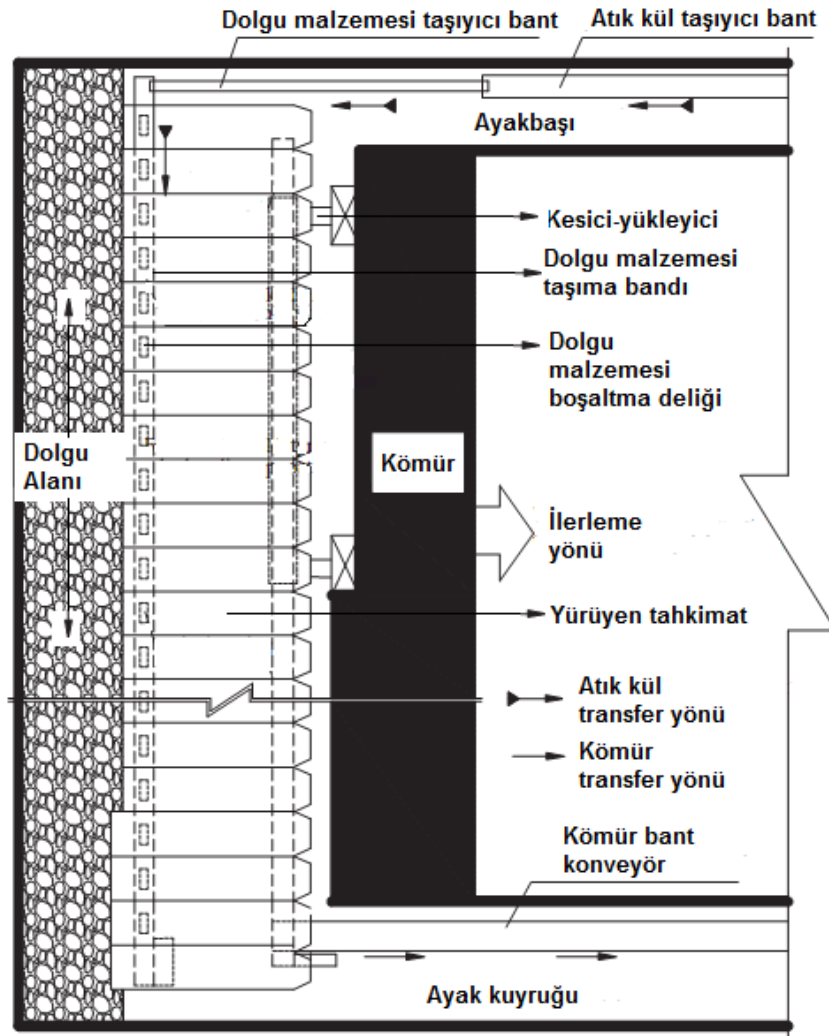
Dolgulu çalışan yeraltı mekanize kömür işletmelerine örnek olarak Çin'de bulunan Xingtai madeni verilebilir. Qiang vd. (2012) Xingtai madeni ile ilgili yaptıkları çalışmalarında mekanize sistemi ve mekanize sistem içinde yer alan yeraltı dolgusunun yapılış şeklini detaylı biçimde açıklamıştır.

Xingtai Kömür Madeninde Yeraltı Dolgusu; Xingtai kömür madeninde kömür damarı 9°'lik bir eğime, ortalama 3 m'lik kalınlığa sahip olup, yeryüzünden 320 m derinlikte bulunmaktadır. Kömürün alt tabanında 4,5 m'lik ve üstünde 6,7 m'lik bir kalınlığa sahip kumlu şeyl mevcuttur (Qiang vd., 2012). Dolgulu çalışılan tam mekanize yöntemde genellikle dolgu malzemesi olarak atık kayaç, uçucu kül ve diğer katı malzemeler kullanılmaktadır (Şekil 1.13). Bu malzemeler öncelikle yerüstünde

depolanarak taşınacağı bölge için hazır hale getirilmekte, sonrasında düşey çalışan sürekli konveyör sistemi ile yerüstünden yeraltına aktarma bant konveyörlere katı maddeler transfer edilmekte ve bant konveyör sistemi yardımıyla da dolgu yapılacak bölgeye nakledilmektedir (Jixiong vd., 2011a; Jixiong vd., 2011b; Qiang vd., 2012).

Bu tip mekanize ayaklarda dolgu sistemi 4 parçadan oluşmaktadır;

- Yeryüzü transfer sistemi,
- Düşey besleme sistemi,
- Yeraltı taşıma sistemi,
- Dolgu alanına doldurma sistemi



Şekil 1.13. Yeraltı mekanize uzun ayak madenciliğinde dolgulu çalışma planı (Qiang, vd., 2012).

Dolgu malzemesi atık kayaç ve uçucu kül yerüstünde karışım tesisinde karıştırıldıktan sonra düşey besleme sistemi ile yeraltında bulunan dolgu silolarına nakledilir. Buradan dolgu malzemesi karışımı bant konveyörlerle dolgu yapılacak alana kadar taşınır. Ayak içinde bulunan yürüyen tahkimatların arka bölümlerine yerleştirilmiş dolgu malzemesi taşıma konveyörleri vardır. Bu konveyörlerin içerisinde her biri bir yürüyen tahkimat ünitesine gelecek biçimde boşaltma delikleri mevcuttur. Bu boşaltma deliklerinden kuyruk kısmından başlanmak koşuluyla dolgu malzemesi boşaltılarak göçük kısmının tamamına yakını doldurulur ve böylece dolgu işlemi tamamlanmış olur (Şekil 1.13). Bu sistemde üretim yapıldıktan sonra açılan boşluğun tamamına yakını doldurulmaktadır (Qiang, vd., 2012).

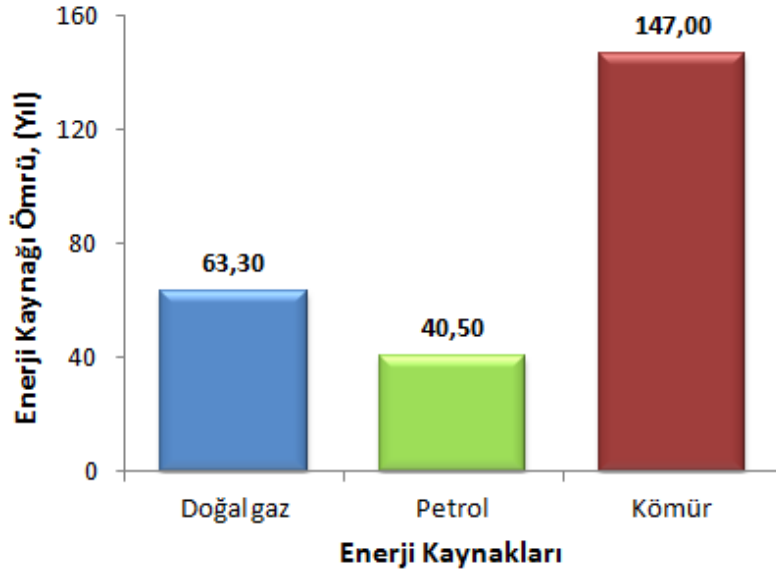
Kömürden elde edilen küller ile yapılan macun kıvamında dolgunun bazı avantajları aşağıdaki şekildedir (CIMFR, 2012);

- Fazla miktarda yâda hiç susuzlandırma gerekmediği için dolgu susuzlandırma maliyeti önemli ölçüde azalmaktadır. Dolgunun katılaşması külün puzolanik özelliklerinden ve yeteri miktarda ilave edilen çimentolu malzemelerle sağlanmaktadır.
- Genellikle kömürden elde edilen külün tamamı dolgu için kullanıldığında atık malzemelerin yerüstü bertarafı dikkate değer bir biçimde azalır ve bertaraf maliyetleri önemli ölçüde azalmış olur.
- Dolgu kapasitesi yüksek olduğundan dolayı daha yüksek üretim söz konusu olmaktadır.
- Hidrolik eğimden dolayı geleneksel dolgunun uygun olmadığı durumlarda macun kıvamındaki dolgu sistemi uygulanabilir.
- Hidrolik dolgudaki ince malzemelerin pompa ve borularda yol açtığı aşınma ve korozyon problemleri uçucu küllü macun dolgu ile artık oluşmamaktadır.
- Erken dayanım kazanımı sayesinde kısa sürede dolgu süresi gerçekleşmektedir.
- Düşük su içeriğinden dolayı dolgu su drenaj barikatlarının yapımını ortadan kaldırır.

#### 1.5.4. Uçucu Küllerin Çevresel Etkileri

İnsanoğlunun yaşamını sürdürmesi için sürekli olarak bir enerjiye, yaşam alanına ve doğal veya yapay malzemelere ihtiyaç duymaktadır. Bu ihtiyaçlarını karşılamasının sonucu olarak da çeşitli atık malzemelerin oluşması kaçınılmazdır. Dünyada nüfusun artışı, sanayileşme, teknolojinin yaygınlaşması ve refah seviyesinin yükselmesi ile enerji ve hammadde tüketimindeki artış da kaçınılmaz olmuştur. Bu tüketimdeki artışın sonucunda da daha fazla atık malzeme meydana gelmiştir. Atık malzemelerin kaynağı çok çeşitli olabilmektedir. Bazı atık malzemeler enerji üretimi sonucunda meydana gelmektedir; örneğin nükleer enerji kullanımı veya kömürün yanması gibi. Bazıları ise üretim sürecinde yan ürün olarak serbest bırakılmayla meydana gelmektedir; örneğin yüksek fırın cürufu, çelik cürufu vb. gibi (Eijk, 2001).

Günümüzde enerji tüketimi ekonomik ve sosyal kalkınmanın önemli göstergesi olmuştur. Ülkelerin hangi enerji kaynaklarını ve kullanım oranlarını belirlemeleri ise kendi enerji politikalarının temelini oluşturmaktadır. Sürdürülebilir bir kalkınma modeli için kullanılacak olan enerji kaynaklarının çevreye zarar vermemesi de büyük önem arz etmektedir (Avcı, 2005; Yılmaz ve Uslu, 2007; Yılmaz, 2008). Dünyada enerji üretiminde kullanılan birincil enerji kaynaklarının ömrü zamanla azalmaktadır (Şekil 1.14). Bu kaynaklar içerisinde kömür en uzun ömürlü enerji kaynağı olarak görülmektedir. Son zamanlarda çevresel nedenlerden dolayı alternatif enerji kaynaklarına (rüzgâr enerjisi, güneş enerjisi, jeotermal enerji ve biokütle enerji) bir yoğunlaşma meydana gelmiştir. Alternatif enerji kaynaklarının yetersiz kalmasından dolayı günümüz enerji üretiminde çevreyi asit yağmurları, azot oksitleri, sera etkisi gibi etkenlerle bol miktarda kirleten birincil enerji kaynakları (kömür, petrol ve doğal gaz) yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bu tür yakıtlardan yanma sonucu enerji elde edildiğinde yanma ürünleri (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> ve SO<sub>2</sub> gibi gazlar) bacalardan atmosfer içinde dağılırlar. Baca gazları ayrıca uçucu kül ve hidrokarbonları içerirler (URL, 7).

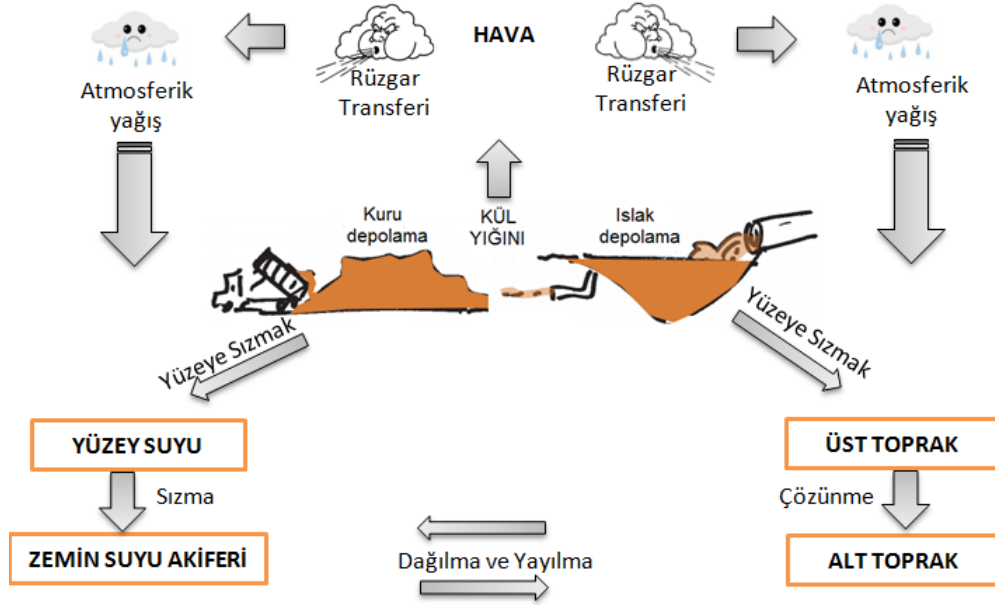


Şekil 1.14. Birincil enerji kaynaklarının tükenme ömrü

Enerji üretiminde en önemli kaynaklardan birisi de kömürle çalışan santrallerdir. Santrallerde kömürün yakılmasıyla birlikte kömürde bulunan ve kirliliğe neden olma özelliğine sahip bir takım toksik elementler, cüruf, kül ve gaz şeklinde açığa çıkan atıklara geçer (Baba, 2001). Atıkların da çevreye boşaltılması ile bu elementlerin de hava, su ve toprağa kadar ulaşması sağlanır ve dolayısıyla çevre kirliliğine sebep olunur (Şekil 1.15).

Uçucu küller çok ince malzemelerdir ve havada uzak mesafelere taşınabilme eğilimindedirler (Şekil 1.15). Uygun bir biçimde bertaraf edilmedikleri zaman hava ve su kirliliğine yol açtıkları ve solunum ile ilgili bir takım rahatsızlıklara neden oldukları da bilinmektedir.

Uçucu küller oksit, hidroksit ve kalsiyum ve demir sülfat gibi çevre kirliliğine sebep olabilecek maddeleri büyük oranda içermektedir. Aynı zamanda arsenik, boron, kadmiyum, krom, manganez, selenyum ve vanadyum gibi önemli miktarda tehlike arz eden liç karakterine sahip iz elementler de mevcuttur. Çevre kirliliğine sebep olan bu elementler nedeniyle uçucu küllerin her alanda rahatça kullanılması ve bertaraf edilmesi çevresel açıdan sakıncalı olmaktadır (Lokeshappa ve Dikshit, 2011).



Şekil 1.15. Küllerin depolanmasından kaynaklanan çevresel etkiler (Envis, 2007).

Uçucu küllerde mevcut bulunan metaller çok yüksek liç kabiliyetine sahip olduklarından dolayı öncelikli kirleticiler listesindedirler. Meteorolojik parametrelere bağlı olarak bu artık materyallerden gelen radyoaktif ve toksik elementlerin taşınması termik santrallerin çevresel etki ve sağlığa zararlı ortamlar oluşturmasına sebebiyet verir. Asidik uçucu küllerden liç sonucunda oluşan kirlilik suda yaşam ortamı için çok yüksek miktarda zehirli bir ortam yaratır. Kurşun gibi ağır metaller içeren uçucu küller özellikle insan ve hayvanların yaşam ortamlarına toksik maddeler yayarlar ve bu ortamlardaki yaşamı olumsuz yönde etkilerler. Endüstriyel atıkların çoğunda kurşun kullanımından dolayı buldukları çevrede kirlenmiş topraklar yaygın bir şekilde bulunmaktadır. Bu sebeple canlıların yaşam ortamları daha tehlikeli bir hal almaktadır (Lokeshappa ve Dikshit, 2011).

Geleneksel olarak uçucu kül ve taban küllerinin depolanması, termik santral yakınlarında bir alanda suyla karıştırılarak çamur (bulamaç) haline getirilip büyük yığınlar yapılması şeklinde olmaktadır. Bu şekilde bertaraf yöntemi uzun dönemli çevresel problemlere yol açmaktadır. Bu çevresel problemler şu şekilde açıklanabilir (Envis, 2007);

- Depolama işlemi çok geniş alanlar gerektirdiğinden tarıma elverişli alanların işgal edilmesine yol açmaktadır.
- Yığılma işleminin biri bittiğinde diğerinin inşası başlamış olmakta ve büyük maliyetler gerektirmektedir. Aynı zamanda yine tarıma elverişli alanların kaybına yol açmaktadır.

- Yiğın işleminde külün bulamaç halini alması için çok yüksek miktarda su kullanılması gerekmektedir.

Uçucu küllerin santral bacalarında elektro filtreler yardımıyla tutulup atmosfere çıkışı önlenerek büyük bir çevre kirliliğinin önüne geçilmesi mümkündür.. Bu yöntemle tutulan ve atık malzeme olan uçucu küller çeşitli endüstriyel alanlarda kullanıma sunulurarak bertaraf edilmektedir. Uçucu küllerin endüstriyel alanda kullanılması şu ilave üstünlükleri sağlamaktadır (Envis, 2007);

- Betonun dürabilitesini olumlu etkileyerek beton yollar ve yapıların ömrünü uzatır.
- Çimento imalinde ikame veya doğrudan kullanıldığında atmosfere salınan zararlı gazların miktarında ve enerji kullanımında azalmaya neden olur.
- Toprak dolgularında bertaraf edildiklerinde kömür yanma ürünlerinin miktarında azalmaya neden olur.
- Diğer doğal kaynakların korunmasını sağlamış olur.

Çevre ile ilgili literatürde, malzemeler birincil (primary) ve ikincil (secondary) olmak üzere iki ayrı kategoride sınıflandırılır. Birincil malzemeler yerkabuğundan çıkartılan hammaddelerdir ve bir üretim sürecinde ilk kez kullanılırlar. İkincil malzemeler ise endüstriyel işlemler sırasında ortaya çıkanlardır ve yeni bir üretim sürecinde tekrar kullanılırlar. Birincil malzemeler yerine ikincil malzemelerin kullanılması günümüzde önem kazanmıştır. Birincil malzemelerin diğer süreçlerde ortaya çıkan ikincil malzemelerle yer değiştirmesinin iki avantajı vardır (Eijk, 2001);

- 1) İkincil malzemelerin yaşam (kullanım) ömrünün uzaması,
- 2) Doğal kaynakların korunması.

Bu sonuçlardan yola çıkarak ikincil malzeme sınıfına giren uçucu küllerin birincil malzemelerle yer değiştirilmesi çevresel açıdan önem arz etmektedir. Bu sebeple uçucu küllerin çeşitli endüstriyel alanlarda kullanımının sağlanması gerekmektedir.

#### **1.5.5. Uçucu Küllerin Mekanize Yeraltı Kömür İşletmelerinde Dolgu Malzemesi Olarak Kullanımı**

Kömür madenciliğinin en yaygın üretim yöntemlerinden birisi uzunayak işletme yöntemidir. 17.yy sonlarına kadar uzanan uzunayak madenciliği, 1950'lerde tam mekanize sisteme geçişle kömür üretiminde hız ve verimliliği de beraberinde getirmiştir (Anon, 1995; Peng, 2006). Uzunayak kömür işletme yöntemi, Batı Avrupa orijinli olmasına

rağmen, Dünya'daki uygulamaları bu coğrafi sınırların ötesine taşarak, giderek daha yaygın bir üretim sistemi olarak gelişmektedir. Özellikle ABD ve Avustralya'da 1980'li yıllardan sonra önem kazanan bu yöntem kömür madenciliğinde verimliliği önemli ölçüde artırmıştır. Yöntemin yaygınlaşmasındaki en önemli sebeplerden bir tanesi de 1980'lerden günümüze kadar teknolojiye de bağlı olarak geliştirilen makine-ekipmanların bu sisteme uyarlanması ile birlikte verimliliği iki kat arttırmasıdır (Ünver, 1996).

Ülkemizde yeraltı mekanize uzun ayak yöntemi ile çalışan çok fazla kömür maden ocağı bulunmamaktadır. Mekanize uzunayak yöntemi ülkemizde ilk olarak 1987 yılında TKİ'ye bağlı OAL işletmelerinde uygulamaya sokulmuştur. Ege bölgesinde de 2000'li yıllardan sonra linyit ocaklarında yeraltı mekanize uygulamalar görülmeye başlanmıştır. Halen özel sektör eliyle yürütülen Çayırhan Yeraltı Mekanize sisteminde 3 farklı ocakta (B, C ve G sahası) üretime devam edilmektedir (Çavuşoğlu vd., 2009; Kahraman vd., 2011). İşletme, Ankara ilinin 124 km batısında yer alan linyit havzasında faaliyet göstermektedir (Şekil 1.16).



Şekil 1.16. Yer bulduru haritası

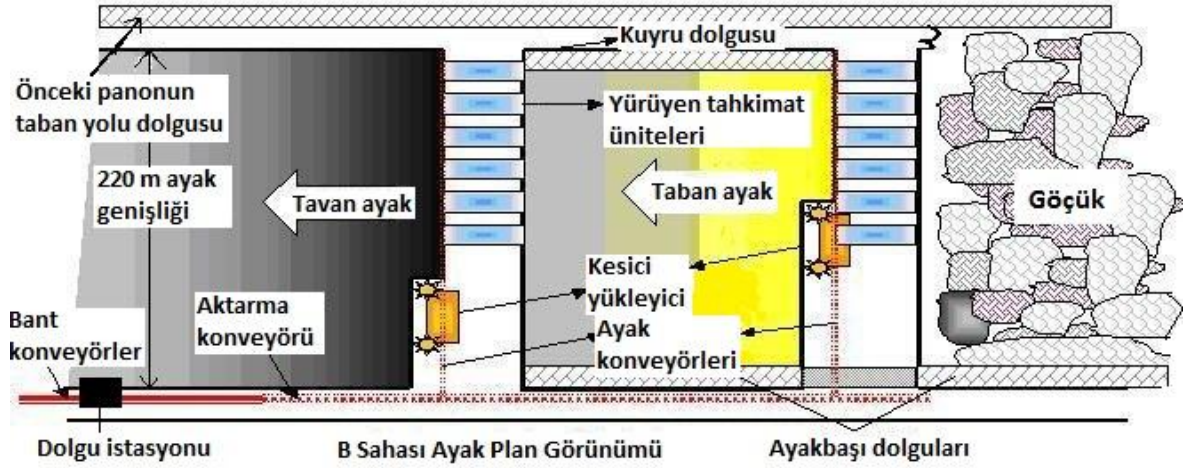
Yaklaşık 400 milyon ton kömür bulunan Çayırhan havzasında kömür, bir ara kesmeyle ayrılarak iki damar halinde konumlanmıştır. Sahanın batısında iki damar arasındaki ara kesme kalınlığı 1,2–1,8 m kalınlığında iken sahanın doğu kesiminde ara

kesmenin kalınlığı 0,5–1 m arasında değişmektedir. Bu nedenle sahanın batısında (B sahası) iki damar ayrı ayrı çalışılacak şekilde planlanırken sahanın doğusunda ise (C ve G sahaları) tek ayak çalışılacak şekilde planlanmıştır ve bütün makine-ekipman buna göre seçilmiştir (Aydın ve Kaygusuz, 2000).

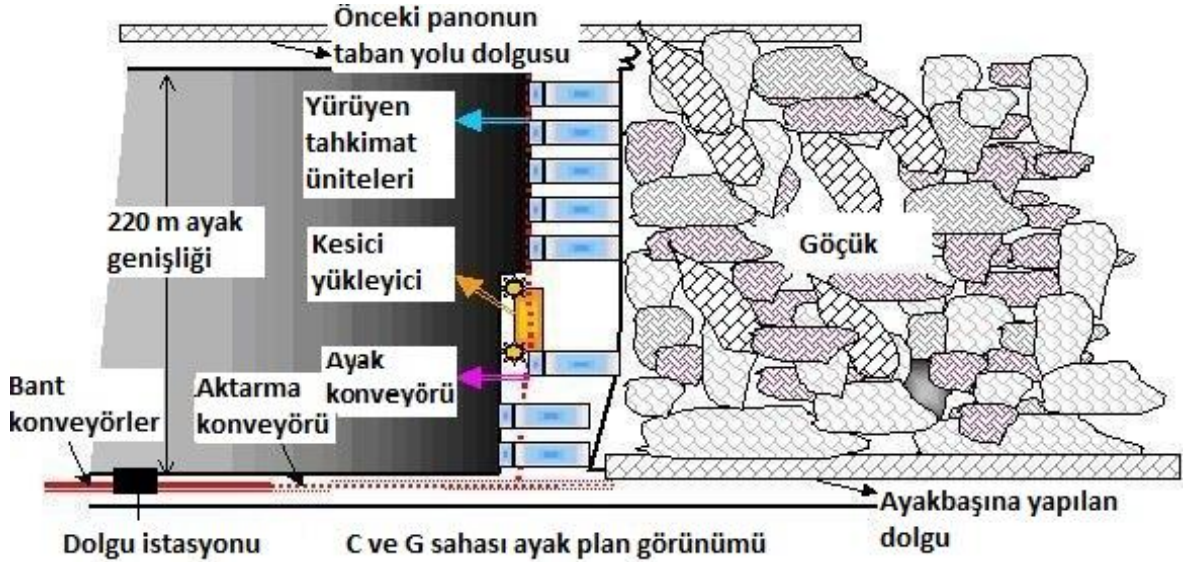
Çayırhan Yeraltı İşletmelerinde kömür üretimi dönümlü göçertmeli uzun ayak şeklinde tam mekanize olarak gerçekleştirilmektedir. Dolgu sistemin bir parçası olmasından dolayı sistemi tam olarak “dönümlü göçertmeli dolgulu tam mekanize uzun ayak yöntemi” şeklinde tarif etmek de mümkündür (Çavuşoğlu, 2008). Yöntemde taban yolu ihtiyacını en aza indirmek, rezervlerin daha iyi kullanılmasını sağlamak, kömürün kendiliğinden yanma riskini azaltmak için her sahada panoların alt taban yolları bir sonraki pano için üst taban yolu olacak şekilde planlanmıştır. Bu panolarda ayak başlarına yapılan dolgu taban yollarında bulunan mevcut tahkimat sistemine destek olarak bir sonraki panoda kullanımı için yardımcı olmaktadır (Çavuşoğlu, 2007).

Çayırhan Yeraltı Mekanize Üretim Yöntemi; Şekil 1.17’de iki ayaklı (multiple longwall) üretim yapılan B sahasında tavan ve taban ayaklardaki üretim planları görülmektedir. Alt taban yolunun bir sonraki panonun üst taban yolu olarak kullanılacağından hem ayak başlarında hem de kuyruk bölümünde taban yolu tahkimatını güçlendirmek ve göçük tarafından taban yollarına gaz sızıntısının önüne geçilmesi için dolgu yapılmaktadır. Yapılan dolgunun boyutu genel itibarıyla 2–3 metre genişliğinde olmakta yüksekliği ise tavan ve taban kömürünün yüksekliğine bağlı olarak 1,5–2 metre arasında değiştiği görülmektedir.

Şekil 1.18’de tek ayak yöntemiyle (single pass longwall) üretim yapılan C ve G sahasında üretim yapılan bölgenin plan görünümü görülmektedir. Sahalarda üretime taban yollarının açılmasından sonra genişletilmiş kılavuz galerisine ve taban yollarına üretim ve nakliyat ekipmanlarının montajını takiben başlanır. C ve G sahasında sadece ayak başlarında kalıp yapılıp dolgu alınmaktadır. Kalıbın genişliği 3 m civarında olup yüksekliği ise kömür kalınlığına bağlı olarak genelde 4–4,7 m civarında olmaktadır.



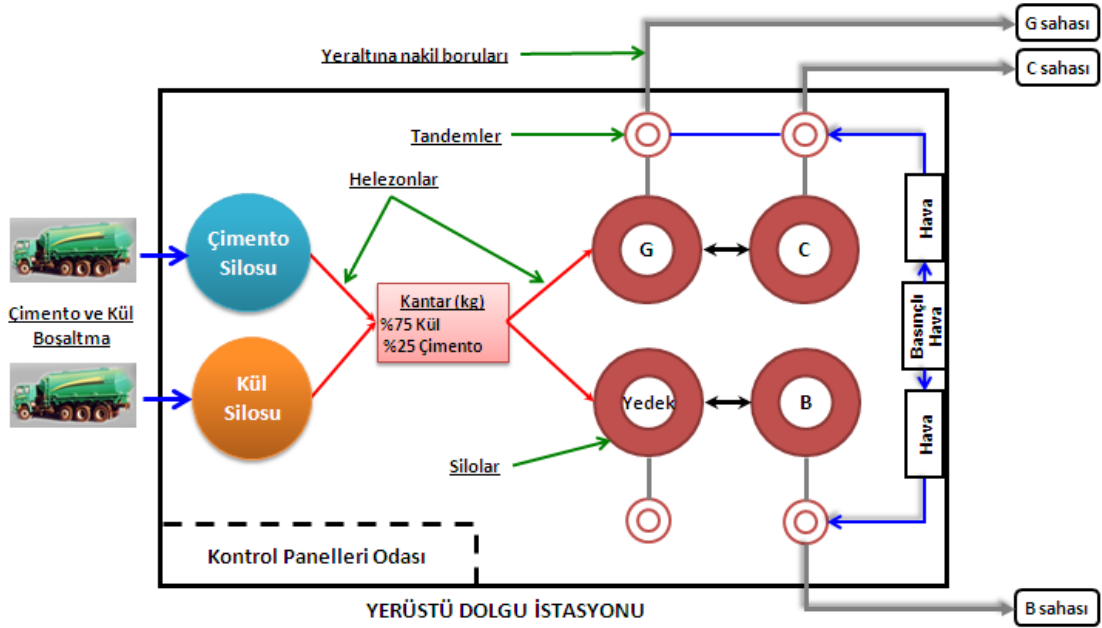
Şekil 1.17. B sahası ayak plan görünümü (İbuk, 2006).



Şekil 1.18. C ve G sahaları ayak plan görünümü (İbuk, 2006).

Çayırhan İşletmesinde yeraltı dolgusunun diğer yöntemlerden farklılıkları vardır. Bunlarda birincisi, dolguda dayanımın erken sürelerde yüksek olması istenmesi, diğeri ise çok kısa sürede zamanla değişken ve önemli büyüklükteki arazi yükleri altında kalmasıdır. Dolgunun mukavemeti genel olarak yapıldığı andan itibaren zamana bağlı olarak artar. Üretim yapılan bölgede, bir yandan arazi basınçları zamana bağlı olarak artarken diğeri yandan bunu karşılayacak dolgunun mukavemeti de artmaktadır. Burada önemli olan dolgunun yeraltı tahkimat ünitesiyle birlikte arazi basınçlarına yeteri kadar mukavemeti sağlayıp arazi basınçlarını karşılayabilmesidir (Çavuşoğlu, 2007).

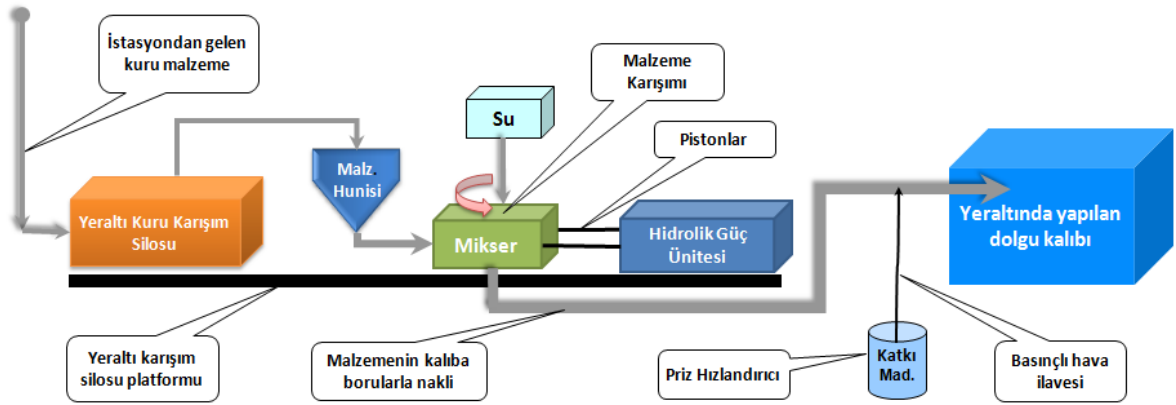
Yerüstü Dolgu Tesisi; İşletmede dolgu malzemesi ilk olarak yerüstü tesisinde kuru bir biçimde karıştırılarak basınçlı hava ve borular yardımıyla yeraltına nakledilmektedir. Yerüstü tesisinde 4 adet karışım ve 1'er adet kül ve çimento silosu olmak üzere 100 ton kapasiteli toplam 6 adet silo bulunmaktadır (Şekil 1.19).



Şekil 1.19. Yerüstü dolgu karışım istasyonu

İlk olarak termik santral atığı olan kül ve piyasadan temin edilen portland kompoz çimento (CEM II 42,5R) silobas kamyonlar vasıtasıyla çimento ve kül silosuna boşaltılmaktadır. Buradan ağırlıkça %75 kül ve %25 çimento olacak biçimde otomasyon haline getirilen kantarda malzemelerin tartımı yapılır ve bu karışım malzemesi taşıyıcı helezonlar vasıtasıyla ocakların karışım silolarına aktarılır. Karışım malzemesi basınçlı hava sistemi ile önce tandem adı verilen kuru püskürtme silolarına sonra da yeraltında konumlandırılmış ara istasyon adı verilen ve 20 m<sup>3</sup> kapasiteli olan silolara kuru bir biçimde nakledilir. Ara istasyonlar malzemenin yeraltına çok uzun mesafeden olan kaybını ve olası arızaları en aza indirmek için konumlandırılmışlardır. Basınçlı hava, sistemde nemden kaynaklı herhangi bir tıkanıklığa sebebiyet vermemesi için hava kurutuculardan geçirilmektedir.

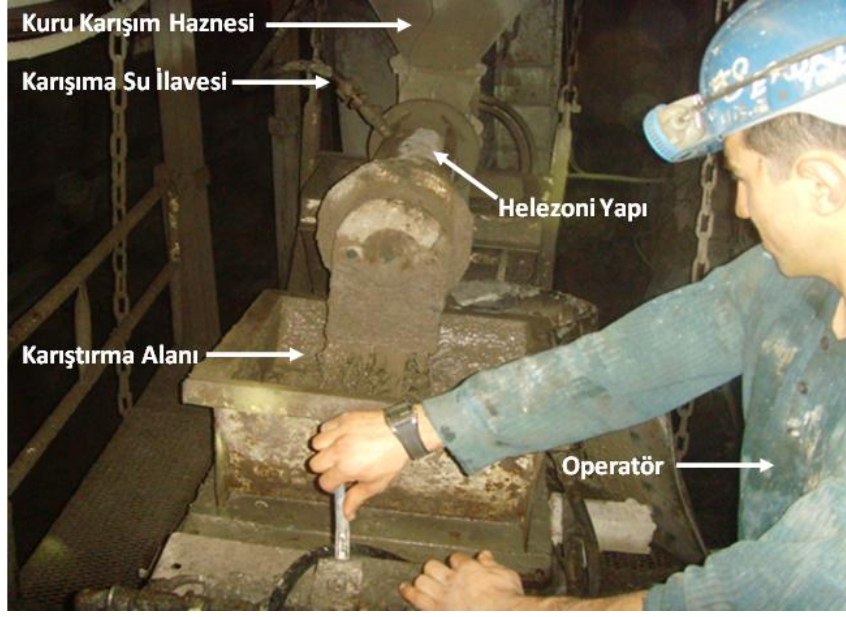
Yeraltı Dolgu İşleyişi; Yeraltında ara istasyondan ayrı olarak üretimin yapıldığı panonun ayakbaşı taban yolunda ayakbaşına üretim başlangıcında yaklaşık 500-1000 m mesafelerde dolgu istasyonları mevcuttur (Şekil 1.17-18). Ara istasyonlardan gelen kuru malzeme buradaki nispeten daha küçük ( $8 \text{ m}^3$ ) kapasiteli elefantino adı verilen siloda toplanmaktadır. Dolgunun nihai olarak bulamaç (macun kıvamı) halini aldığı bölge burasıdır (Şekil 1.20).



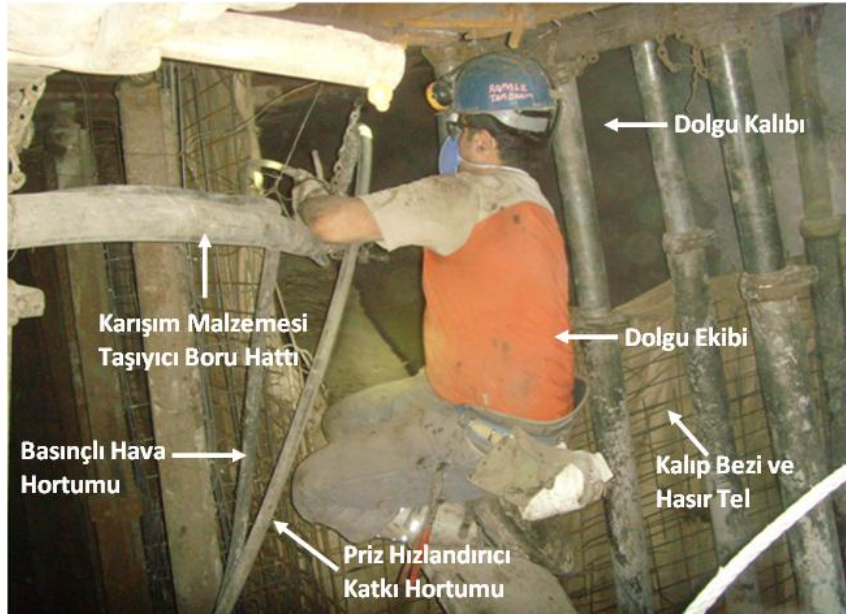
Şekil 1.20. Yeraltı dolgu işleyiş şeması

Mikserler vasıtasıyla yeteri kadar su ile (katı oranının yaklaşık %30-35'i kadar) çimento-kül karışımı kuru malzeme karıştırılır (Şekil 1.21). Mikserler vasıtasıyla hazırlanan malzeme istenen uygun kıvama getirildikten sonra hidrolik güç ünitesi yardımıyla borular ile dolgu kalıbına nakledilir (Şekil 1.22).

Sistemin çok hareketli oluşundan dolayı, dolgu malzemesinin erken dayanıma ulaşması istenmektedir. Bunu sağlamak için dolgu malzemesine kalıba alınmadan hemen önce katkı (priz hızlandırıcı) ilave edilmektedir (Şekil 1.22). Bu tür katkılar püskürtme şeklinde alınan dolgunun erken sertleşmesini sağlamak için kullanılmaktadır. Kullanılan katkı cam suyu (sodyum silikat) olarak ifade edilen katkı olup, suyla oluşturduğu pelte ile püskürtme betonun bağlayıcı özelliğini ve adezyonunu artırmaktadır. Priz hızlandırıcıların getirdiği avantajlarına karşın, uzun dönemli dayanımlarda belirli düşüslere (özellikle sodyum silikatlar ve alüminatlar) neden olmaktadır. Bu sebepten dolayı priz hızlandırıcıların dozajı çok önemlidir ve mümkün olduğunca minimum tutulmalıdır.

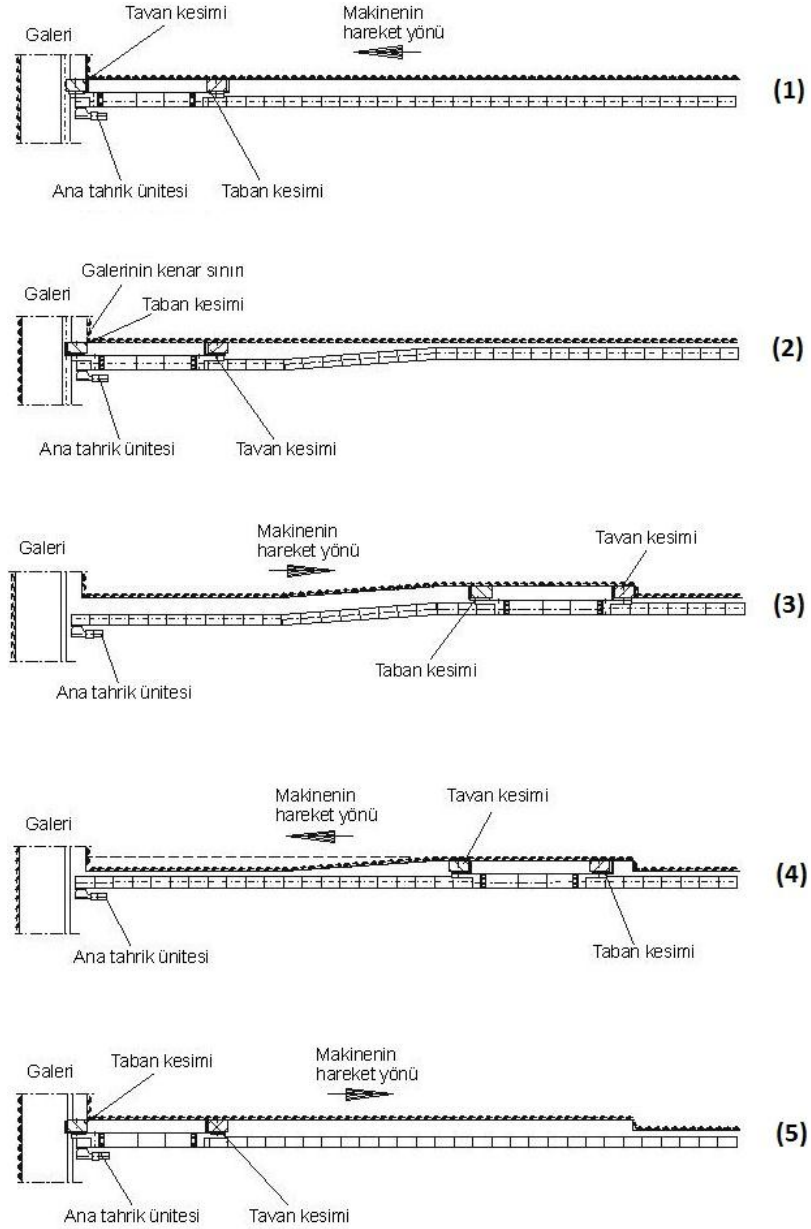


Şekil 1.21. Yeraltı dolgu istasyonu karışım tesisi



Şekil 1.22. Ayakbaşı kalıbına dolgu yapılışı

Dolgu Açıklığının Oluşması; Mekanize işletmede dolgu açıklığının oluşması kesici-yükleyici makinenin kömürü kazmasıyla beraber başlamaktadır. Ayakbaşının kesici-yükleyici makine tarafından kesimi ve makinenin yeni have kesimine hazırlanması safhaları Şekil 1.23'de görülmektedir.



Şekil 1.23. Mekanize ayaklarda kesici-yükleyici ile arın kesim yöntemi

5 hareket ile gösterilen bir kesim safhasından sonra ayakbaşında dolgu açıklığı oluşmaktadır.

(1) Kuyruktan gelen makine galerinin içine kadar kesimini gerçekleştirir.

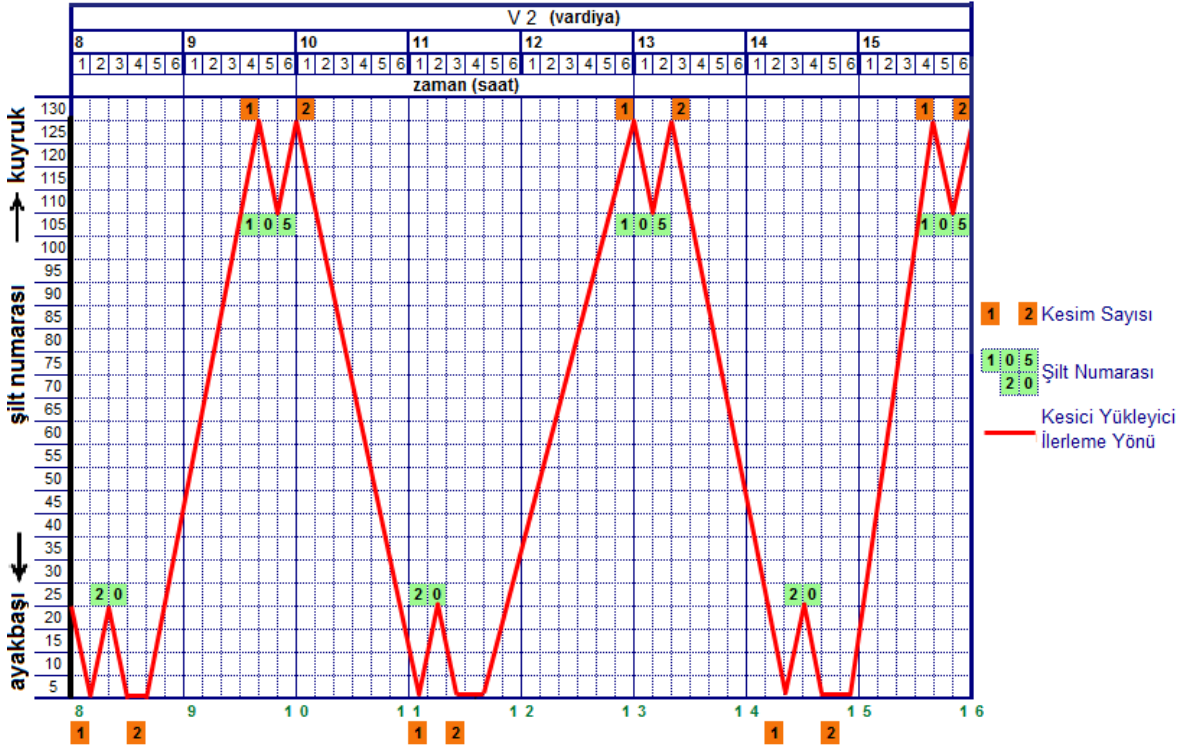
(2) Daha sonra öndeki tambur kaldırılır arkadaki tambur indirilir. Ayak içi zincirli konveyör kuyruktan ayakbaşına 30 m mesafeye kadar olan kısımda arına doğru itilir ve ayak tahkimat üniteleri de galeri kenar noktasına yaklaşık 20 m mesafeye kadar itilir.

- (3) Sonrasında makine ayak ortasına bir makine boyu üretim yapacak kadar hızlı bir biçimde getirilir.
- (4) Daha sonra makinenin öndeki kesici tamburu kaldırılır, arkadaki tambur indirilir, galeriye yakın olan ve geride kalan konveyör itilir, tahkimat itilir ve galeri tarafına doğru kesim yapılır.
- (5) Öndeki kesici tambur kaldırılır, arkadaki tambur indirilir ve kuyruk bölgesine kadar hızlı bir şekilde ilerleme yapılarak kesim gerçekleştirilir. Kuyruğa gidildikten sonra (2)'den (4)'e kadar işlemler tekrar gerçekleştirilir.

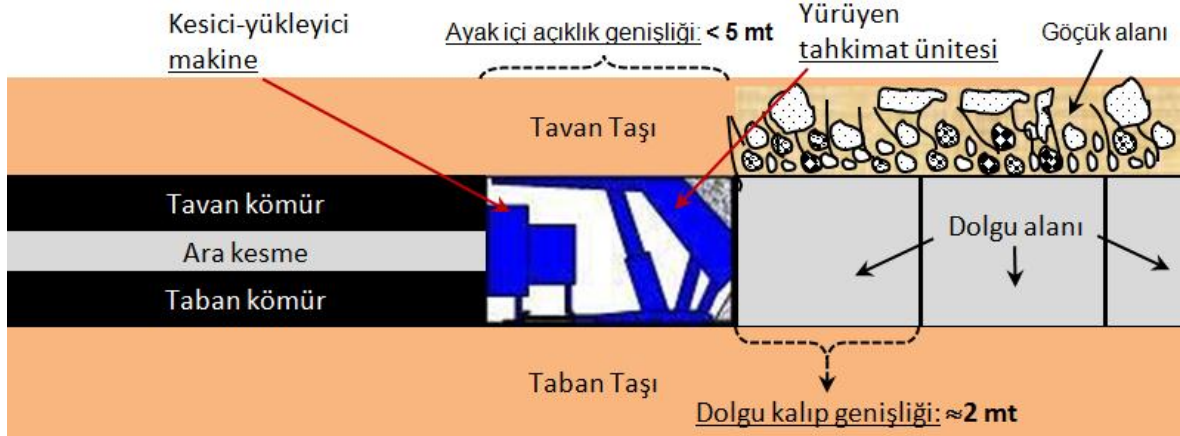
Sırasıyla yapılan işlemler bir havelik kömür kesme işlemini ifade etmektedir. Kesici makinenin kesme derinliği 0,9 m civarındadır. Ancak Çavuşoğlu vd. (2009) yaptıkları çalışmalarında işletmenin ortalama kesme derinliğinin  $\approx 0,75$  m civarında olduğunu belirtmişlerdir. Dolgu kalıbının uzunluğu 2 m olduğundan her 2 veya 3 kesim sonrasında bir kalıp boyutunda dolgu alanı oluşacaktır. Yeraltı gözlem ve deneyimlerine dayanarak bazen 4 veya 5 kesim sonrasında dolgu alanı oluştuğu da bilinmektedir (Çavuşoğlu, 2007).

Üretim-Dolgu Priz Süresi İlişkisi; Şekil 1.24'te Çayırhan Yeraltı Mekanize ayaktaki örnek bir üretim çizelgesi görülmektedir. Kesici yükleyici makinenin 1 vardiyada yapmış olduğu kesme ve bekleme hareketlerinin tamamı çizelgede görülmektedir. Örnek üretim çizelgesinde vardiyada yaklaşık 5 kesim yapılmıştır. Kesici makine ayakbaşıda 2 kesim yaptıktan sonra kuyruğa doğru hareket etmektedir. Bu sırada ayakbaşıda  $\approx 2$  m'lik dolgu açıklığı oluşmuştur.

Kesici makine ayakbaşını 2 defa kestikten sonra ayak içindeki açıklık yaklaşık 5 m'lik bir mesafeye yaklaşmış olur (Şekil 1.25). Bu mesafe fazla açılmadan dolgu açıklığının doldurulması gerekmektedir. Mesafenin açılması kesici makinenin tekrar ayakbaşını kesmesiyle mümkün olacaktır. Kesici makinenin kuyruktan tekrar ayakbaşına gelmesi yaklaşık 3 saatlik bir zaman dilimi içerisinde gerçekleşmektedir. Dolgu kalıbının hazırlanması, dolgu ekibinin karışım malzemesini hazırlaması gibi bir takım ilave işlerin yapılması bu zaman dilimini biraz daha kısaltmaktadır. Bu ilave işlerin yeraltı deneyimlerinden 30 dk yapılacağı öngörülmektedir. Bu nedenle dolgu kalıbının yaklaşık olarak 2-2,5 saat içerisinde doldurulması zorunlu hale gelmiştir.



Şekil 1.24. Çayırhan yeraltı mekanize ayaklarda kesici-yükleyici makine üretim çizelgesi



Şekil 1.25. Mekanize ayakta dolgu açıklığı

Dolgu kalıbının bu sınırlı zaman diliminde dolması için belirli mesafeden gelen malzemenin hem akıcı olması hem de kalıba doldurulduktan sonra kısa sürede katı hale geçmesi gerekmektedir. Karışımın akıcı olmasını sağlamak için karışımdaki çimentonun yaklaşık 1,1-1,2 katı (kontrol merkezi verileri) kadar su ilavesi yapılmaktadır. Bu durum dolgu dayanımı açısından olumsuzluk teşkil etmektedir. Karışımın katı hale geçmesi için ise püskürtme esnasında hem basınçlı hava hem de priz hızlandırıcı katkı ilave

edilmektedir. Karışıma püskürtme esnasında yapılan bu ilaveler, dolgu karışımının kalıp içerisinde katı hale geçmesini ve ayakta durmasını sağlamaktadır. Ancak bu iki ilave de dolgu dayanım ve dürabilitesi açısından olumsuzluk teşkil etmektedir.

### **1.5.6. Uçucu Kül-Çimento Karışımları**

Dayanım, işlenebilirlik, hidrasyon ısı gelişimi ve büzülme gibi betonun birçok özelliğini iyileştirmede faydalı olduğu için uçucu küller beton içerisinde yaygın bir biçimde kullanılmaktadır. Bunun yanında çimento üretiminde katkı maddesi olarakta kullanılmaktadırlar ve bu şekilde oluşturulan çimentolara katkılı çimento denmektedir. Her iki şekilde kullanımına yönelik pek çok araştırma yapılmıştır (Poon vd., 1997; Pandey ve Sharma, 2000; Yijin vd., 2004; Chindaprasit vd., 2005; Termkhajornkit vd., 2006; Chindaprasit vd., 2007). Her iki biçimde de kullanıldıklarında çimento hamurunun özelliklerini değiştirirler ve dolaylı olarak beton özelliklerini de etkilemiş olmaktadır.

Genel olarak uçucu küllerin puzolanik özelliklerinden dolayı betonun dürabilitesini geliştirdiği bilinmektedir. Uçucu kül hidrasyonu sonucu beton veya çimento hamuru içerisinde oluşan boşlukları doldurur ve bunun sonucunda betonun geçirgenliğini azaltmış olur. Ancak uçucu kül kullanımında temel sorun erken kür sürelerinde dayanım gelişimi oldukça yavaş gerçekleşmektedir. Bunun sonucu olarak beton veya çimento hamurunun özelliklerine etkisi kısa ve uzun dönemli kür sürelerinde farklı olmaktadır (Termkhajornkit vd., 2006).

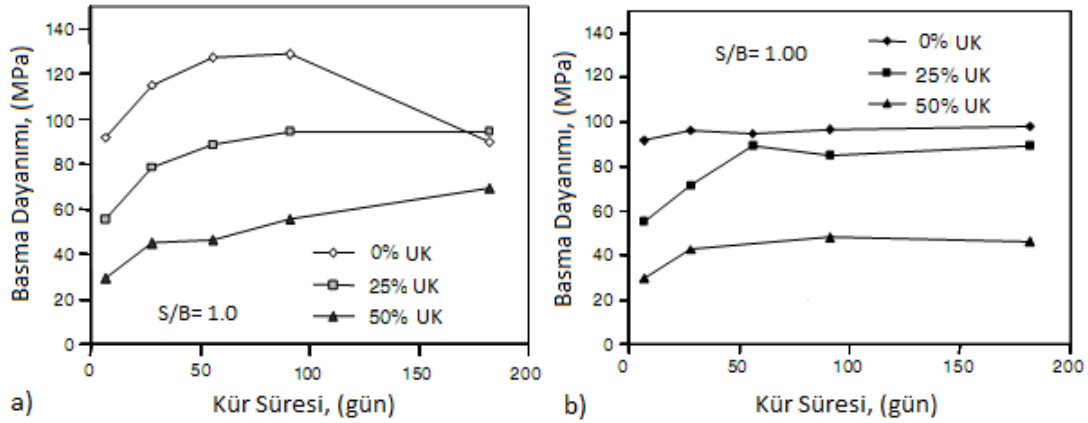
Bu kısımda uçucu küllerin çimentolu karışımlarda dayanım, priz süresi, işlenebilirlik ve mineralojik yapıya etkisi incelenmiştir.

#### **1.5.6.1. Uçucu Kül İlavesinin Dayanıma Etkisi**

Uçucu küllerin çimento hamuru içerisine ilave edildiklerinde dayanım bakımından kontrol numunesine göre erken kür sürelerinde bir düşüş yaşandığı belirtilmektedir. Ancak ilerleyen kür sürelerinde bu durum değişebilmektedir (Erdoğan, 1997; Yazıcı ve Arel, 2012). Çimentolar kendi dayanımlarını hidrasyon ürünleri sonrasında geliştirirler. Puzolanlar ise betonda çimento hidrasyonu sonrasında meydana gelen  $\text{Ca(OH)}_2$  ile reaksiyona girerler. Böylece betona su ilavesinden sonra  $\text{Ca(OH)}_2$  birikme periyodu sırasında puzolanlar çimento üzerinde bir seyreltme etkisi yaratırlar. Ayrıca  $\text{Ca(OH)}_2$

birikmesi puzolanların sistem lehine dayanım kazandırmasına neden olur. Ancak bu durum puzolanların geç reaksiyona girmesiyle uzamaktadır. Bu yüzden puzolan kullanımında erken kür sürelerinde beton içerisinde bir düşüş ilerleyen kür sürelerinde ise bir artış beklenmektedir (Koçak, 2010).

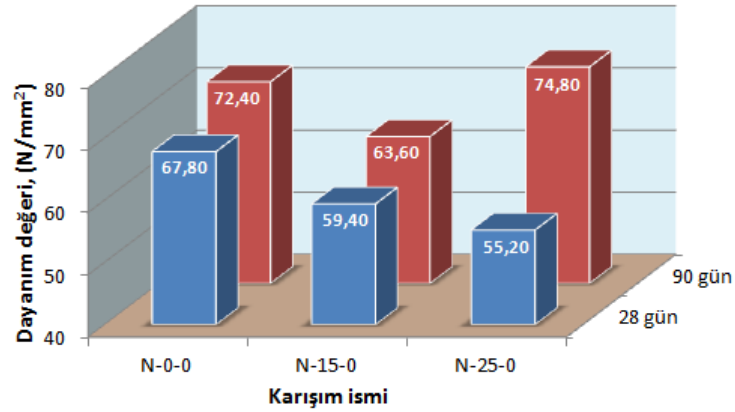
Termkhajornkit vd. (2006) çimento-uçucu kül karışımlarında uçucu külün %25 ve %50 ikame oranlarında ve farklı kür koşullarında dayanıma etkisini incelemiştir (Şekil 1.26). Çalışmalarında su içerisinde bekletilmiş ve kül ilave edilmiş numunelerin yalnız çimento ile oluşturulan numune dayanımından düşük olduğunu belirtmişlerdir. Kül ilave oranının artmasıyla dayanımın düştüğünü çalışmalarında ortaya koymuşlardır (Şekil 1.26a). Ancak ilk 7 gün suda kürlenmiş numune dayanımlarında durum biraz farklılık arz etmiştir. Uçucu kül ilave edilen ve edilmeyen numunelerin ilerleyen kür süresi boyunca dayanımlarında sürekli bir artış söz konusu olmadığını belirtmişlerdir (Şekil 1.26b).



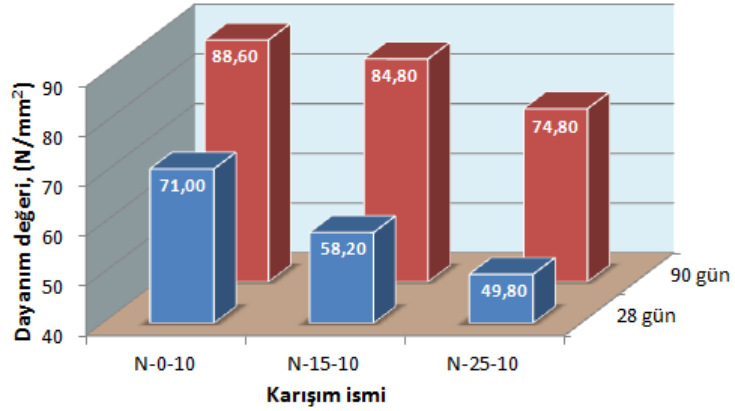
Şekil 1.26. Uçucu kül-çimento hamurunun dayanımına uçucu kül ilave oranının etkisi; suda kür edilmiş numuneler (a), ilk 7 gün suda sonra hava koşullarında kür edilmiş numuneler (b) (Termkhajornkit vd., 2006)

Yine benzer bir çalışma Poon vd. (1997) tarafından gerçekleştirilmiştir. Çalışmalarında çimento hamuru içerisinde iki farklı kül ilave biçimi denemişlerdir; birincisi çimento yerine kütlece eşit olacak biçimde %15 ve %25 kül ilavesi (Şekil 1.27), ikincisi ise çimento üzerinde %10'u fazla olacak biçimde %25 ve %35 ilave oranları kullanarak dayanıma etkilerini incelemiştir (Şekil 1.28). Her iki ilave oranıyla oluşturdukları uçucu kül-çimento hamuru numunelerini 27 °C'de suda küre tabi tutmuştur. Yaptıkları çalışmalarında çimento yerine kütlece her iki biçimde kül ilave ettikleri karışımların bütün kür sürelerinde dayanımlarının kül ilave edilmeyen numuneye göre

daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Yalnızca %25 çimento yerine kül ilaveli karışımın 90 günlük kür süresinde kontrol numunesinden fazla dayanım verdiğini belirtmişlerdir. Ekstra kül ilavesinin çimento hamuru dayanımı üzerinde herhangi bir arttırıcı etkisinin olmadığını belirtmişlerdir.



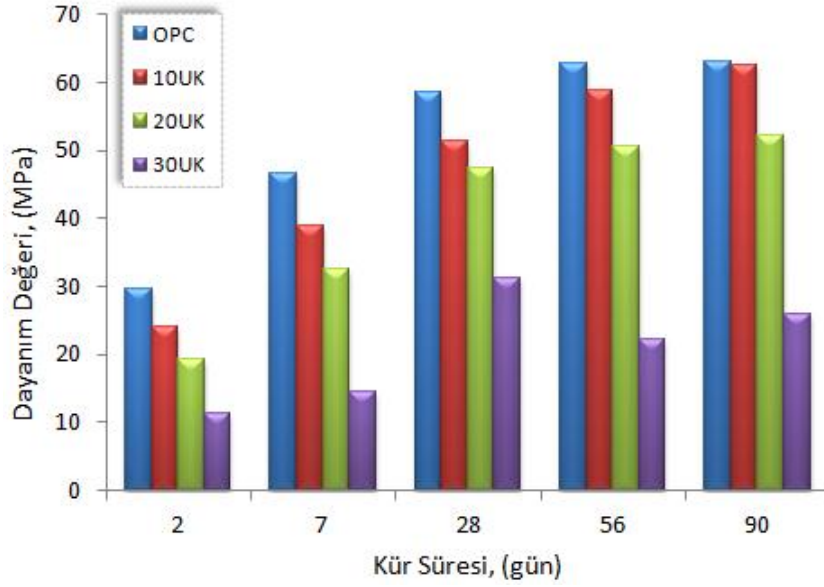
Şekil 1.27. Çimento yerine kütlece aynı oranda uçucu kül ilavesinin çimento hamuru dayanımına etkisi (Poon vd., 1997).



Şekil 1.28. Çimento üzerine kütlece ekstra uçucu kül ilavesinin çimento hamuru dayanımına etkisi (Poon vd., 1997).

Koçak (2010) çalışmasında çimento hamuru içerisinde uçucu kül ikamesini %10, %20 ve %30 oranında deneyerek 2, 7, 28, 56 ve 90 günlük kür sürelerinde dayanıma olan etkisini incelemiştir (Şekil 1.29). Çalışmasında bütün kür sürelerinde uçucu kül ilaveli karışımların dayanım değerlerinin kontrol numunesinden daha düşük değerde olduğunu belirtmiştir. Bunun nedenini çimento karışımlarında kullandığı uçucu külün hidratasyon

sonucu oluşan  $C_3S$  ve  $C_3A$  minerallerinde bir düşüşe ve CH formasyonunda bir azalmaya sebebiyet vermesiyle ilişkilendirmiştir.



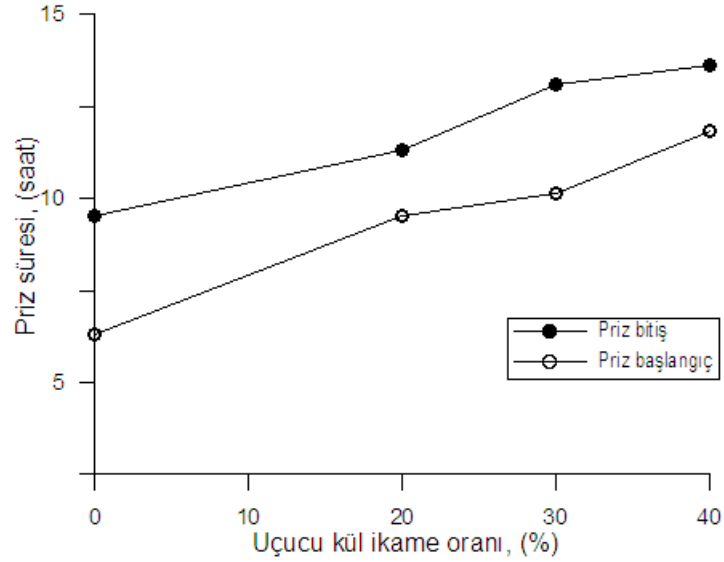
Şekil 1.29. Uçucu kül ikameli çimento karışımlarının dayanım değişimleri (Koçak, 2010).

### 1.5.6.2. Uçucu Kül İlavesinin Priz Süresine Etkisi

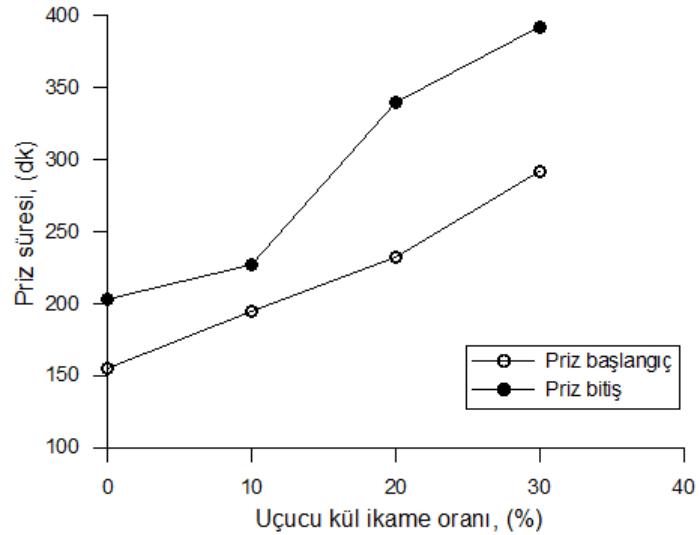
Beton ve çimento hamurunun priz süresi pek çok faktör tarafından etkilenmektedir. Ancak en büyük oranda çimentonun kimyasal yapısı ve beton ısısı tarafından etkilenmektedir. Çimento hamurunda ve beton içerisinde çimento yerine uçucu kül ilavesi ise priz süresinin uzamasına etki etmektedir. Oda sıcaklığında %10 oranında uçucu kül ilavesi priz sürelerini 5 ila 20 dk arasında uzattığı bilinmektedir. Uçucu kül ilavesinin yüksek sıcaklıklarda priz süresine olan etkisi daha az olmakta ancak düşük sıcaklıklarda geciktirici etkisi büyük orandadır. Yüksek kalsiyum oksit içeriğine sahip küllerin ise priz sürelerini uzatma etkisi ise daha az seviyededir (URL 12).

Yijin vd. (2004) çok ince öğütülmüş uçucu külü çimento hamuru içerisinde %20, %30 ve %40 oranlarında çimento yerine ikame olarak kullanmışlardır (Şekil 1.30). Yaptıkları çalışmalarında uçucu kül ilavesiyle priz başlangıç ve bitiş sürelerinin uzadığını tespit etmişlerdir. Uçucu külün öğütmeye yüzey alanının arttığı ve buna bağlı olarak kalsiyum iyonlarının adsorbe miktarının da arttığını belirtmişlerdir. Bu durumun erken

hidratasyon sürelerinde kalsiyum iyon konsantrasyonlarının taze hamur içerisinde yapılanmasına engel olduğunu ve priz sürelerinin uzadığını belirtmişlerdir. Ayrıca bu durumun hidratasyon ısısını düşürdüğünü de vurgulamışlardır.



Şekil 1.30. Öğütülmüş uçucu kül ikame oranının çimento hamuru priz sürelerine etkisi (Yijin vd., 2004).



Şekil 1.31. Çimento hamurunda çimento yerine uçucu kül ikamesinin priz sürelerine etkisi (Koçak, 2010).

Koçak (2010) çalışmasında çimento hamuru içerisinde %10, %20 ve %30 oranında uçucu külü ikame olarak kullanarak priz sürelerine etkisini incelemiştir (Şekil 1.31).

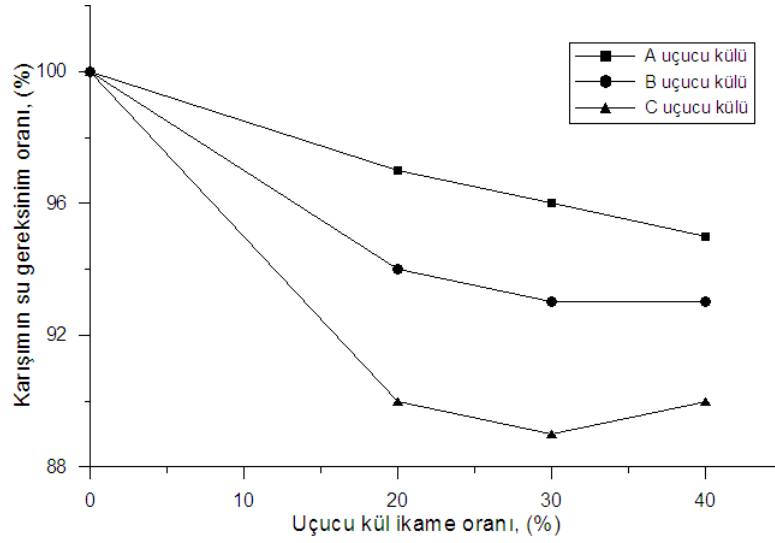
Yaptığı çalışmasında uçucu kül ikamesinin priz sürelerinde bir uzamaya neden olduğunu belirtmiştir. Priz sürelerinde değişim ise priz başlangıç süresinde %10, %20 ve %30 ilave oranlarında sırasıyla %26, %49 ve %88'lik bir uzama meydana getirdiğini tespit etmiştir. Priz bitiş sürelerinde ise sırasıyla %11, %67 ve %93 şeklinde uzamaya neden olduğunu belirtmiştir. Bu durumun uçucu küllerin hidrasyonunun yavaş gerçekleşmesi ve bunun sonucunda da hidrasyon ısısının düşmesi ile oluştuğunu belirtmiştir.

### 1.5.6.3. Uçucu Kül İlavesinin İşlenebilirliğe Etkisi

Uçucu küller çimento hamurunun işlenebilirliğini iyileştirdikleri bilinmektedir. Bunun nedenini pek çok araştırmacı aşağıdaki şekillerde açıklamıştır (Lee vd., 2003);

- Uçucu kül yoğunluğu çimentoya kıyasla daha küçüktür. Bu nedenle çimento yerine uçucu kül ilavesi kütlece yapıldığında karışımın hacmi artar.
- Uçucu kül çimento taneciklerinin bloklar halinde şekillenmesini önler.
- Uçucu küller çimento hidrasyonunu geciktirir.
- Uçucu küller küresel yapıda olduklarından çimento hamuru içerisinde bilye etkisi yaratmaktadırlar.

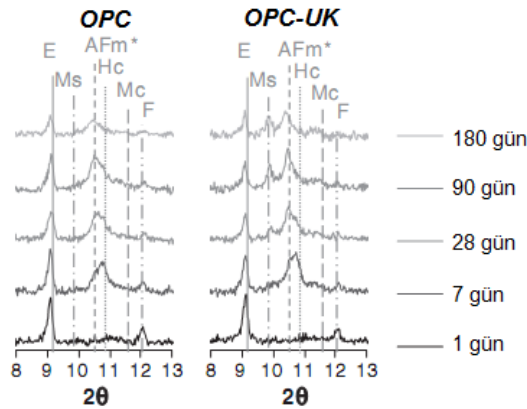
Yijin vd. (2004) çalışmalarında farklı inceliğe sahip 3 farklı külü çimento hamuru içerisinde %20, %30 ve %40 oranlarında çimento yerine ikame olarak kullanmış ve çimento hamurunun akıcılığına etkisini incelemişlerdir. Çalışmasında kullandığı külleri A, B ve C şeklinde isimlendirmiş ve sırasıyla blaine incelik değerlerini 370 m<sup>2</sup>/kg, 761 m<sup>2</sup>/kg ve 819 m<sup>2</sup>/kg olarak belirtmiştir (Şekil 1.32). Yaptığı çalışmada bütün karışımların akıcılığını sabit almıştır. Çalışmasında uçucu kül ilave edilen bütün karışım numunelerinin kontrol numunesinden daha az su gereksinimleri olduğunu belirtmiştir. Eşit ikame oranında ise blaine inceliği en yüksek olan C isimli külün diğer küllere göre su gereksinimi daha düşük seviyede gerçekleştiğini belirtmiştir. Uçucu küllerin küresel yapıya sahip olmalarının taze hamur içerisinde içsel sürtünmeyi azalttığı daha iyi kayganlaştırıcı bir etki ettiğini belirtmiştir. Ayrıca küllerin yüzeylerinde boşluklu yapıya sahip olmaları onların daha fazla su ihtiyacı oluşturmasına yol açtığını belirtmiştir.



Şekil 1.32. Uçucu kül ikamesinin çimento hamuru içerisinde su gereksinimine etkisi (Yijin vd., 2004).

#### 1.5.6.4. Uçucu Kül İlavesinin Mineralojik Yapıya Etkisi

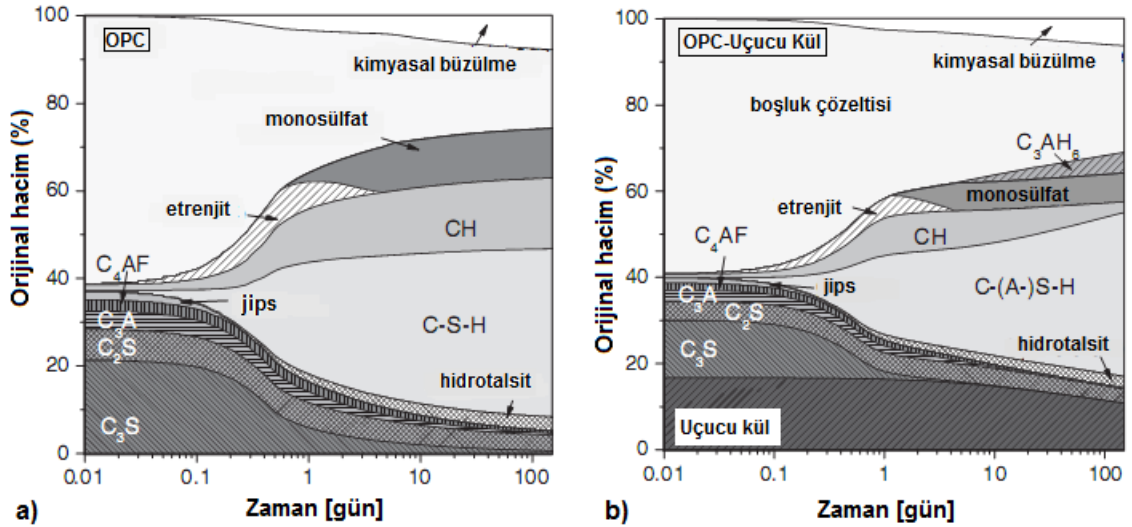
Uçucu küller çimentolu karışımlar içerisinde ilave olarak kullanıldıklarında başlangıçta çimentodan daha geç reaksiyona girerler. Yani başlangıçta ilave madde gibi davranarak herhangi bir reaksiyon gerçekleştirmemektedir. Ancak uçucu küller zamanla reaksiyona girerek bünyesindeki silikatlar ve alüminatları hidrasyon sistemine dahil etmektedir. Silikatlar portlandit (CH) ile reaksiyona girip C-S-H jellerini şekillendirirken, alüminatlar ise C-S-H ile reaksiyona girererek C-(A)-S-H oluşumuna neden olmaktadır (Bumrongjaroen ve Livingstone, 2009; Weerdt vd., 2011).



Şekil 1.33. Çimento ve çimento-uçucu kül hamurunun farklı kür zamanlarında XRD profili (Weerdt vd., 2011).

Weerd vd. (2011) çalışmasında uçucu küllü çimentolu karışımların çeşitli kür sürelerinde mineralojik yapısındaki değişimlerini XRD analizi ile belirlemiştir (Şekil 1.33). Yaptığı çalışmasında AFm fazının uçucu küllü karışımlarda daha fazla bulunduğu ve bu durumun uçucu külün reaksiyonu sonrasında sisteme alümina ilavesi ve çimento hidratasyonunda alümina fazın hidratasyonunu hızlandırması sonucu olduğunu belirtmiştir. Diğer belirgin piklerin ise ettringite (E), monosülfat (Ms), hemikarbonat (Hc), monokarbonat (Mc) and ferrit (F) olduğunu vurgulamıştır.

Şekil 1.34'te çimento ve çimento-uçucu küllü karışımların zamana bağlı olarak mineralojik yapılarında olan değişim gösterilmektedir. Weerd vd. (2011) çalışmalarında çimento-uçucu küllü karışımların uzun dönemli kür süresi sonunda bünyelerinde yüksek miktarda Al modifiyeli C-S-H jelleri ile birlikte az miktarda tri-kalsiyum alümino hidrat, monosülfat, portlandit, hidrotalsit, hidrate olmamış çimento tanecikleri ve reaksiyona girmemiş uçucu kül tanecik fazlarını içerdiği ortaya koymuşlardır.



Şekil 1.34. Çimento (a) ve çimentolu-uçucu küllü karışımların (b) zamana bağlı olarak içerdiği farklı fazların hacimsel görünümü (Weerd vd., 2011).

## 1.6. Dolgularda Kimyasal Katkı Kullanımı

İnşaat endüstrisinde yaygın kullanılan kimyasal katkı maddeleri su, çimento, agrega ve fiber donatı dışında beton karışımında yer alan ve malzemelerin karılma işleminden hemen önce veya karılma işlemi sırasında karışıma dahil edilen maddeler olarak tanımlanmaktadır (Ramachandran ve Malhotra, 1995; Erdoğan, 1997; Erdoğan ve

Erdoğan, 2007). Kimyasal katkılar özellikle son yıllarda beton teknolojisinde betonun temel bileşenlerinden birisi haline gelmiştir. Farklı yapıya sahip çeşitli kimyasal katkılar inşaat endüstrisindeki ihtiyaçları karşılamak üzere kullanıcıların hizmetine sunulmaktadır. En yaygın kullanılan kimyasal katkılar ise betonun işlenebilirliğini önemli derecede artırma özelliğine sahip, akışkanlaştırıcı tip kimyasal katkılardır (Erdoğan, 2000).

Betonun farklı özelliklerini, istenilen yönde iyileştirmek için kullanılan çeşitli biçimlerde katkı maddeleri bulunmaktadır. Bu katkı maddeleri Amerikan standartlarında gruplar halinde şu şekilde tanımlanmıştır; kimyasal katkı maddeleri, hava sürükleyici katkı maddeleri, mineral katkı maddeleri ve diğer (ASTM C 494; ASTM C 260). Kimyasal katkı maddeleri işlev bakımından 4 gruba ayrılmaktadırlar;

- Normal veya yüksek miktarda su azaltmak,
- Priz geciktirmek,
- Priz hızlandırmak,
- Hava sürüklemek.

Amerikan standartına göre (ASTM C 494) 7 farklı tipte kimyasal katkı tipi mevcuttur ve bu katkı tipleri Tablo 1.10'da gösterilmiştir.

Tablo 1.10. Kimyasal katkı tipleri

<b>KATKI TİPİ</b>	<b>KATKI ADI</b>
<b>A TİPİ</b>	AKIŞKANLAŞTIRICI
<b>B TİPİ</b>	PRİZ GECİKTİRİCİ
<b>C TİPİ</b>	PRİZ HIZLANDIRICI
<b>D TİPİ</b>	AKIŞKANLAŞTIRICI VE PRİZ GECİKTİRİCİ
<b>E TİPİ</b>	AKIŞKANLAŞTIRICI VE PRİZ HIZLANDIRICI
<b>F TİPİ</b>	YÜKSEK ORANDA AKIŞKANLAŞTIRICI
<b>G TİPİ</b>	YÜKSEK ORANDA AKIŞKANLAŞTIRICI VE PRİZ GECİKTİRİCİ

Beton bileşenlerinden olan agregalar beton hacminin önemli bir bölümünü (%70-75) oluşturmalarına rağmen sistemin temel yapıtaşını çimento hamuru oluşturmaktadır. Betonun performansı büyük oranda çimento hamuru tarafından belirlenmektedir. Kimyasal katkıların betonun priz süresi, hava içeriği, su ihtiyacı ve işlenebilmesine olan etkileri aslında çimento hamuruyla olan etkileşimiyle belirginleşmektedir (Ramyar vd., 2008).

Özellikle su azaltıcı kimyasal katkıların ilavesi sonrasında betonun basınç dayanımı ve dürabilitesi (dayanıklılığı) artar, su geçirimsizliği azalmaktadır.

Beton endüstrisinin aksine madencilik endüstrisinde dolgu karışımlarında kimyasal katkı kullanımı oldukça düşük seviyelerdedir. Aslında kimyasal katkıların dolgu içerisindeki etkileri beton karışımlarında ki etkisi ile benzerlik göstermektedir. Fakat yine de kimyasal katkıların bu sektörde kullanımı düşük seviyelerde kalmıştır. Bunun birkaç sebebi vardır. Bunlar (Farzam, vd., 1998);

- İlave yüksek maliyet algısı,
- Uygun kullanımları hakkında yetersiz bilgi,
- Faydaları ve özellikleri hakkında yetersiz bilgi şeklinde sıralanabilir.

Madencilikte yeraltı dolgularında genel olarak iki farklı kimyasal katkı tipi kullanıldığını görmekteyiz. Birçok çalışmaya da konu olan bu katkı türleri akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı katkı türleridir. Huynh vd. (2006), Klein ve Simon (2006), Hassani vd. (2007), Çavuşoğlu (2008), Erçikdi (2009), Erçikdi vd. (2010) ve Hassani vd. (2011) gibi araştırmacılar dolgu içerisinde kimyasal katkı kullanımıyla ilgili çalışmalar yapmışlardır.

### **1.6.1. Akışkanlaştırıcı Kullanımı**

Günümüzde kimyasal katkıları beton karışımlarının temel bileşenlerinden birisi haline gelmiştir. Yeni geliştirilen katkıları işlenebilirliği değiştirmeden düşük su/çimento oranlarında beton karışımını sağlamaktadır. Akışkanlaştırıcı tip olan bu katkıları beton içerisinde dispersiyon etkisi sağlayarak çimento su karışımında aglomerasyon sonucu hapsolmuş suyu açığa çıkarmaktadır. Böylece karışımın akış karakteristiğini düzenlemiş olmaktadır (Farzam vd., 1998).

Akışkanlaştırıcılar, kimyasal katkıları içerisinde uygulamada en çok kullanılan ve en çok bilinen katkı grubunu oluştururlar. Genellikle su azaltıcı kimyasal katkıları olarak bilinirler. Normal akışkanlaştırıcılar, süperakışkanlaştırıcılar ve hiperakışkanlaştırıcılar olmak üzere üç gruba ayrılır.

Normal akışkanlaştırıcıların kimyasal içerik bakımından çeşitli tipleri mevcuttur. Su azaltıcı katkıları organik ve suda çözünebilirler ve kimyasal formülleri lignosulfatlar, hidroksikarboksilik asit ve karbohidratlar gibi ham maddelere dayanır (Coolepardi, 1995). Normal dozda (yani, çimento ağırlığının %5'ini geçmeyecek kadar) kullanıldıklarında, hedeflenen kıvamdaki bir beton için gereken karışım suyu miktarında

%5-%12 kadar azalmaya neden olan katkılara “normal miktarda su azaltıcı katkılar” veya kısaca “su azaltıcı katkılar” denilmektedir (Coolepari, 1995; Erdoğan ve Erdoğan, 2007).

Son yıllarda yüksek performanslı betonlar genelde süperakışkanlaştırıcı denilen katkılar kullanılarak üretilmektedir. Süperakışkanlaştırıcılar yüksek oranda su indirgeyiciler olarak da bilinmektedirler (Yazıcı, 2003). Süperakışkanlaştırıcı katkılar, kimyasal kökenlerine bağlı olarak dört ana sınıfa ayrılır (Chandra ve Björnström, 2002; Ramyar vd., 2008):

- Polinaftalin sülfonatlar (sülfone edilmiş naftalin formaldehit -SNF)
- Polimelamin sülfonatlar (sülfone edilmiş melamin formaldehit -SMF)
- Lignosülfonatlar (LS) (modifiye lignin-MLS)
- Poliakrilat (CE) ve polikarboksilatlar (PC).

Hiperakışkanlaştırıcılar ise yüksek dayanımlı beton üretiminde kullanılmaktadırlar. Modifiye polikarboksilat (MPC) tipinde kimyasal katkılardır (Sika, 2008).

Pratik olarak çimento partikülleri birbirleriyle birleşmek suretiyle küçük topaklar oluşturmaya meyillidirler. Akışkanlaştırıcılar ise bu topaklaşmanın önüne geçerek çimentonun dağılmasını sağlarlar. Bu işlemi yapış şekilleri akışkanlaştırıcının dahil olduğu gruba göre değişir. SMF tipindeki akışkanlaştırıcılar parçacıkların yüzeyinde bir film tabakası oluşturarak çimento parçacıklarının topaklaşmasını engellerken, MLS tipindeki akışkanlaştırıcılar suyun çekim gücünü azaltırlar, SNF tipi akışkanlaştırıcılar ise partikülleri negatif elektrik iyonları ile yükleyerek ayrık kalmalarını sağlar. Akışkanlaştırıcıların çimento partiküllerinin ayrık kalmasını sağlaması ile çimento partikülleri agreganın etrafını daha iyi kaplar ve aynı zamanda iyi bir akıcılık elde edilir. Bu da işlenebilirliği artırır ve daha dayanıklı beton elde etmek demektir. Diğer bir deyişle su/çimento oranında bir değişikliğe gitmeden akışkanlaştırıcıların kullanılması betonun mukavemetini artırır (Gül ve Aydın, 2008). Akışkanlaştırıcıların betonda kullanımının 3 amacı vardır (Rixom ve Mailvaganam, 1999);

- Katkısız betonla aynı işlenebilmede olmak koşuluyla su/çimento oranını azaltarak daha yüksek mukavemet kazanmak,
- Kütle betonlarda hidratasyon ısısını düşürmek için çimento miktarının azaltılması durumunda aynı işlenebilirliği kazanmak,
- Kolay yerleşmeyi sağlamak için işlenebilmeyi artırmak.

Beton üzerindeki performans artırıcı özelliklerinden dolayı inşaat endüstrisinde oldukça yoğun kullanılan kimyasal katkıların madencilik alanında hemen hiç kullanılmaması oldukça şaşırtıcı olmuştur. Huynh vd. (2006), Klein ve Simon (2006) ve Erçikdi vd. (2010) yaptıkları çalışmalarda kimyasal katkıların macun dolgu performansına olan etkilerini incelemişlerdir. Yapılan bu çalışmalarda dolguların ekonomik olarak yeraltı boşluklarına transferinin kimyasal katkı kullanımıyla daha düşük su/çimento oranlarında mümkün hale gelebileceğini belirtmişlerdir. Aynı zamanda akışkanlaştırıcı katkıların macun dolgunun mekanik özelliklerini iyileştirdiğini belirtmişlerdir.

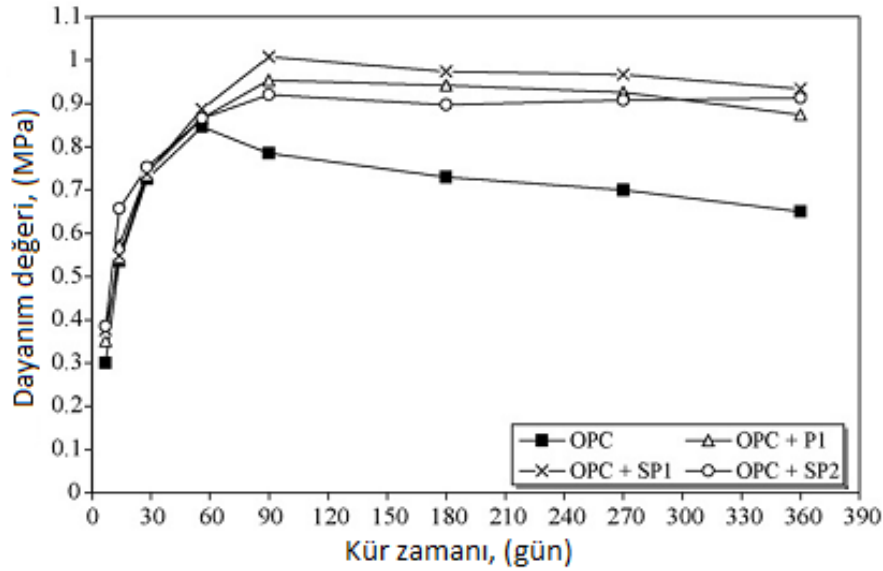
### **1.6.1.1. Dayanıma Etkisi**

Akışkanlaştırıcılar genellikle beton içerisinde akıcılığı sağlamak için kullanılan su miktarını aynı işlenebilirlikte daha az kullanarak bir karışım sağlamaktadırlar. Bu özelliklerinden dolayı su azaltması ile betonun dayanım miktarında da bir artış sağlamaktadırlar. Madencilikte uygulanan dolgularda, malzemeler genellikle yerüstü tesislerinden yeraltındaki boşluklara oldukça uzun mesafelerde nakledildiklerinden dolayı transfer işlemi için karışım malzemesinin oldukça akıcı olması istenmektedir. Bundan dolayıdır ki dolgu karışımı içerisinde betondakine kıyasla (yaklaşık 3-10 kat) oldukça fazla su ilave edilmektedir. Dolayısıyla fazla suyun dolgu içerisinde oluşturduğu gözeneklilik dayanımını olumsuz yönde etkilemektedir.

Akışkanlaştırıcılar üretici firmaların tavsiye ettikleri dozajlarda beton içerisine eklendiğinde 28 günlük dayanım değerleri referans karışımın dayanım değerleriyle karşılaştırıldığında eşit ya da daha büyüktür. Akışkanlaştırıcı katkılı karışımlarda herhangi bir vibrasyon etkisi ile sıkıştırmaya maruz kalmadan kalıp içerisine yerleştirilmektedirler (Ramachandran ve Malhotra, 1995).

Beton içerisindeki etkisine paralel olarak dolgu içerisinde de akışkanlaştırıcı katkıların etkisi incelenmiştir. Erçikdi (2009) yaptığı çalışmasında macun dolgu içerisinde 3 farklı (normal P1, süper SP1 ve hiper SP2) akışkanlaştırıcı kullanarak karışım numuneleri oluşturmuş ve dayanım ve dürabiliteye etkisini incelemiştir (Şekil 1.35). Akışkanlaştırıcı kullandığı bütün numunelerin uzun dönem dayanımlarının kullanılmayan numunelere göre yüksek çıktığını belirtmiştir. 360 günlük kür periyodunda akışkanlaştırıcılı numunelerin referans numunelere göre dayanım fazlalığının %25-50 arasında olduğunu belirlemiştir. Çalışmasında macun dolguda öngörülen 1 MPa dayanım

değerine akışkanlaştırıcı kullandığı numunelerinde ulaşmıştır. Macun dolgu içerisinde akışkanlaştırıcıların etkisinin ise özellikle 90 günlük kür periyodundan sonraki günlerde daha belirgin bir şekilde ortaya çıktığını belirtmiştir. 90 günlük kür süresi sonrasında asit etkisiyle oluşan dayanım kaybının akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerde çok düşük seviyelerde oluştuğunu ortaya koymuştur. Ayrıca akışkanlaştırıcıların S/Ç oranını azaltmasıyla numunelerin boşluk ve gözenekliliğini azalttığını ve bu durumun dolgu dayanımına olumlu etki ettiğini vurgulamıştır. Yine akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerde beton içerisinde zararlı etkiye sahip ikincil jel (jips ve etrenjit) oluşumlarına rastlamadığını belirtmiştir.

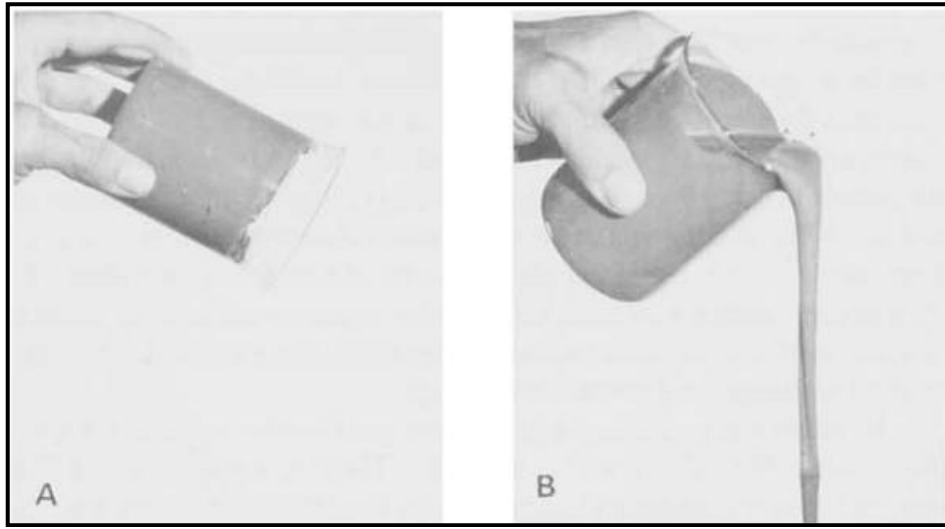


Şekil 1.35. Akışkanlaştırıcı katkıların dolgu dayanım ve dürabilitesine etkisi (Erçikdi, 2009; Erçikdi vd., 2010).

Yine akışkanlaştırıcıların dolgu içerisinde kullanımına yönelik diğer bir çalışma Klein ve Simon (2006) tarafından gerçekleştirilmiştir. Klein ve Simon (2006) yaptıkları çalışmalarında akışkanlaştırıcı katkıları macun dolgu içerisinde denemişlerdir. Akışkanlaştırıcıların dolgu içerisinde yaklaşık olarak %25'lik bir su azalması gerçekleştirdiğini belirtmişlerdir. Katkı kullanılan numunelerin kullanılmayanlara göre 360 günlük kür süresi sonucunda yaklaşık 2 kat fazla dayanım verdiğini belirtmişlerdir.

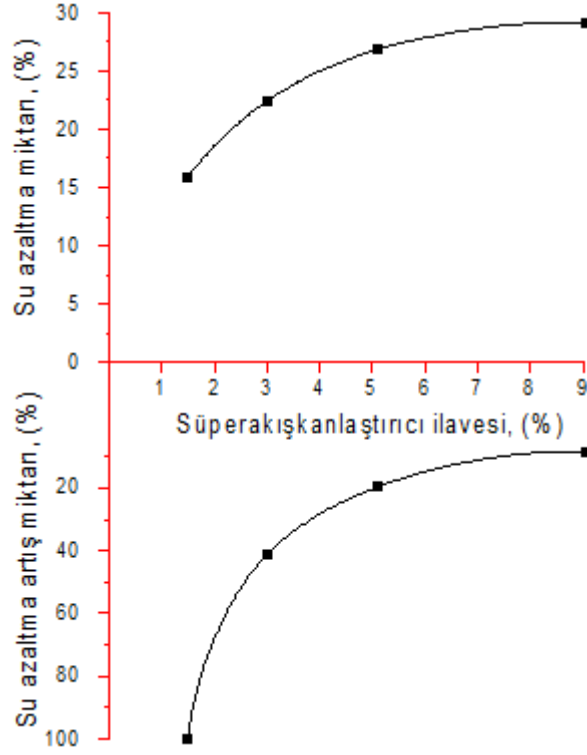
### 1.6.1.2. Reolojiye Etkisi

Akışkanlaştırıcı katkılar çimentolu karışımların kıvamını artırıcı yönde etki eder veya aynı karışımda kullanılan su miktarında yüksek oranda azalma sağlamaktadırlar. Şekil 1.36'da çimento karışımında süperakışkanlaştırıcı kullanılan ve kullanılmayan malzemenin kıvamının fiziksel bir gösterimi görülmektedir. Şekil 1.37'de ise akışkanlaştırıcı kullanımının sabit kıvamda karışım malzemesinde meydana getirdiği su azaltma miktarı ve kullanım oranına bağlı olarak su azaltma miktarındaki artış yüzdesi verilmiştir.



Şekil 1.36. Çimento hamuru üzerine süperakışkanlaştırıcı etkisi, A: Çimento+Su; B: Çimento+Su+Süperakışkanlaştırıcı (Ramachandran ve Malhotra, 1995).

Kıvam iyileştirmede su kullanıldığında su/çimento oranı artacağı için basınç dayanımı olumsuz etkilenecektir. Bundan dolayı su yerine kimyasal ve/veya mineral katkı maddeleri ile kıvam iyileştirmesi yoluna gitmek daha avantajlıdır. Ancak kıvam düzenlemesinin kimyasal katkı ile yapılması durumunda betonun reolojik özelliklerini değiştirebileceğinden kullanılan katkı maddesi miktarına da dikkat edilmelidir (Arslantürk ve Erdoğan, 2007).



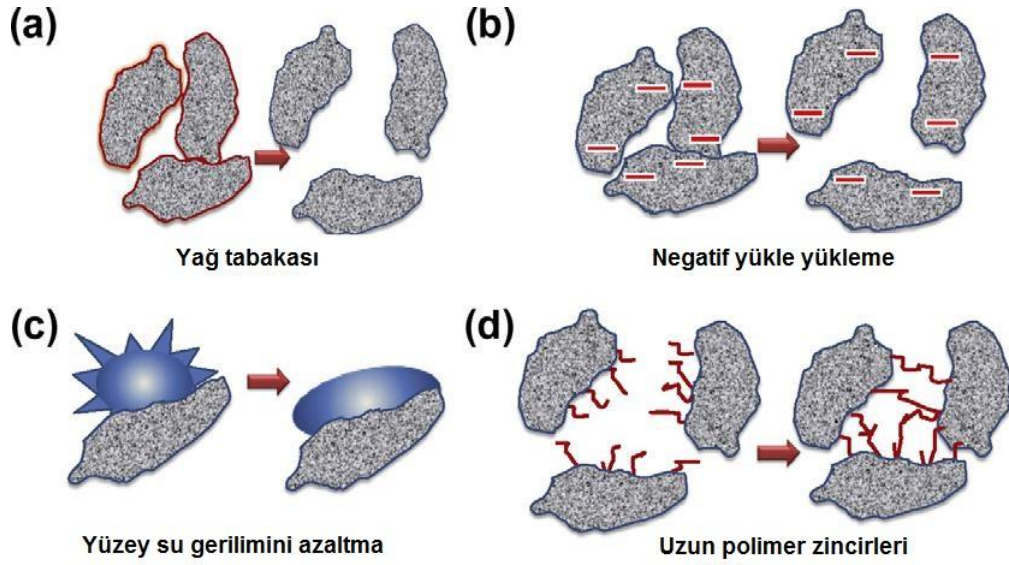
Şekil 1.37. Süperakışkanlaştırıcı ilavesiyle gözlemlenen su azaltma (Rixom ve Mailvaganam, 1999).

Akışkanlaştırıcılar betonda çimento hamuru içerisinde yoğun biçimde oluşan çimento tanecik topaklanması içerisinde dispersiyon etkisi yapar. Dispersiyon etkisinden dolayı çimento topaklanması sonrasında içerisinde hapsolmuş su açığa çıkar ve karışıma dahil olur. Böylelikle karışımının akıcılığında bir artış söz konusu olmaktadır. Dispersiyon etkisi farklı yapıya sahip katkılarda farklı biçimde görülmektedir (Collepari, 1998).

Akışkanlaştırıcıların etkisi tanecik kuvvetleriyle olan etkileşimiyle alakalıdır. Bu durum deflokülasyon (topaksızlaşma) veya dispersiyon (yayılma) olarak ifade edilir (Flat vd., 1998). Katkıların çimento hamuru veya beton karışımı içerisinde yapmış olduğu dispersiyon durumu 4 farklı biçimde gerçekleşmektedir;

- Çimento taneleri ve ince taneler üzerinde yağ katmanı oluşturarak beton karışımının içsel sürtünmesini azaltır (SMF). (Şekil 1.38a)
- Çimento taneciklerini negatif yükle yükleyip karşılıklı itme kuvveti oluşturarak dispersiyon etkisi yaratır (SNF). Akışkanlaştırıcı tipi moleküllerin dispersiyon etki gücünü belirler. Bu etki gücü değerinin artmasıyla molekülleri dispersiyona eğilimleri de artar. (Şekil 1.38b)

- Çimento ve mikro taneciklerin yüzey suyu gerginliğini düşürerek dispersiyon etkisi yaratmak (MLS). (Şekil 1.38c)
- Diğer bir dispersiyon etkisi ise sterik etkidir. Uzun zincirli polimerler çimento taneciklerinin birbirlerine yaklaşmasına fiziksel engel olarak dispersiyon etkisi yaratmaktadır (PC). Dispersiyon etkisi elektrostatik itkidenden çok, stearik (fiziksel-geometrisel) engelleme etkisi (Sağlam vd., (2007) kaynağında doldurma etkisi olarak da tanımlanmaktadır) ile açıklanmaktadır. (Şekil 1.38d)



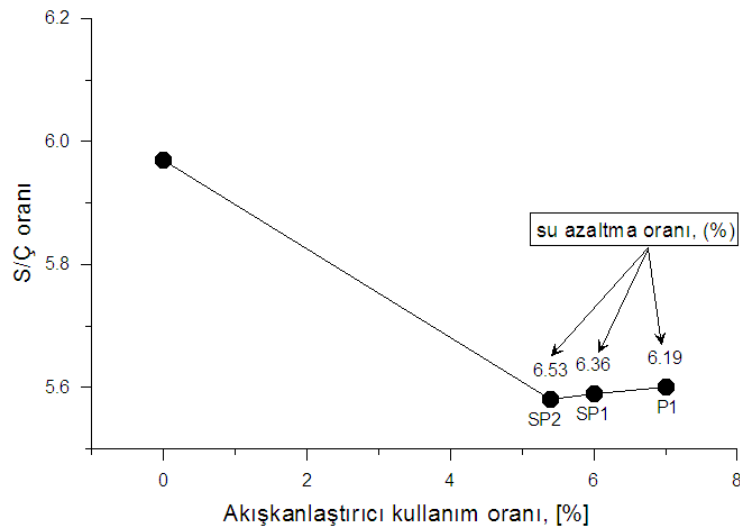
Şekil 1.38. Süperakışkanlaştırıcı etki mekanizması (Lazniewska-Piekarczyk, 2012).

Ahmad vd. (2005) yaptıkları çalışmalarında beton karışımında 3 farklı akışkanlaştırıcı kullanmışlardır. Çalışmada aynı su/çimento oranında katkıların işlenebilirliğe etkisi, sabit çökme değerinde su azaltmaya etkisi ve çimento miktarı değişmeden işlenebilirliğe etkisini incelemişlerdir. Yapılan çalışmada aynı su/çimento oranlarında süperakışkanlaştırıcı kullanılan numunelerin çökme değerlerinin kullanılmaya numunelere göre yaklaşık 3 kat arttığını tespit etmişlerdir. Aynı çökme değerinde ise süperakışkanlaştırıcıların yaklaşık %13 oranında su azalttığını tespit etmişlerdir. Su/çimento oranı değişmeden aynı çökme değerinde ise yaklaşık %8'lik bir çimento tasarrufu sağladıklarını belirtmişlerdir.

Maden dolguları içerisinde bazı çalışmalarda kimyasal katkıların su azaltma miktarıyla ilgili çalışmalar mevcuttur. Genelde dolguların uzak mesafelere nakli borular vasıtasıyla gerçekleştiğinden yüksek akıcı özellikte olması istenmektedir. Yapılan

çalışmalarda istenen bu yüksek akıcılığa istinaden sabit bir işlenebilirlik kullanılmaktadır. Bundan dolayı da daha çok akışkanlaştırıcı katkıların su azaltma miktarları incelenmektedir. Çavuşoğlu (2008) yaptığı çalışmada uçucu küllü dolgu içerisinde akışkanlaştırıcı kimyasal katkı denemiştir. Akışkanlaştırıcı katkıların referans numuneye göre yaklaşık %9-13'ü oranında su azalttığını belirtmiştir.

Erçıkdı vd. (2010) çalışmalarında aynı çökme değerine sahip macun dolgu numunelerinde üç farklı akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları denemiştir (şekil 1.39). Çalışmalarında normal akışkanlaştırıcı (P1), süperakışkanlaştırıcı (SP1) ve hiperakışkanlaştırıcı (SP2) isimli katkı tiplerini kullanmışlardır. Kullandıkları katkıların kimyasal yapılarının ise sodyum lignosülfonat (P1), naftalin sülfonat esaslı (SP1) ve polikarboksilat esaslı (SP2) olduğu şeklinde belirtmişlerdir. Çalışmalarında akışkanlaştırıcı katkıları macun dolgu içerisinde çimento miktarının %5,4'ü olacak biçimde SP2, %6,0'ı olacak biçimde SP1 ve %7,0'ı olacak biçimde P1 katkı oranlarını kullanmışlardır. Aynı kıvama sahip numunelerinde akışkanlaştırıcı katkı kullanılmayan numunenin S/Ç oranı 5,97 iken P1 katkısı kullanılan numunenin S/Ç oranının 5,60, SP1 kullanılan numunenin S/Ç oranının 5,59 ve SP2 kullanılan numunenin S/Ç oranının 5,58 olduğunu belirtmişlerdir. Kullandıkları akışkanlaştırıcıların su azaltma yüzdelerinin ise SP2'nin %6,53, SP1'in %6,36 ve P1'in %6,19 şeklinde olduğunu belirtmişlerdir. Akışkanlaştırıcı katkıların macun dolguda su azaltma miktarlarının betondaki etkinliğine göre düşük kalmasının nedenini ise kullanılan su miktarının fazla olmasıyla açıklamışlardır.



şekil 1.39. Üç farklı akışkanlaştırıcı tipinin macun dolguda S/Ç oranına etkisi (Erçıkdı, 2009; Erçıkdı vd., 2010).

Her ne kadar kimyasal katkıları betonun işlenebilirliğini düzenlese de bazen betonda zamanla kıvam kaybı yaşanmaktadır. Genellikle MFS ve NFS tipi süperakışkanlaştırıcı kullanımında betonda oluşan yüksek işlenebilirlik 30 dk da kaybolmaktadır. Bu kayıp genellikle akışkanlaştırıcı dozajına bağlı olarak gelişmektedir. Polikarboksilat tabanlı süperakışkanlaştırıcı kullanımında bu sorun pek görülmemektedir (Aiad, 2003).

Kıvam kaybı karışımın ilk safhalarında bazı hidratların oluşması ve liyofobik taneciklerin koagülasyonu sayesinde meydana gelmektedir. Bazı metotlar ile bu kaybı önlemek mümkündür. Bunlar (Aiad, 2003);

- Katkı ilavesini geciktirme,
- Katkı dozajını ayarlama,
- İlave bağlayıcı malzemeli çimento kullanmak,
- Diğer katkıları kullanmak

Beton karışımına katkıların geç ilave edilmesiyle kıvam kaybı önlenmektedir. Katkıların geç ilavesiyle su molekülleri reaktif çimento tanecikleri tarafından hızlı bir şekilde adsorbe edilir ve bu elementlerin üzerini kaplayan hidratlar daha öncesinden şekillenmiş olurlar. Bu durumda çimentonun temel bileşenlerinden  $C_3S$  ve  $C_2S$  dispersiyon için yeteri miktarda akışkanlaştırıcıya adsorbe olabilirler. Katkıların geç ilave edilme zamanları 5 ila 15 dk arasında olabilmektedir (MFS ve NFS tipi süperakışkanlaştırıcılar için) (Aiad, 2003).

### 1.6.1.3. Priz Süresine Etkisi

Betonun prizlenmesi, taze haldeyken katılaşmaya başlaması olarak tanımlanmaktadır. Betonun başlangıç priz süresi onun taze halde iken taşınması için sınırlı bir zaman dilimi olarak adlandırılır. Priz süresi sonu ise betonun mekanik dayanım gelişiminin başlangıcı olarak tanımlanmaktadır (Brooks vd., 2000).

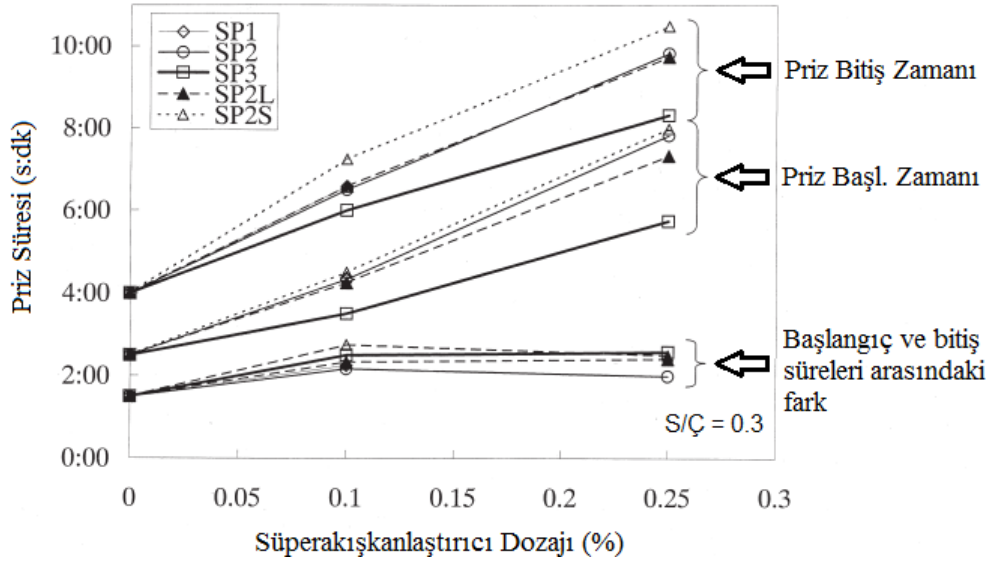
Akışkanlaştırıcıların betonun priz süresi üzerinde akışkanlaştırıcı tipi, kaynağı ve dozajı, uygulanan kür ortamı ve sıcaklığı, su/bağlayıcı oranında gerçekleştirdiği azalma miktarı ve çimento bileşimi gibi pek çok faktöre bağlı olarak bir etkiye sahiptir (Brooks vd., 2000; Ramachandran ve Malhotra, 1995; Rixom ve Mailvaganam, 1999). Akışkanlaştırıcılar yüksek işlenebilirlik kazandırdığı betonun priz başlangıç ve bitiş zamanlarında her zaman bir gecikmeye sebebiyet verirler. Bu gecikme düşükten yükseğe

doğru sırasıyla SMF, SNF ve CE şeklindedir. Normal dozajlarda kullanıldıklarında iki saat kadar bir gecikmeye sebebiyet verirler. Akışkanlaştırıcılar kontrol karışımıyla benzer çökme değeriinde oluşturulan karışımın su/çimento oranında azalma meydana getirirler ve bu karışımın priz süresi kontrol betonunki ile birbirine benzer fakat çok az bir artış söz konusu olmaktadır. Bu durumda priz süresindeki gecikme yaklaşık olarak bir saattir (Rixom ve Mailvaganam, 1999).

Akışkanlaştırıcılar çimento hidrasyonuna ve özellikle çimento bileşigi  $C_3A$ 'nın hidrasyon sırasında kimyasal sürecine geciktirici etki ettikleri bilinmektedir. Hidrasyonun gecikmesi akışkanlaştırıcıların çimento tanecikleri yüzeyine adsorbe olmasıyla ilgilidir. Bundan dolayı, mineral katkı içeren betonların (daha düşük çimento miktarı) ve yüksek süperakışkanlaştırıcı dozajına sahip karışımların priz sürelerinde büyük bir gecikme söz konusu olmaktadır. İlave olarak süperakışkanlaştırıcı katkıları çimento tanecikleri arasında dispersiyon etkisi yaratmaktadır. Bu etki prizlenmenin gecikmesine neden olmaktadır. Çimento hamurunda priz gecikmesinin iki temel nedene dayandığı bilinmektedir; parçacıklar arasındaki koagülasyon oluşumu teması ve koagülasyon yapısını daha katı yapan temas bölgesindeki hidrasyonun biçimlenmesi (Brooks, vd., 2000).

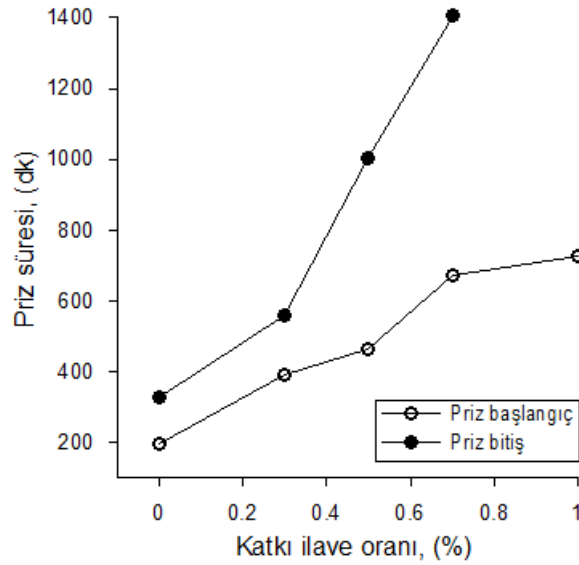
Yamada vd. (2000) yaptıkları çalışmalarında 5 farklı polikarboksilat tipi süperakışkanlaştırıcıların (SP1, SP2, SP3, SP2L, SP2S) çimento hamuru üzerinde priz süresine olan etkilerini incelemiştir (Şekil 1.40). Yamada vd. (2000) kimyasal sentezleri ve kenar zincir uzunlukları birbirinden farklı bu polikarboksilat esaslı süperakışkanlaştırıcıların priz başlangıç ve bitiş sürelerine kullanım dozajlarının artmasıyla birlikte lineer olarak geciktirici bir etki ettiğini belirtmiştir. Özellikle priz başlangıç ve bitiş süreleri arasındaki farkın kısmen kütlece %0,1 SP ilavesine kadar az miktarda arttığı ancak bunun üzerindeki ilavelerde herhangi artış sergilemediğini belirtmişlerdir. Yamada vd. (2000) göre priz sürelerinde ki gecikme sıvı fazdaki sülfonik ve karboksilli grupların konsantrasyonlarının artmasıyla ilişkilidir.

Süperakışkanlaştırıcıların priz başlangıcını geciktirici yönde etkilediği bilinmektedir. Bu durum Alite ( $C_3S$ ) hidrasyonu ile ilişkilendirilmektedir. Alite hidrasyonunun başlamasından sonra süperakışkanlaştırıcıların hidrasyona etki etmediği belirtilmektedir. Priz süresindeki gecikmenin ise sulu fazdaki asidik grup konsantrasyonları ile ilgili olduğu düşünülmektedir (Jolicoeur ve Simard, 1998; Sakai vd., 2006).



Şekil 1.40. Farklı tipte akışkanlaştırıcı katkıların çimento hamuru priz süresine etkisi (Yamada vd., 2000).

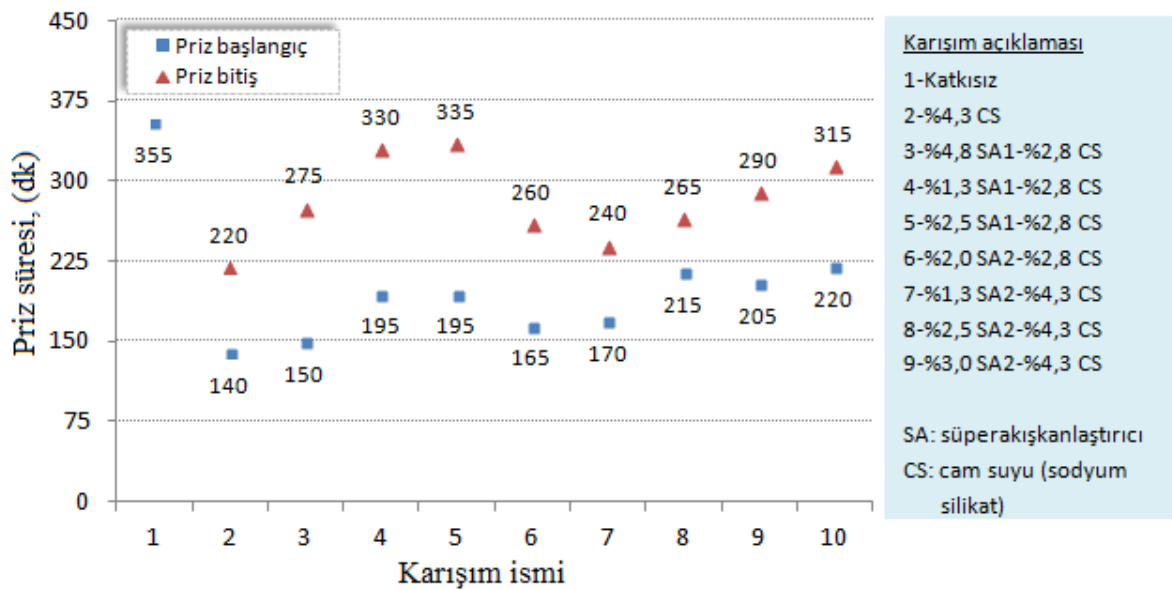
Puertas vd. (2005) yaptıkları çalışmalarında çimento hamuru içerisinde polikarboksilat tabanlı süperakışkanlaştırıcı katkı miktarının çimento hamuru priz başlangıç-bitiş sürelerine ve hidrasyonuna olan etkilerini incelemiştir. Yaptıkları çalışmalarında kullanılan katkı miktarının artmasıyla priz sürelerinin uzadığını belirtmişlerdir (Şekil 1.41).



Şekil 1.41. Kimyasal katkı miktarının çimento hamuru priz süreleri üzerine etkisi (Puertas vd., 2005).

Puertas vd. (2005) çalışmalarında katkı ilave oranının artmasıyla priz başlangıç ve priz bitiş süreleri arasındaki farkın açıldığını belirtmişlerdir. Ayrıca hidrasyon ısı gelişiminin de priz süresi gibi artan kimyasal katkı miktarıyla geciktiğini ve hidrasyonda ısı gelişiminin priz süresi ile orantılı olduğunu vurgulamışlardır. Hidrasyonun gecikmesini ise bazı hidrasyon ürünleri ve çimento taneciklerinin yüzeyine bileşiklerin adsorbsiyonu ile ilişkilendirmişlerdir. Aynı zamanda akışkanlaştırıcı katkıların dispersiyon etkisinin adsorbe miktarına bağlı olduğunu belirtmişlerdir.

Yamada ve Hanehara (2001)'a göre adsorbsiyon iki faktör tarafından etkilenir; katı fazların özgül alanı ve adsorbsiyon sürecinde sülfat iyonları ( $SO_4^{2-}$ ) gibi diğer iyonik olmayan türlerin olası çekişmesi. Bazı yazarlara göre de SNF gibi katkılar  $C_3A$ 'ya kalsiyum silikadan daha fazla adsorbe olurlar. Bu durumda sulu fazdaki iyonik bileşimde bir değişim yaratarak katı fazlarla uyumlu bir denge düzenlemesi söz konusu olur. Yani organik katkılar hidrate olmuş fazın gelişimine, bileşimine ve büyümesine etki ederler ve böylece hidrasyon sürecini etkilemiş olurlar.



Şekil 1.42. Kimyasal katkıların (akışkanlaştırıcı-priz hızlandırıcı) uçucu küllü dolgularda priz süresine etkisi (Çavuşoğlu, 2008).

Dolgu içerisinde akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımının priz süresine olan etkisi ile ilgili henüz literatürde bir çalışma bulunmamaktadır. Daha çok priz hızlandırıcı katkıların priz süresine olan etkisi ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Çavuşoğlu (2008) çalışmasında uçucu küllü dolgularda kimyasal katkıların (akışkanlaştırıcı ve priz

hızlandırıcı) dayanım ve priz süresine olan etkisini incelemiştir (Şekil 1.42). Çalışmasında katkı kullanılmayan numunenin katkı kullanılan numunelere göre priz sürelerinin daha uzun zamanda (355 dk) gerçekleştiğini belirtmiştir. En kısa priz süresine ise priz hızlandırıcı katkıyı yalnız başına kullandığı numunelerinde 140 dk ile elde etmiştir. Akışkanlaştırıcı katkıların ise priz başlangıç sürelerinde yaklaşık 10-80 dk aralığında bir gecikmeye neden olduğunu belirtmiştir. Akışkanlaştırıcılar ile birlikte aynı oranda priz hızlandırıcı kullandığı numunelerinde ise akışkanlaştırıcı kullanım oranının artması ile priz sürelerinin uzadığını ortaya koymuştur.

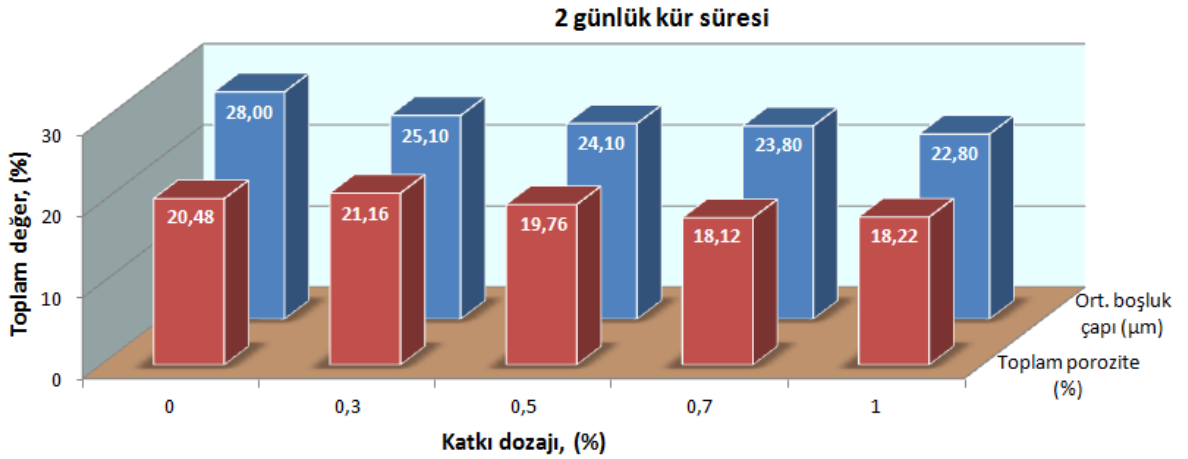
#### **1.6.1.4. Boşluk Oranına Etkisi**

Çimento hidratasyon modelini ve sertleşmiş numunelerin yapı gelişimini açıklarken çimento taneciklerinin bir araya toplanma yapısını dikkate almak gerekmektedir. Bunun yanında süperakışkanlaştırıcı ilave edilen sertleşmiş çimento hamurunun boşluk durumu bu taneciklerin koagülasyon yapısı tarafından etkilendiği bilinmektedir. Süperakışkanlaştırıcılar tanecikler üzerinde dispersiyon etkisi yapmasına rağmen, her bir tanecik tamamıyla diğerinden ayrılmaz ve bundan dolayı daha gevşek bir kümelenme şekillendirebilir. Bu yüzden sertleşmiş hamurun yapı gelişimi çimento taneciklerinin koagülasyon yapısının karmaşıklığı ile alakalıdır ve çimento hidratasyonunun gecikmesine bu yapı üzerinde büyük bir etkiye sahip süperakışkanlaştırıcılar sebep olmaktadır (Sakai vd., 2006).

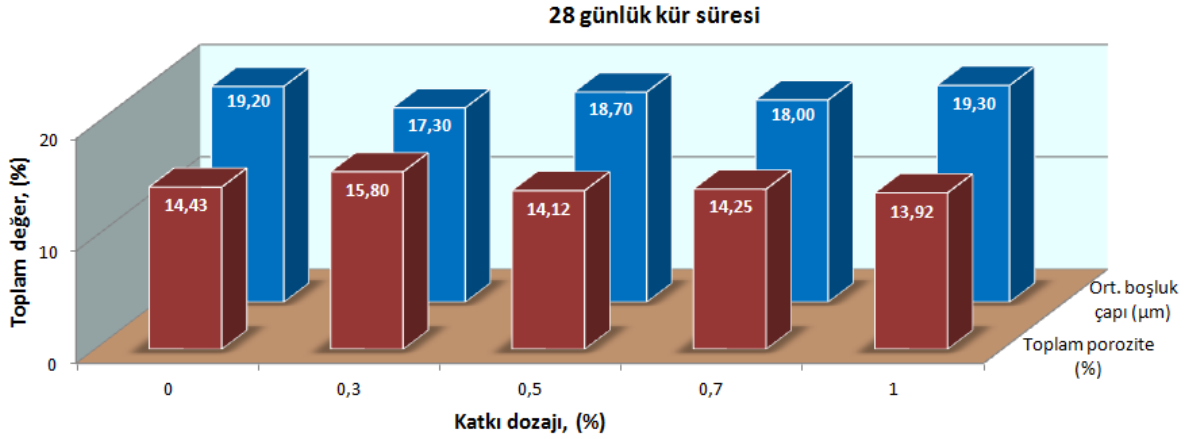
Akışkanlaştırıcıların sertleşmiş çimento hamurunun boşluk yapısına etkisi ile birçok farklı sonuçlarda çalışmalar yapılmıştır. Sabit su/çimento oranında akışkanlaştırıcı ilavesinin beton veya çimento hamuru boşluk yapısı üzerine herhangi bir etkisi olmadığı, azaltıcı etki ettiği veya arttırıcı etki ettiğini ifade eden çalışmalar mevcuttur (Reinhardt ve Gaber, 1990; Singh vd., 1992; Ping vd., 1994; Durekovic, 1995). Çalışmalar arasındaki farkın süperakışkanlaştırıcıların ilave şekliyle alakalı olabileceği düşünülmektedir. Ancak bütün çalışmaların ortak sonucu süperakışkanlaştırıcı varlığında boşluk yapısının incelendiğidir (Khatib ve Mangat, 1999).

Genellikle beton veya çimentolu karışımların boşluk yapısını ölçmek için genellikle gözenekli ortamda gözenek boyut dağılımını ölçmek için kullanılan civa porozimetresi metodu kullanılmaktadır (Vocka, vd., 2000). Civa porozimetresinin temel prensibi, ıslatmayan akıcı sıvının malzemedeki boşluklara yeteri kadar bir basınç yardımıyla nüfuz etmesini sağlamasına dayanır. Bu metotla beraber malzeme içerisindeki toplam, serbest erişilir ve hapsolmuş boşluk miktarı hesaplanabilir (Razavi, 2007).

Puertas vd. (2005) yaptıkları çalışmalarında çimento hamuru içerisinde polikarboksilat tabanlı süperakışkanlaştırıcı katkının mikro yapıya olan etkilerini incelemiştir. Farklı dozajlarda (0-0,3-0,5-0,7-1,0) katkı kullanılan numunelerin iki farklı kür (2-28 gün) zamanındaki boşluk miktarlarını civa porozimetresi deney metodu ile incelemiştir (Şekil 1.43-44). Kür zamanına bağlı olarak hidrasyon ürünlerinin gelişmesiyle numunelerdeki boşluk miktarında ve çapında azalma meydana geldiğini belirtmişlerdir. Özellikle 2 günlük numunelerde kullanılan kimyasal katkı miktarının artmasıyla boşluk çapı ve toplam boşluk miktarında azalma meydana geldiğini belirtmişlerdir (Şekil 1.43). 28 günlük numunelerde ise çok belirgin bir değişim görülmemesini hidrasyon ürünlerinin gelişimine bağlamaktadırlar (Şekil 1.44).



Şekil 1.43. Akışkanlaştırıcı katkı dozajının çimento hamuru üzerindeki toplam porozite ve ortalama boşluk çapına 2 günlük kür süresinde etkisi (Puertas vd., 2005).

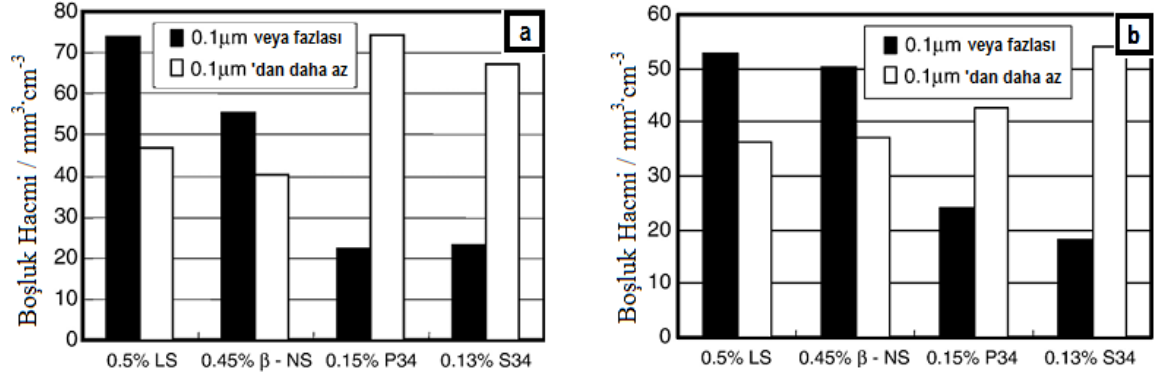


Şekil 1.44. Akışkanlaştırıcı katkı dozajının çimento hamuru üzerindeki toplam porozite ve ortalama boşluk çapına 28 günlük kür süresinde etkisi (Puertas vd., 2005).

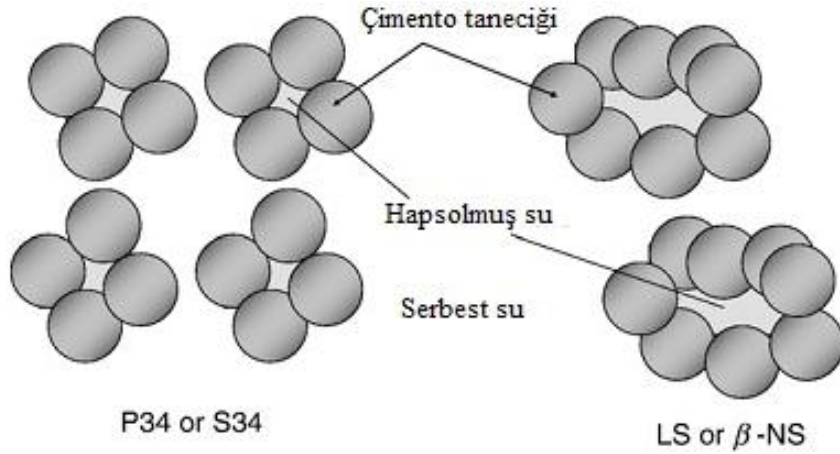
Khatib ve Mangat (1999) yaptıkları çalışmalarında süperakışkanlaştırıcı kullanarak çimento hamuru boşluk miktarına olan etkilerini incelemişlerdir. Süperakışkanlaştırıcı kullanılan numunelerin boşluk hacimlerinin kullanılmayan numunelere göre daha düşük olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca kür koşullarının çimento hamuru boşluk yapısı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Başlangıçta kuru kür koşuluna tabi tutulan numunelerdeki boşluk hacminin nemli kür ortamına tabi tutulan numunelere göre daha fazla olduğunu belirtmişlerdir.

Sakai vd. (2006) çalışmalarında lignin sulfonate (LS), naftalin sülfonat (NS) ve polikarboksilat (P34 ve S34) gibi 3 farklı tipte 4 katkı kullanmışlardır (Şekil 1.45). Çalışmada sertleşmiş numunelerde ölçülen boşluk hacimlerini  $0,1 \mu\text{m}$  ve  $< 0,1 \mu\text{m}$  olarak sınıflayarak ölçmüşlerdir. Şekil 1.45a-b'de 3 farklı tipte 4 akışkanlaştırıcı ile oluşturulan 28 ve 91 günlük numunelerin boşluk hacim dağılımları görülmektedir. Çalışmada numunelerin kür süresinin artmasıyla boşluk hacminin düştüğü belirtilmiştir. LS ve NS kullanılan numunelerdeki boşluk oranı hacimleri P34 ve S34 kullanılan numunelerdekine göre daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Bu durumu katkıların çimento hamuru üzerindeki etkilerinin farklı olmasıyla açıklamışlardır (Şekil 1.46). Polikarboksilat tipli akışkanlaştırıcı katkıları çimento tanecikleri üzerinde daha etkin bir dispersiyon etkisi yaratarak taneciklerin koagülasyon yapısını değiştirmektedir. Çimentolu malzemelerde boşluk oranı koagüle yapısıyla ve su içeriğiyle alakalıdır. Bundan dolayı koagülasyon yapısı değişen taneciklerin farklı şekillerde ve miktarlarda suyu hapsedtikleri belirtilmiştir. Bu nedenle daha güçlü dispersiyon etkisi gösteren katkıların tanecikler üzerinde oluşturduğu bu etki ile

az miktarda hapsolmuş su miktarı gözlenmektedir. Bundan dolayı da boşluk oranı daha düşük gerçekleşmektedir.



Şekil 1.45. Çeşitli tipte kimyasal katkı ile elde edilen sertleşmiş numunelerin boşluk hacimleri, (a) 28 gün (b) 91 gün (Sakai vd., 2006).



Şekil 1.46. Farklı tipteki akışkanlaştırıcıların taze haldeki çimento hamuru yığın yapısına etkisi (Sakai vd., 2006).

### 1.6.2. Priz Hızlandırıcı Kullanımı

Prizlenme, betonun (veya çimentolu malzeme) kademeli olarak akıcı halden katı hale geçmesi olarak ifade edilir. Katı hale geçmeye başladığı noktadaki ana kadar geçen süre priz başlangıç süresi olarak tanımlanmaktadır (Neville, 1996; Schindler, 2004). Betonda mekanik dayanım gelişiminin başlangıcı ise priz süresi sonu olarak tanımlanmaktadır (Brooks vd., 2000).

Priz hızlandırıcılar karışımın plastik halden katı hale geçmeye (prizin) başlama süresini kısaltan kimyasal katkıları olarak tanımlanırlar. Ticari olarak püskürtme beton (shotcrete) katkıları olarak da tanımlanırlar. Özellikle yeraltı uygulamalarında yapılan püskürtme betonların yüksek erken dayanım kazanımı, kısa zamanda priz başlangıcı ve kopma riski olmadan (rebound) kalın katman biçiminde kolaylıkla uygulanabilir olması gibi bir takım temel gereksinimlerin sağlanabilmesi için priz hızlandırıcı katkıları kullanılmaktadır (Prudencio, 1998; Yıldırım vd., 1998). Priz hızlandırıcı katkıları püskürtme betonun her iki uygulama biçiminde (ıslak veya kuru) de toz ve/veya sıvı halde kullanılmaktadır. Priz hızlandırıcılar aynı zamanda soğuk hava şartlarında gerçekleştirilen betonlarda erken dayanıma ulaşması içinde kullanılmaktadır (Rixom ve Mailvaganam, 1999). Bunun dışında madencilikte bazı yeraltı dolgu uygulamalarında da kullanıldığı bilinmektedir (Çavuşoğlu, 2008; Hassani vd., 2011; Hassani vd., 2007; Razavi, 2007).

Yeraltı uygulamaları için dünyada genel olarak kullanılan en yaygın priz hızlandırıcı katkı türleri (Prudencio, 1998);

- Sodyum silikatlar (cam suyu, modifiye sodyum silikatlar),
- Alüminat tabanlı priz hızlandırıcılar (sıvı ve katı halde),
- Toprak metalleri karbonat/hidroksitlerdir (toz formda).

Priz hızlandırıcı katkıları betonun prizlenme süresine ve erken dayanımına etki ederler. Betonun priz süresini kısaltırlar ve erken dayanımını arttırıcı etki ederler. Ancak erken dayanımda sağlamış olduğu bu artış uzun dönemli dayanımlarda gerçekleşmemektedir. Betonun uzun dönemli dayanımlarında bir düşüşe sebep olmaktadır (Yıldırım vd., 1998). Priz hızlandırıcıların püskürtme betonların dayanım ve priz süresine etkilerinin dışında dolaylı olarak farklı etkileri de mevcuttur. Bu etkileri şu şekilde sıralamak mümkündür (Prudencio, 1998);

- Çimentonun prizlenmesine doğrudan etki ederek kıvamda ani bir değişiklik sağlama,
- Su ile reaksiyona girerek karışımın katılaşmasını sağlama,
- Karışımın jel kıvamı özelliğini artırma,
- Taze karışımda reolojik bir etki yaratmaz,
- Toz (kuru karışımlarda) ve geri sekme (rebound) oranlarında değişim sağlama.

Yeraltı dolgularında en yaygın kullanılan priz hızlandırıcılar sodyum silikat (cam suyu) tipi katkılardır (Çavuşoğlu, 2008; Hassani vd., 2011; Hassani vd., 2007; Razavi, 2007). Bazı üretim yöntemlerinde planlanan üretim hızının dolgu sürecinden etkilenmemesi için dolgunun erken dayanıma ulaşması ve erken priz alması istenmektedir. Bundan dolayı dolgu malzemesi içerisine kalıba püskürtme esnasında priz hızlandırıcı katkılar ilave edilmektedir (Çavuşoğlu, 2008).

Sodyum silikatların kimyasal formülleri  $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$  veya  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  şeklindedir ve sıvı ve toz halinde bulunabilirler. Silis kumu ve soda külünün  $1350\text{-}1450^\circ\text{C}$ 'de ısıtılmasıyla elde edilmektedir. Sodyum silikatlar alkali (2 modül) veya nötral (3 modül) şeklinde bulunur ve  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  oranı veya  $\text{SiO}_3/\text{Na}_2$  oranlarıyla belirlenir (Shi vd., 2006). Sodyum silikatın alkaliliğini artırmak için NaOH ilave edilir. Alkaliliği artırılan sodyum silikatlar çimento ve diğer bağlayıcı malzemelerde (yüksek fırın cürufu, uçucu kül vb.) aktivatör olarak da kullanılmaktadırlar (Shi vd., 2006; Bondar vd., 2011).

### 1.6.2.1. Dayanıma Etkisi

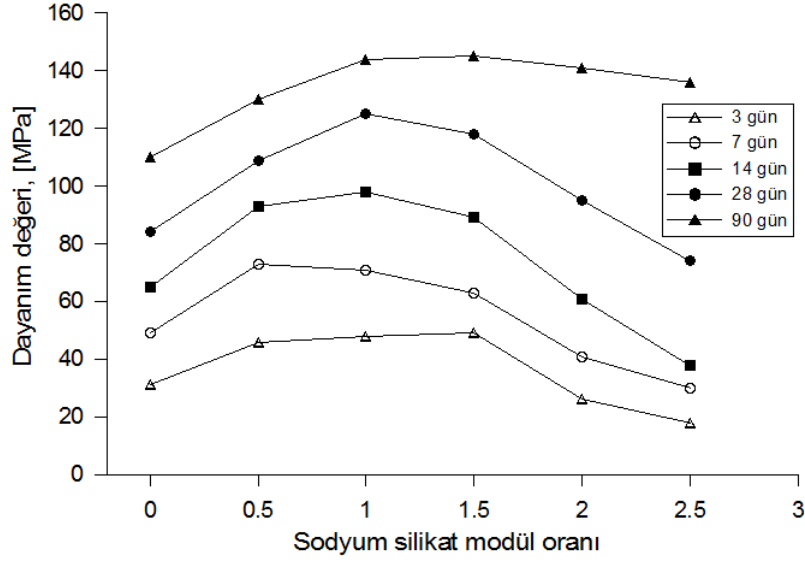
Priz hızlandırıcı katkıların çoğu beton içerisinde çözünmeyen hidroksitler veya diğer tuzlar gibi daha çok tetikleyici etki ederler. Özellikle hidrasyon ısısı üzerine yapılan çalışmalarda priz hızlandırıcıların erken dayanım üzerine olan temel etkisinin çimentonun  $\text{C}_3\text{A}$  bileşeni üzerine olan etkisinden kaynaklandığını belirtmişlerdir. Bu katkıların varlığında  $\text{C}_3\text{A}$  reaksiyonu oldukça yoğun biçimde gerçekleşir ve erken yaşlarda keskin bir pik noktaya ulaşır. Bundan dolayı  $\text{C}_3\text{A}$  içeriği yüksek CEM I ve CEM III tipli çimentolarla CEM IV ve CEM V tipli çimentolara göre daha hızlı reaksiyon vermektedirler (Rixom and Mailvaganam, 1999).

Priz hızlandırıcıların erken dayanıma olan etkisi onların kimyasal yapıları, dozajı, yapıdaki bağlayıcı bileşimi, mineral katkıların varlığı ve sıcaklığına bağlıdır. Priz hızlandırıcı katkılar, belirli sınırlar içerisinde bir kimyasal bileşimi olan çimentolarla uyumlu bir şekilde kullanım için formüle edilmişlerdir. Yani priz hızlandırıcıların uygun kullanımı için çimento ve katkı arasındaki uyumun belirlenmesi ve doğru dozajın saptanması gerekmektedir (Prudencio, 1998).

Sodyum silikat tabanlı hızlandırıcılar genellikle püskürtme beton veya yeraltı dolgularında kullanılmaktadırlar. Tetikleyici etki ile prizlenmeyi hızlandırırlar. Silikatlı katkılar çimento taneleri arasındaki boşluk suyunda çözünürler ve burada kalsiyum silika hidratlar şekline dönüşerek hızlı prize neden olmaktadır. Yüksek miktarlarda kullanıldıklarında bağlanma ve dayanımda düşüşler meydana gelmektedir ve kuruma büzülmesinde artışlar oluşturmaktadırlar (Rixom ve Mailvaganam, 1999). Bu tip katkıların avantajları hemen her tip çimento ile kullanılmalarıdır ancak nihai dayanımda düşüşlere sebebiyet vermektedirler. Katkısız yapılan beton ile karşılaştırıldığında 28 günlük dayanım değerlerinde kullanım miktarına da bağlı olarak %10-50 arasında bir düşüş gerçekleşmektedir (Prudencio, 1998; Yıldırım vd., 1998).

Priz hızlandırıcı katkıları genellikle püskürtme betonlarda kullanılmaktadırlar. Ancak soğuk havalarda yapılan bazı beton uygulamalarında da kullanılmaktadırlar. Yıldırım vd. (1998) sodyum alüminat esaslı priz hızlandırıcı katkıları oluşturdukları beton numunelerinde kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmalarında kontrol beton numunesinin 28 günlük mukavemetlerinin katkılı numuneye göre %20 oranında daha fazla olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca portland çimentosu ile yapılan numunelerin katkılı ve traşlı çimentoya göre daha fazla dayanım verdiğini ifade etmişlerdir.

Sodyum silikatlı katkıları son zamanlarda aktivatör olarak çeşitli bağlayıcılar ile birlikte kullanılmaktadırlar. Bu alanda yapılan çalışmalarda cam suyu olarak da adlandırılan sodyum silikat katkısını değişik modül oranlarında cürüflü çimentolar ile birlikte deneyerek çimento hamurunun mekanik özelliklerine etkilerini incelemişlerdir (Shi vd., 2006). Shi ve Li (1989) yaptıkları çalışmalarında sodyum silikat katkısının modül oranının alkali-aktif fosfor cürüflü çimentosu hamurunun mekanik dayanımına etkisini incelemişlerdir (Şekil 1.47). Sodyum silikat katkısının modül oranının 0,5-1,5 arasında olduğunda dayanıma etkilerinin benzer olduğunu ancak modül oranının 1,5-2,5 arasında olduğu durumlarda numunelerde 3-28 gün arası dayanımda belli oranlarda düşüşler yaşandığını belirtmişlerdir. Dayanım sonuçlarından yola çıkarak cürüflü çimentolar için en uygun modül oranının 1,0-1,5 arasında olduğunu belirtmişlerdir. Wu (1999) benzer çalışmalar yaparak modül oranının etkilerini incelemiş ve benzer sonuçları elde etmiştir (Shi vd., 2006).

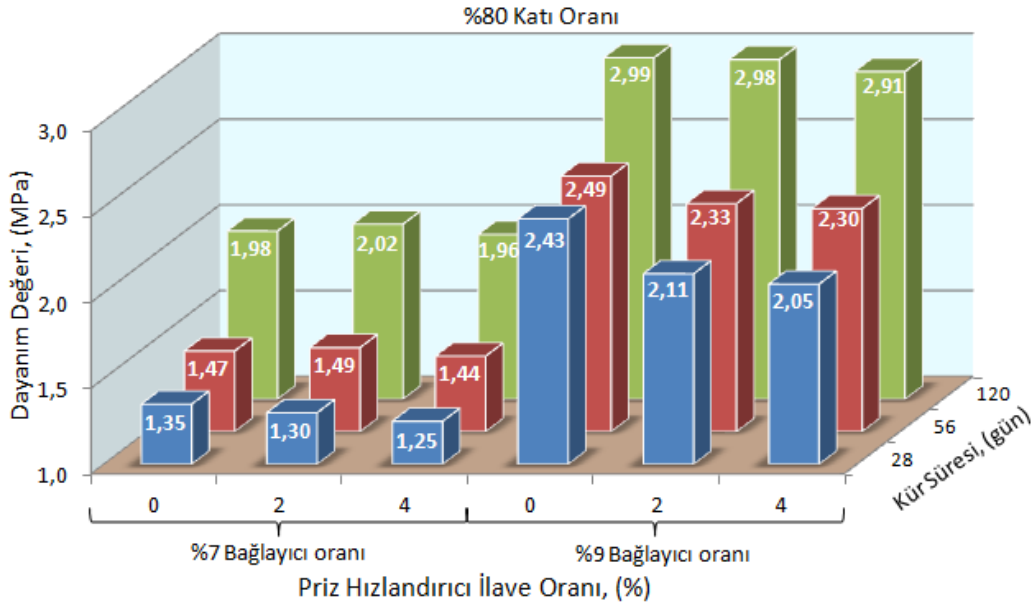


Şekil 1.47. Alkali-aktive fosfor cüruf çimentosunun dayanımına sodyum silikat modül oranının etkisi (Shi and Li 1989).

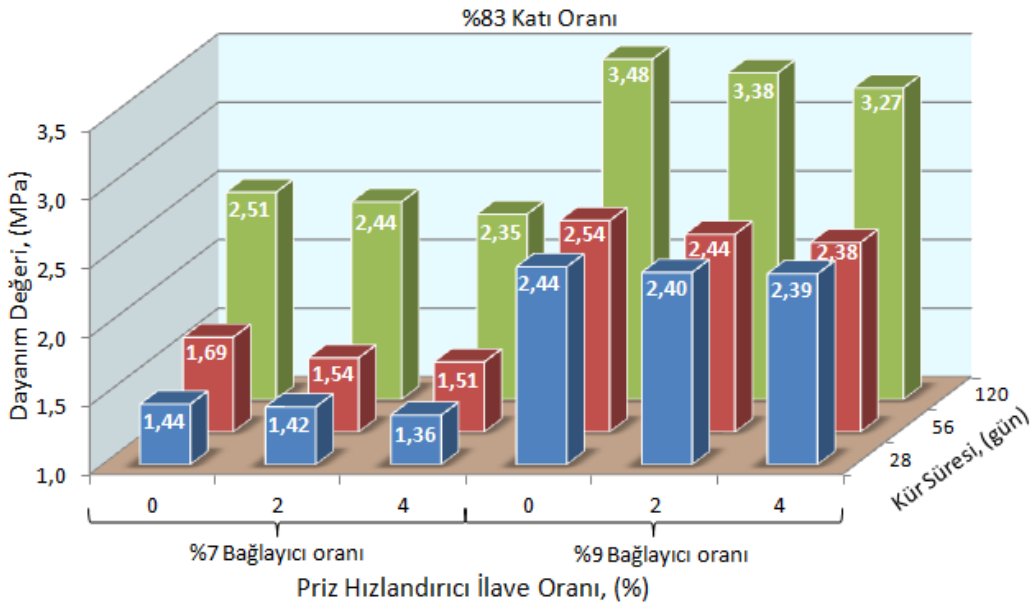
Sodyum silikatların dolgu içerisinde kullanımlarına yönelik çalışmalarda mevcuttur. Hassani vd. (2011) yaptıkları çalışmalarında macun dolgu içerisinde sodyum silikat tipi ( $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2$ ) priz hızlandırıcı kullanmışlardır. Bu tip katkıları kullandıkları dolgulara jel dolgu (gelfill) adını vermişlerdir. Priz hızlandırıcı katkıyı dolgu içerisinde çimento ağırlığının %0,1-0,9 arasında olacak biçimde kullanarak dayanıma olan etkisini incelemişlerdir. En iyi dayanım değerini ağırlıkça %0,3 olarak kullanılan sodyum silikatlı numunelerde tespit etmişlerdir. Ayrıca çalışmalarında bu katkı oranı üzerine çıkıldıkça dolgu dayanımının düştüğünü belirtmişlerdir. %0,5 oranından sonra dayanımda keskin bir düşüş sağladıklarını ve %0,7 ve %0,9 oranlarında ise 7 ve 14 günlük dayanım değerlerini elde edemediklerini ifade etmişlerdir. Bu durumun toplam porozite miktarının artmasıyla olabileceğini açıklamışlardır. Ayrıca sodyum silikatlı karışımlarda macun dolgu için gerekli olan 1 MPa'lık dayanım değerine erken kür sürelerinde ulaşıldığını belirtmişlerdir.

Hassani vd. (2007) ve Razavi (2007) yaptığı çalışmalarında sodyum silikat tipi katkıları çimento ikamesi olarak hidrolik dolgu (kum dolgusu) içerisinde denemişlerdir. İki farklı katı yoğunluğuna (%80-83 pulp) sahip ve bağlayıcı oranının %7 ve %9 olduğu dolgu karışımları içerisinde çimentoya ikame olarak %2 ve %4 oranında priz hızlandırıcı katkı denemişlerdir (Şekil 1.48-49). Çalışmada katı yoğunluğunun düşük olduğu dolgu karışımlarında 28 günlük kür süresinde priz hızlandırıcı katkı ilavesinin artmasıyla dolgu dayanımının düştüğünü belirtmişlerdir. Ancak ilerleyen kür sürelerinde ise durumun biraz farklılık arz ettiğini vurgulamışlardır. 56 ve 120 günlük kür sürelerinde katkı ilaveli dolgu

karışımlarının dayanım değerlerinin birbirine yakın olduğunu belirtmişlerdir. Bu durumu düşük katı oranında sodyum silikat tipindeki katkının karışım ile pelte şeklinde etkileşime girerek yoğun bir malzeme haline getirmesiyle alakalı olduğunu belirtmişlerdir. Çalışmada ayrıca bağlayıcı oranının artmasıyla dolgu dayanımının arttığı belirtilmiştir.



Şekil 1.48. Priz hızlandırıcı katkının %80 katı ve %7 ve %9 bağlayıcı oranına sahip dolgu karışımlarında dayanıma etkisi (Razavi, 2007).

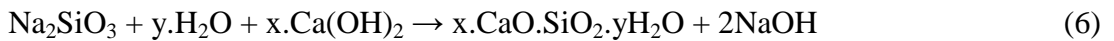


Şekil 1.49. Priz hızlandırıcı katkının %83 katı ve %7 ve %9 bağlayıcı oranına sahip dolgu karışımlarında dayanıma etkisi (Razavi, 2007).

Çalışmada katı oranının %83 olduğu karışımların dayanım değerlerini de incelemiştir (Şekil 1.49). Katkı kullanılmayan karışımın bütün kür sürelerinde dayanım değerlerinin sodyum silikat katkısı kullanılan numunelerden yüksek değerde çıktığını belirtmişlerdir. Bu durumu ise artan kür süresi ile beraber priz hızlandırıcı katkı kullanılan numunelerde boşluk miktarının artmasıyla gerçekleştiğini ifade etmişlerdir. Yazarlar ayrıca bağlayıcı miktarının artmasıyla dayanım değerinin de arttığını belirtmişlerdir. Razavi (2007) aynı çalışmada bağlayıcı olarak çimento ve sodyum silikat dışında cüruf-çimento, cüruf-çimento-sodyum silikat ve cüruf-sodyum silikat gibi çeşitli alternatif karışımlar da kullanmışlardır. Özellikle uzun zamanlı kür sürelerinde cüruf-sodyum silikatlı numunelerin dayanım değerlerinin diğerleriyle karşılaştırıldığında yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bu durumun alkali özelliği olan sodyum silikatın ve cürufun macun dolgularda atığın kimyasal yapısından kaynaklanan uzun dönemde dayanım kaybına sebebiyet veren asit etkisini azaltmasıyla meydana geldiğini belirtmişlerdir.

#### 1.6.2.2. Priz Süresine Etkisi

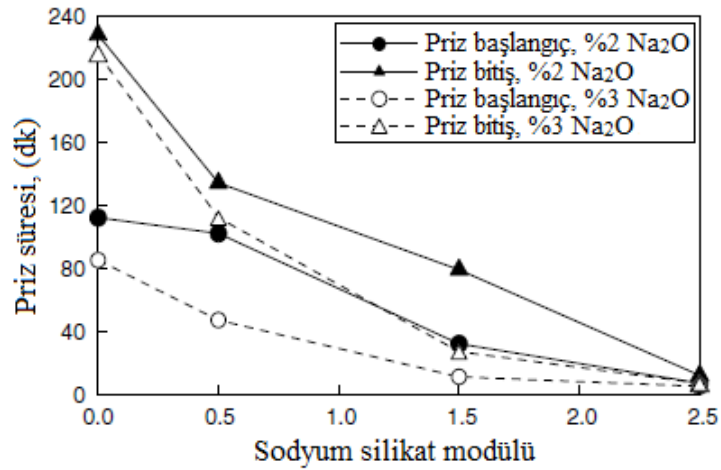
Prizlenme çimentonun önemli bir özelliğidir. Priz hızlandırıcılar ise çimentonun priz özelliğini arttırıcı etki etmektedirler. Bazı araştırmacılar priz hızlandırıcı katkıların çimentonun daha hızlı prizlenmesine olan etkisini çimentoyla oluşturdukları kimyasal etkileşim sonrasında yeniden etrenjit jelleri oluşturmasıyla açıklamışlardır (Xu, 2004). Bazı araştırmacılar ise C<sub>3</sub>S ve çimento arasındaki tamamen silika reaksiyonlarına bağlı olarak gelişen normal prizlenme davranışıyla büyük benzerlikler olduğunu ifade etmiştir (Taylor, 1992). Diğer çalışmalarda ise eriyebilir silikaların erken sürede Ca(OH)<sub>2</sub> (portlandite) ile reaksiyona girip C-S-H jellerini şekillendirmesiyle (Eşitlik 6) priz süresinin kısaldığı belirtilmiştir (Thompson vd., 2012; Thompson vd., 1997).



Betonda yüksek erken dayanım değerine ulaşılması için priz hızlandırıcılar kullanılmaktadır. Priz hızlandırıcı kullanılan püskürtme betonda priz başlangıç süresi 3 dk'dan daha az bir sürede, priz bitiş süresi ise 12 dk'dan daha az bir sürede gerçekleştiği bilinmektedir (Xu, 2004). Çimentoda priz süresi vikat deney aleti ile ölçülür. Bir iğnenin çimento hamuruna batırılması esasına dayanarak ölçülür. Başlangıç süresi kalıp

içerisindeki çimento hamuruna batırılan iğnenin kalıp tabanından 5 mm yukarıda kalmasıyla belirlenir, bitiş süresi ise iğnenin en fazla 0,5 mm batmasıyla belirlenir. Betonda priz süresi ise penetrasyon dayanımı ile ölçülmektedir. Betonda priz başlama süresi suyun çimentoya temas ettiği andan itibaren numunenin, sondanın daldırılmasına karşı 5 kgf/cm<sup>2</sup>'lik dayanım kazanmasına kadar geçen süredir (sondanın numuneye daldırıldığında terazide net olarak 1,5 kg okunduğu andır). Beton priz bitim süresi suyun çimentoya temas ettiği andan itibaren numunenin, sondanın daldırılmasına karşı 35 kgf/cm<sup>2</sup>'lik dayanım kazanmasına kadar geçen süredir (sondanın numuneye daldırıldığında terazide net olarak 10,5 kg okunduğu andır).

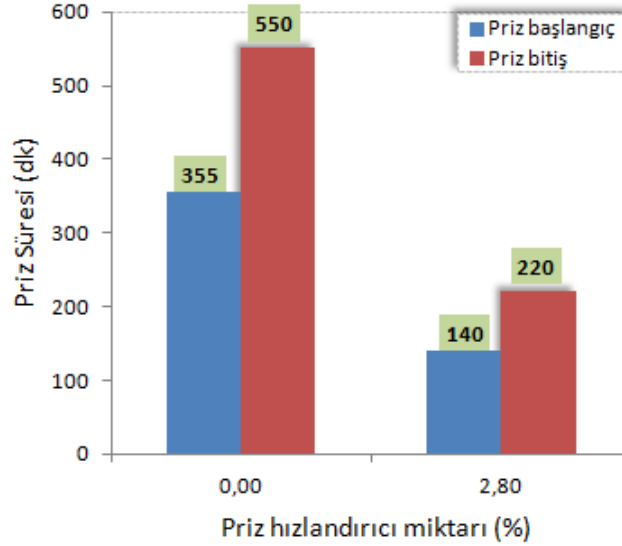
Sodyum silikat katkısının modül oranının priz süresine doğrudan etki ettiği bilinmektedir. Shi ve Li (1989) çalışmalarında sodyum silikat katkısının modül oranının alkali-aktive fosfor çimento hamurunun priz sürelerine etkisini incelemiştir (Şekil 1.50). Yaptıkları çalışmalarında modül oranının artmasıyla priz sürelerinin kısaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca kütlece %3 Na<sub>2</sub>O oranına sahip katkıının priz süresine etkisi %2 Na<sub>2</sub>O oranına sahip katkıdan daha etkilidir (Shi vd., 2006).



Şekil 1.50. Sodyum silikat modül oranının priz süresine etkisi (Shi vd., 2006).

Yeraltı dolgularında priz hızlandırıcı katkıların priz süresine olan etkileri ile ilgili çalışma literatürde henüz bulunmamaktadır. Ancak Çavuşoğlu (2008) uçucu küllü dolgularda priz hızlandırıcı katkıların priz süresine olan etkilerini incelemiştir (Şekil 1.51). Üretim yönteminden kaynaklı olarak yeraltında yapılan dolgunun prizlenmesinin erken sürelerde gerçekleşmesi gerektiğini belirtmiştir. Çimento ağırlığının %2,8'i kadar

kullandığı priz hızlandırıcı katkının dolgu priz başlangıç süresinde 215 dk bir kısalma meydana getirdiğini belirtmiştir. Priz süresinde meydana gelen bu kısalmanın yeraltı üretiminin kesintiye uğramadan hızlı bir şekilde devamını sağladığını belirtmiştir.



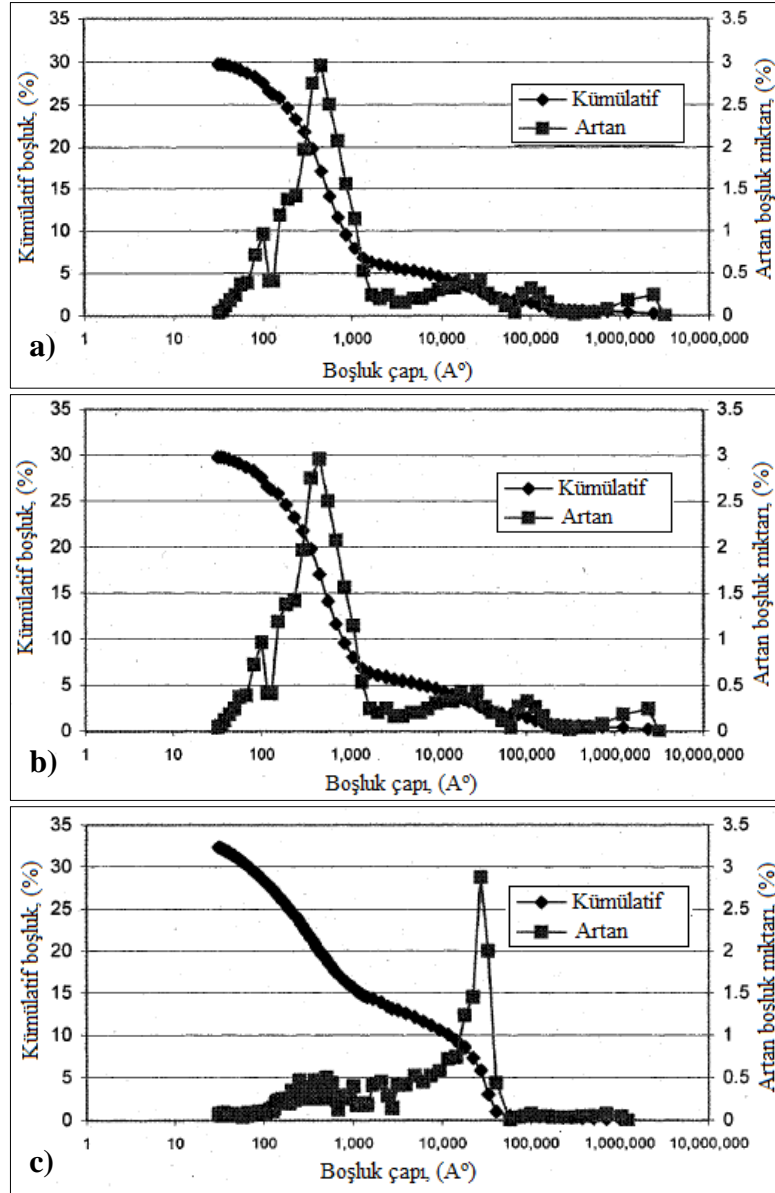
Şekil 1.51. Priz hızlandırıcı katkıların dolgu priz sürelerine etkisi (Çavuşoğlu, 2008).

### 1.6.2.3. Reolojiye Etkisi

Bu tür katkıler püskürtme betonun erken sertleşmesini sağlamak için kullanılırlar ve karışımın uygulanacağı yüzeye yapışma ve burada sertleşmenin kontrolünü sağlarlar. Cam suyu katkısı suyla oluşturduğu pelte ile püskürtme betonun bağlayıcı özelliğini ve adhezyonunu artırır. Çimentolu malzeme ile karıştığı andan itibaren malzemede bütünleştirici bir etki yapmakta ve kıvamın aniden kaybolmasına neden olmaktadır.

### 1.6.2.4. Boşluk Oranına Etkisi

Priz hızlandırıcılar genellikle çimentolu karışımların erken dayanımını artırıcı yönde etki eden ancak nihai dayanımlarda ise düşüşe sebebiyet veren katkıler olarak bilinirler. Çimentolu karışımların dayanımını ise büyük oranda içerdiği boşluk miktarı ve boşluk boyut dağılımından etkilenmektedir (Pandey ve Sharma, 2000). Priz hızlandırıcı katkılerin nihai dayanımlarda düşüşe sebebiyet vermesi malzemede oluşturduğu boşluk miktarı ile ilgilidir.



Şekil 1.52. Sodyum silikat katkısının dolgu boşluk miktarına etkisi, katkı kullanılmayan numune (a), %2 sodyum silikat katkısı kullanılan numune (b) ve %4 sodyum silikat katkısı kullanılan numune (Razavi, 2007).

Dolgu içerisinde priz hızlandırıcı katkıların boşluk miktarına etkisi ile ilgili literatürde çok fazla çalışma bulunmamaktadır. Razavi (2007) çalışmasında sodyum silikat tipi priz hızlandırıcı katkıyı hidrolik dolgu içerisinde iki farklı oranda deneyerek dolgu içerisinde boşluk miktarına 56 günlük kür periyodunda etkisini incelemiştir. Çalışmasında cüruf ve sodyum silikat karışımını bağlayıcı malzeme olarak dolgu içerisinde denemiştir. Sodyum silikat miktarını ise %2 ve %4 oranında karışımlarında denemiştir (Şekil 1.52). Razavi (2007) çalışmasında sodyum silikat tipi priz hızlandırıcı katkıların dolgularda

toplam boşluk miktarı ve boşluk boyut dağılımını etkilediğini belirtmiştir. Hidrolik dolgu içerisinde katkı kullanılmayan numunenin boşluk boyutunun 100 ile 1.000 Å arasında, katkı kullanılan numunelerde ise boşluk boyutunun da 10.000 ile 100.000 Å arasında gerçekleştiğini belirtmiştir. Razavi (2007) katkı kullanılan numunelerde boşluk boyut miktarı ve toplam boşluk miktarının artmasının nedenini bağlayıcıların yetersiz hidrasyonu ile açıklamaktadır.

## 2. YAPILAN ÇALIŞMALAR

### 2.1. Giriş

Bu çalışmada, atık malzeme olarak uçucu külün kullanıldığı yeraltı dolgularında iki farklı tipte çimento, iki farklı tipte akışkanlaştırıcı kimyasal katkı, farklı oranlarda priz hızlandırıcı ve ince öğütülmüş atık kül ile yapılan numunelerin dayanım ve dürabilitesi, priz başlangıç-bitiş değerleri, mikro yapısı, malzeme boşluk yapısı ve ekonomisi incelenmiştir. Deneysel çalışmada atık malzeme olarak Çayırhan Termik Santrali 1. ve 2. ünitesinden elde edilen uçucu kül kullanılmıştır. Bağlayıcı malzeme olarak CEM I ve CEM II isimli iki farklı tipte çimento ile kimyasal katkı olarak iki farklı akışkanlaştırıcı tipi kullanılmıştır. Bu kimyasal katkıların bir tanesi normal akışkanlaştırıcı (NA) diğeri ise süperakışkanlaştırıcıdır (SA). Priz hızlandırıcı katkı olarak püskürtme betonlarda ve dolgularda kullanılan sodyum silikat tipi (cam suyu) katkı kullanılmıştır. Ayrıca karışım için gerekli olan su musluk suyundan sağlanmıştır.

Çalışmada Çayırhan Yeraltı Mekanize İşletmelerinde uçucu külle yapılan dolgu içerisinde farklı kimyasal katkıları ve çimento tipleri ve bunların farklı oranları kullanarak dolgu dayanımına, priz süresine ve mikro yapısına olan etkileri incelenmiştir. Çalışmada öncelikle yeraltında halen yapılan dolgu karışım değerleri denenmiş ve yeraltı dolgusunun mekanik değerleri elde edilmiştir. Daha sonra aynı hacim oranında çimento miktarında bir azalmaya ve atık miktarında (uçucu kül) bir artışa gidilerek oluşturulan karışım içerisinde farklı tipte akışkanlaştırıcı kimyasal katkıları iki farklı oranda ve priz hızlandırıcı katkıları farklı oranlarda denenmiştir. Deneysel çalışmalar sonucunda;

1. Bağlayıcı tipinin (CEM I ve CEM II) kısa ve uzun dönemli dayanım ve priz süresine olan etkileri,
2. Bağlayıcı oranının (%25, %22,5 ve %20) dayanım ve priz süresine olan etkileri,
3. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı tipinin ve oranının dolgunun kısa ve uzun dönemli dayanım üzerindeki etkileri,
4. Akışkanlaştırıcı kimyasal katkı tipinin ve oranının dolgu priz süresi üzerindeki etkileri,
5. Priz hızlandırıcı kimyasal katkı oranının dolgu dayanım ve priz başlangıç ve bitiş süresine olan etkisi,

6. Priz hızlandırıcı kimyasal katkının akışkanlaştırıcı ile beraber kullanıldığı dolgularda priz başlangıç ve bitiş süresine olan etkisi,
7. Priz hızlandırıcı kimyasal katkının akışkanlaştırıcı kullanılan dolgularda kısa ve uzun dönemli dayanıma olan etkisi,
8. Kimyasal katkıların numunelerde mikro yapıya olan etkileri,
9. Ayrıca %1 priz hızlandırıcı kullanılan tüm karışımların ekonomikliği incelenmiştir.

## **2.2. Malzemeler**

Deneysel çalışmalarda karışım malzemelerini hazırlamak için bağlayıcı malzeme, atık malzeme, su ve kimyasal katkı malzemeleri kullanılmıştır. Atık malzeme olarak termik santral atığı uçucu kül kullanılmıştır. Bağlayıcı malzeme olarak CEM I 42,5 R ve CEM II A-M (P-L) 42,5 R tipinde çimentolar kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcı katkı olarak normal akışkanlaştırıcı (NA) ve süperakışkanlaştırıcı (SA) katkıları kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcı katkıları Sika firmasına ait katkılardır ve ticari olarak adları Sikament MR 50W (NA) ve Sikament FFN'dir (SA). Priz hızlandırıcı katkı olarak püskürtme betonlarda ve dolgularda kullanılan sodyum silikat tipi (cam suyu) katkı kullanılmıştır. Ayrıca karışıma ilave edilen su musluk suyudur. Kullanılan bu malzemelerin fiziksel ve kimyasal olarak çeşitli özelliklerini belirlemek için bazı deneysel çalışmalara tabi tutulmuştur. Tek tip su kullanıldığı için suya herhangi bir analiz yapılmamıştır.

### **2.2.1. Uçucu Kül**

Karışımında kullanılan uçucu külün tüm kimyasal analizleri gerçekleştirilmiştir. Uçucu küllere KTÜ Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında tane boyu analizi yapılmıştır. Tane boyut analizleri Malvern Hydro 2000 MU model lazer tane boyut analiz cihazı ile yapılmıştır. Analizler 1,6 refraktif indeksinde, 5 dakika ultrasonik karıştırma süresinde ve 3 analiz tekrarının ortalaması alınarak yapılmıştır. Uçucu küllerin mineral yapısının belirlenmesi için KTÜ Fizik Bölümü Laboratuvarında XRD analizleri yapılmıştır. Analizler 20° derecesinde ve 5-70 şiddet aralığında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca uçucu küllerin yüzey

mikro yapısını görüntüleyerek tanecik boyutu ve farklı kristallografik fazlarını belirlemek için KTÜ Metalürji Mühendisliği Bölümünde SEM analizleri gerçekleştirilmiştir.

### **2.2.2. Çimento**

Çalışmada iki farklı tipte çimento kullanılmıştır. Kullanılan çimentoların tüm kimyasal analizleri Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliğinde (TÇMB) gerçekleştirilmiştir. Ayrıca çimentoların KTÜ Maden Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında tane boyu analizleri yapılmıştır. Çimentoların diğer bazı özellikleri elde edilen firmaların bilgilerine dayanılarak kullanılmıştır.

### **2.2.3. Kimyasal Katkılar**

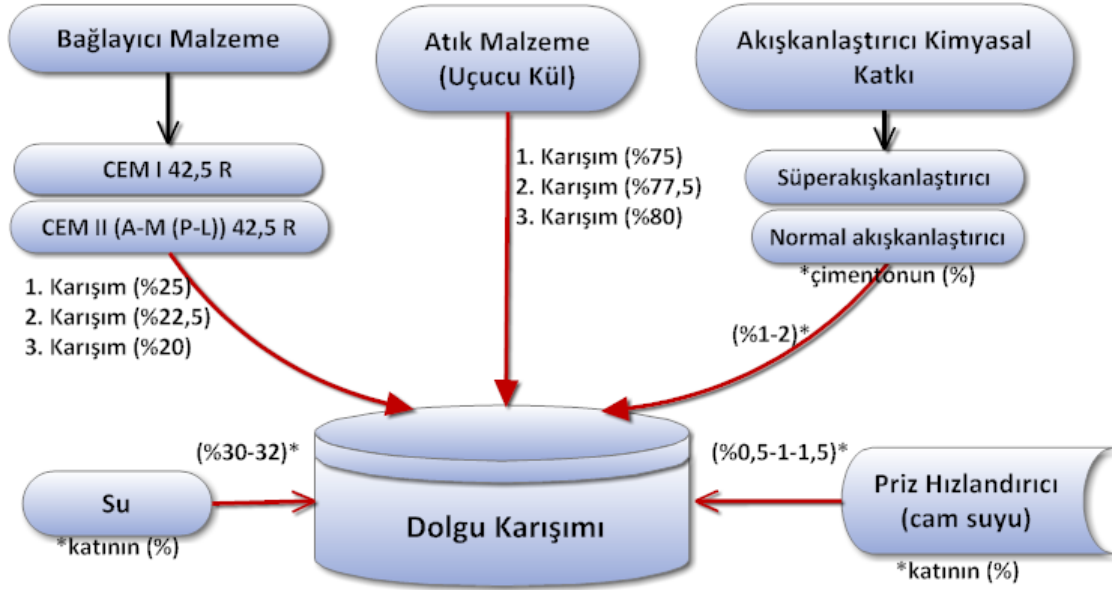
Akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların tüm özellikleri ürünlerin alındığı firmadan elde edilmiştir. Priz hızlandırıcı katkı için fiziksel ve kimyasal analizlerinin belirlenmesi ODTÜ Kimya Laboratuvarında yaptırılmıştır.

## **2.3. Karışım Dizaynı**

İlk etapta Çayırhan Yeraltı İşletmelerinde uygulanan dolgu karışımının karakteristiğinin ortaya konması için dolguda kullanılan oranlar esas alınmıştır. Çayırhan dolgusunda kullanılan malzemelerin oranları işletmedeki kontrol merkezinden elde edilen veriler ışığında katı malzemede ağırlıkça %25 çimento ve %75 uçucu kül olacak şekilde ayarlanmaktadır. Çimento ve külün toplam ağırlıklarının %1'i olacak şekilde ise püskürtme esnasında priz hızlandırıcı katkı ilave edilmektedir. Su miktarı ise toplam katı ağırlığının yaklaşık %30'u kadardır. Su miktarı yeraltında bulunan karışım tesisinin ayakbaşına olan mesafesine bağlı olarak değişmektedir.

Tüm bu bilgiler ışığında işletmede kullanılan çimento-kül ve priz hızlandırıcı katkı oranlarını kullanarak dolgu karakteristiği ortaya konmuştur. Ayrıca belli oranlarda çimento (bağlayıcı) miktarı düşürülüp atık malzeme miktarı artırılarak ve bu miktarlarla oluşturulan numunelerin içerisine akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı katkı ilave ederek karışım numuneleri hazırlanmıştır (Şekil 2.1). Çalışmada 3 farklı oranda bağlayıcı

kullanılmıştır; 1. karışım oranında çimento miktarı %25, kül miktarı %75'tir (25-75), 2. karışım oranında çimento miktarı %22,5, kül miktarı %77,5'tir (22,5-77,5) ve 3. karışım oranında ise çimento miktarı %20, kül miktarı %80'dir (20-80). Çalışmanın bu bölümünden sonra sadece karışımlar 1. karışım, 2. karışım ve 3. karışım şeklinde kullanılacaktır.



Şekil 2.1. Tez çalışmasında kullanılan malzemeler ve oranları

Çimento tipinin ve miktarının dolgu dayanımına ve priz süresine etkisinin belirlenmesi için iki farklı tipte çimento ile çökme değeri (slamp) 20 cm olacak şekilde hazırlanan numuneler 2, 7, 28 ve 90 günlük dayanım testlerine tabi tutulmak üzere kür ortamına bırakılmıştır (Tablo 2.1). Her bir kür süresinde 3 numune hazırlanmış ve dayanım değerleri için bu numunelerin ortalama değerleri hesaplanmıştır. Priz süresinin belirlenmesi için ise oluşturulan taze karışım numunesinden vikat deney aleti haznesine yetecek kadar malzeme alındıktan sonra deney gerçekleştirilmiştir. Bu karışım dizaynında CEM I ve CEM II çimentosundan ayrı ayrı 36 numune olacak biçimde toplam 72 numune oluşturulmuştur.

Tablo 2.1. İki farklı çimento tipi ile farklı oranlarda yapılan karışım tasarımı.

Çimento Tipi		CEM I			CEM II		
Çimento-Kül Oranı (ağırlıkça)		25-75	22,5-77,5	20-80	25-75	22,5-77,5	20-80
KÜR SÜRESİ	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	7	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	28	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	90	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Yeraltında püskürtme esnasında dolgu içerisine ilave edilen priz hızlandırıcı katkının dolgu içerisindeki dayanım ve priz süresine olan etkisinin ortaya konması için 1. Karışım oranında 3 farklı oranda kullanılarak numuneler hazırlanmıştır (Tablo 2.2). Ayrıca yine iki farklı çimento kullanarak priz hızlandırıcı katkı ile uyumu ortaya konmuştur. Hazırlanan numuneler 2, 7, 28 ve 90 gün kür süresinde bekletilmiş ve her bir kür süresi için 3 adet oluşturulmuştur. Oluşturulan numunelerin priz hızlandırıcı katılmadan önceki çökme değeri 20 cm olacak şekilde hazırlanmıştır. Priz sürelerinin belirlenmesi için ise taze karışım numunesinden vikat deney aleti haznesine yetecek kadar malzeme alındıktan sonra deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu karışım dizaynında CEM I ve CEM II çimentosundan ayrı ayrı 36 numune olacak biçimde toplam 72 numune oluşturulmuştur.

Tablo 2.2. Farklı tipte çimento ile farklı oranlarda priz hızlandırıcı katkı kullanarak hazırlanan karışım tasarımı

Çimento Tipi		CEM I			CEM II		
Çimento-Kül Oranı (ağırlıkça)		25-75	25-75	25-75	25-75	25-75	25-75
Cam suyu miktarı (*)		0,5	1	1,5	0,5	1	1,5
KÜR SÜRESİ	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	7	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	28	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	90	✓	✓	✓	✓	✓	✓

(\*) Toplam katı malzemenin %'si olarak alınacak.

Dolgu içerisinde akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların etkilerini incelemek için 2. ve 3. karışım oranlarında her iki akışkanlaştırıcı tipinden %1 ve %2'lik oranlarda ilave edilmiştir (Tablo 2.3). İki akışkanlaştırıcı için kullanılan iki oran laboratuvar ortamında denemeler yapılarak birbirlerine yakın oranlarda su azaltması yaptıklarından tercih edilmiştir. Kimyasal katkıların dayanıma olumlu etkilerinden yola çıkarak halen kullanılan dolgu karışım değerlerinde çimento miktarında azalmaya gidilerek karışım dizaynı yapılmıştır. Yapılan çalışmada çökme değeri 20 cm olacak şekilde karışımlar hazırlanmıştır. Bu karışım dizaynı çalışmasında CEM I ve CEM II çimentosundan ayrı ayrı 96 numune olacak biçimde toplam 192 numune hazırlanmıştır.

Akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların priz süresine olan olumsuz etkilerinden dolayı priz hızlandırıcı katkıların ilave edilerek karışım içerisindeki etkileri incelenmiştir. Karışımda akışkanlaştırıcı katkıları %1 ve %2 oranlarında ve priz hızlandırıcı katkı ise %0,5 ve %1 oranlarında eklenmiştir. Karışımın yüzdeleri Tablo 2.4'te görülmektedir. Karışımların çökme değeri 20 cm olacak şekilde hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerden her bir kür süresi için 3 adet oluşturulmuş ve dayanım deneyleri için bu numunelerin ortalamaları alınmıştır. Priz sürelerinin belirlenmesi için numunelerden vikat deney aleti haznesine yetecek kadar malzeme alındıktan sonra deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu karışım dizaynı çalışmasında priz hızlandırıcının 0,5 oranında olduğu CEM I ve CEM II çimentosu kullanılan karışımlarda toplam 192 numune hazırlanmış ve priz hızlandırıcının 1,0 oranında olduğu CEM I ve CEM II çimentosu kullanılan karışımlarda toplam 192 numune hazırlanmıştır. Her iki priz hızlandırıcı oranı için toplam 384 numune oluşturulmuştur.

Tablo 2.3. Farklı oranlarda ve farklı tipte akışkanlaştırıcı katkıları ve çimento ile hazırlanan karışım tasarımı

Çimento tipi		CEM I								CEM II							
Katkı Miktarı (*)		1%				2%				1%				2%			
Çimento-Kül Oranı (ağırlıkça)		22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80
Katkı Tipi	NA	●	●			●	●			●	●			●	●		
	SA			●	●			●	●			●	●			●	●
KÜR SÜRESİ	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	28	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	90	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

(\*) Çimentonun %'si olarak alınacak.

Tablo 2.4. Farklı oranlarda akışkanlaştırıcı katkıların dolgu içerisindeki etkilerinin değişik priz hızlandırıcı oranları ile incelenmesi için yapılan karışım tasarımı

Cam Suyu		0,5															
Çimento tipi		CEM I								CEM II							
Çimento-Kül Oranı (ağırlıkça)		22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80
Katkı Tipi ve Miktarı (%)	NA	1	1			2	2			1	1			2	2		
	SA			1	1			2	2			1	1			2	2
KÜR SÜRESİ	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	28	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	90	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Cam Suyu		1															
Çimento tipi		CEM I								CEM II							
Çimento-Kül Oranı (ağırlıkça)		22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80	22,5-77,5	20-80
Katkı Tipi ve Miktarı (%)	NA	1	1			2	2			1	1			2	2		
	SA			1	1			2	2			1	1			2	2
KÜR SÜRESİ	2	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	7	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	28	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	90	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Dolgu içerisinde büyük bir paya sahip olan uçucu kül malzemesinin daha ince boyutlarda dolgu içerisindeki etkilerini incelemek için uçucu küllere öğütme yapılmıştır. 5 dk ve 15 dk öğütme yapılan kül malzemesinden 5 dk öğütülen malzeme ağırlıkça atık malzeme yerine %100 ve %40, 15 dk öğütülen malzeme ise %100, %5, %10 ve %20 ilave edilerek karışım dizaynı gerçekleştirilmiştir (Tablo 2.5). Öğütülmüş uçucu kül kullanılan bu karışım dizaynında toplam 54 numune hazırlanmıştır.

Tablo 2.5. Öğütülen (5-15 dk) uçucu külün normal kül yerine ilave edildiği karışım miktarları tablosu

Çimento tipi		CEM II				
Çimento-Kül Oranı (ağırlıkça)		25-75				
Atık kül yerine ikame oranı (%)		5	10	20	40	100
Öğütme Dakikası	5				●	●
	15	●	●	●		●
KÜR SÜRESİ	2	✓	✓	✓	✓	✓
	7	✓	✓	✓	✓	✓
	28	✓	✓	✓	✓	✓

### 2.3.1. Karışım Malzeme Miktarı Hesabı

Dolgu karışımlarında karışım miktarları beton karışımlarında olduğu gibi hacim hesabına göre yapılmaktadır. Çalışmada başlangıçta sabit bir hacim alınarak o hacme göre karışım dizaynındaki oranlardan yola çıkarak malzeme miktarları hesaplanmıştır.

Örnek karışım; Karışım tasarımında hacim hesabı yöntemi kullanılır ve  $1 \text{ m}^3$  hacimden yola çıkılarak malzeme miktarları hesaplanır (Eşitlik 7.). Ancak bu hesaplamada karışıma girecek malzeme miktarları belli olduğundan malzemelerin ne kadar hacim kapladığı hesaplanmış ve sonrasında kullanılacak olan kalıp hacmine yetecek kadar malzeme miktarı belirlenmiştir.

$$\frac{C}{\rho_c} + \frac{P}{\rho_p} + \frac{K}{\rho_k} + V_s + \frac{W_a}{\rho_a} + A = 1000 \text{ dm}^3 \quad (7)$$

Burada;

$C$  : Karışıma girecek çimentonun miktarı (kg),

$P$  : Çimentoya ilâve olarak kullanılacak mineral katkı (puzolan) miktarı (kg),

$K$  : Karışımda kullanılacak kimyasal katkı miktarı (kg),

$\rho_c$  : Çimentonun yoğunluğu ( kg/dm<sup>3</sup>),

$\rho_p$  : Mineral katkı (puzolan) malzemenin yoğunluğu (kg/dm<sup>3</sup>),

$\rho_k$  : Kimyasal katkının yoğunluğu (kg/dm<sup>3</sup>),

$V_s$  : Karışıma girecek suyun hacmi (dm<sup>3</sup>),

$W_a$  : Karışıma girecek agreganın miktarı (kg),

$\rho_a$  : Agreganın ortalama özgül kütlesi (g/cm<sup>3</sup>) veya (kg/dm<sup>3</sup>),

$A$  : Betondaki toplam hava miktarı (%) dir.

Örnek malzeme hesabı için %25-75 çimento-kül karışımına katının ağırlıkça %1'i priz hızlandırıcı katkı ilavesi olan karışım seçilmiştir. Burada çimento ve kül miktarı belli su miktarı ise 20 cm çökme değerini tutturabilmek için ilave edilerek hesaplanmıştır. Çayırhan İşletmesi Maden Laboratuvarında yapılan karışım deneylerinden yola çıkarak çökme değerini belirleyebilmek için gerekli olan katı malzeme miktarı (çimento + kül) 8700 gr olarak tespit edilmiştir. Bütün bu verilerden yola çıkarak bu malzemelerin ne kadar hacim kaplayacağı hesaplanmış ve değişen oranlardaki bütün karışımlar o hacme göre yeniden hesaplanmıştır. Bu hesaplamalarda agrega kullanılmadığından hacim hesabına katılmamıştır. Hava miktarı ise sıfır alınmıştır.

Çimento : 2175 gr

Kül : 6525 gr

Su : 2160 gr

Priz hızlandırıcı : 87 gr

Çimento özgül ağırlığı : 3,10 gr/cm<sup>3</sup>

Külün özgül ağırlığı : 2,15 gr/cm<sup>3</sup>

Suyun özgül ağırlığı : 1,00 gr/cm<sup>3</sup>

Priz hız. öz. ağırlığı : 1,38 gr/cm<sup>3</sup>

$$\text{Çimento hacmi} : \frac{Ç}{\rho_{\text{ç}}} = \frac{2175 \text{ gr}}{3,1 \text{ gr/cm}^3} = 701,6 \text{ cm}^3$$

$$\text{Kül hacmi} : \frac{P}{\rho_p} = \frac{6525 \text{ gr}}{2,15 \text{ gr/cm}^3} = 3034,8 \text{ cm}^3$$

$$\text{Su hacmi} : V_s = \frac{2160 \text{ gr}}{1,0 \text{ gr/cm}^3} = 2160 \text{ cm}^3$$

$$\text{Katkı hacmi} : \frac{K}{\rho_k} = \frac{87 \text{ gr}}{1,38 \text{ gr/cm}^3} = 63 \text{ cm}^3$$

$$\text{Toplam hacim} : 5959 \text{ cm}^3$$

Seçilen karışım ve yapılan bütün karışımlardaki malzeme miktarları sabit bir hacimde ( $5958 \text{ cm}^3$  olarak) hesaplanmış ve karışım miktarları bu hacme göre belirlenmiştir.

Karışımın  $1 \text{ m}^3$ 'teki malzeme miktarları ise öncelikle hacmi metreküpe ve ağırlığı kilograma çevrim yapılarak aşağıdaki doğru orantı yöntemiyle hesaplanmıştır:

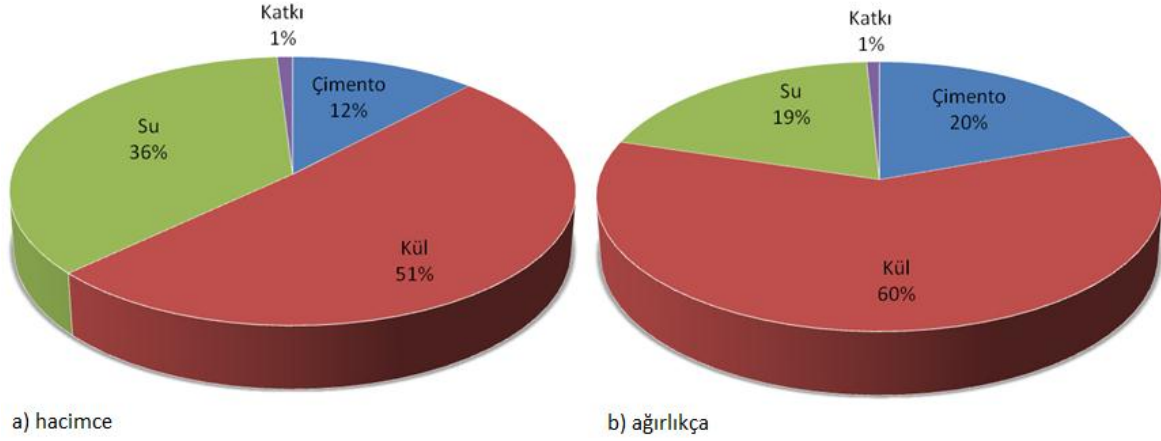
$$\text{Çimento miktarı} : \frac{0,005959 \text{ m}^3}{1 \text{ m}^3} \frac{2,175 \text{ kg}}{X} = 365 \text{ kg}$$

$$\text{Kül miktarı} : \frac{0,005959 \text{ m}^3}{1 \text{ m}^3} \frac{6,525 \text{ kg}}{X} = 1095 \text{ kg}$$

$$\text{Su miktarı} : \frac{0,005959 \text{ m}^3}{1 \text{ m}^3} \frac{2,160 \text{ kg}}{X} = 362,4 \text{ kg}$$

$$\text{Katkı miktarı} : \frac{0,005959 \text{ m}^3}{1 \text{ m}^3} \frac{0,087 \text{ kg}}{X} = 14,6 \text{ kg}$$

Hesaplanan örnek dolgu karışımının  $1\text{m}^3$ 'ü içerisinde toplam 1837 kg (çimento + kül + su + katkı) malzeme bulunmaktadır. Bütün karışımlardaki malzemelerin hacimce ve ağırlıkça yaklaşık olarak dolgu içerisinde bulunduğu oranları Şekil 2.2'de görülmektedir.

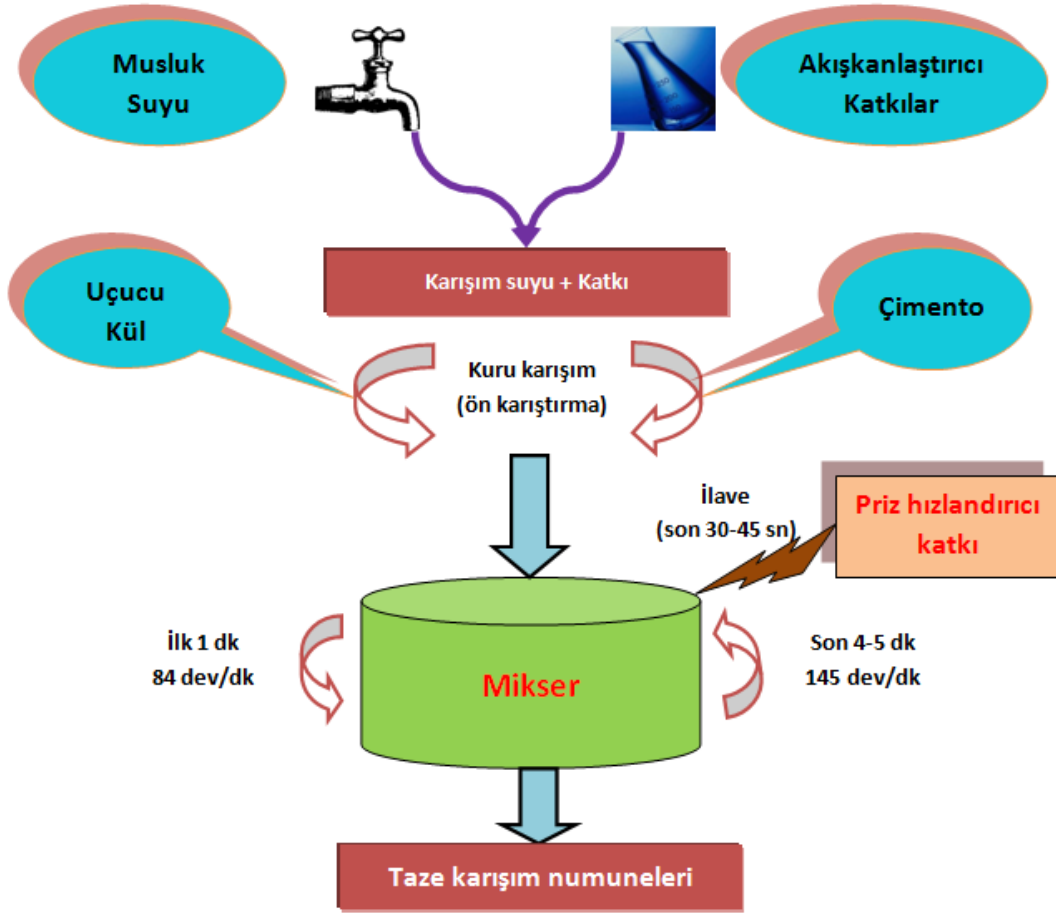


Şekil 2.2. Bütün karışımlar için malzemelerin dolgu kalıbı içerisinde hacimce ve ağırlıkça yaklaşık bulunma oranları

### 2.3.2. Karışım Numuneleri Hazırlama

Tasarım sonrasında miktarları hesaplanan malzemelerden laboratuvar ortamında dolgu numunesi oluşturmak için Şekil 2.3'teki akış diyagramı izlenmiştir.

Numunelerin hazırlanmasında 20 lt kapasiteli çimento mikseri kullanılmıştır (Şekil 2.4a). 1,5 HP motor gücünde olan mikserin karıştırma aparatı 3 farklı devir hızına (84/145/352 dev/dk) sahiptir. Karışım malzemesi ilk önce demir bir çubuk yardımıyla karışım kovası içerisinde karıştırıldıktan sonra makineye yerleştirilmiştir (Şekil 2.4b). Ön karışımı sağlanan malzemeler karıştırma makinesi içerisinde 5-6 dk karıştırıldıktan sonra numune kalıplarına yerleştirmek üzere çıkarılmıştır. Karıştırma süresinin ilk 60 saniyesi birinci devir hızında sonraki 4-5 dk'lık zamanı ikinci devir hızında yapılmıştır (Şekil 2.3).



Şekil 2.3. Karışım numuneleri hazırlama akış diyagramı

Karışım suyunun bir kısmı ilk karıştırma evresinde malzemeye katılmış (Şekil 2.4b) diğer kısmı ise mikserde ilk 30-45 sn içerisinde ilave edilmiştir. Bütün numuneler sabit bir kıvamda (20 cm çökme değeri) yapıldığından bu kıvamı yakalamak için ilave olarak yeteri miktarda su, gözleme dayalı olarak eklenmiştir. Kimyasal katkı maddelerinin ilavesinde ise akışkanlaştırıcı katkıların daha etkin olması amacıyla karışım suyunun içine ilave edilerek (Şekil 2.5) ilk karıştırma anında karışım kovalasına eklenmiştir, priz hızlandırıcı katkı ise dolgu içerisinde püskürtme esnasında karışıma dahil olduğundan laboratuvar ortamında 5-6 dk süren karışımın son 30-45 sn zamanında ilave edilmiştir.

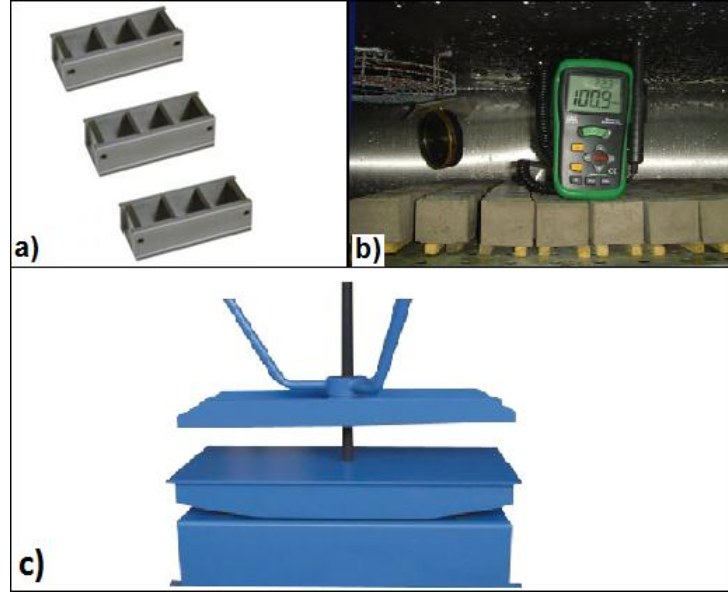


Şekil 2.4. Dolgu karışımında kullanılan mikser (a), karışım malzemelerinin miksere konulmadan yapılan ön karıştırma işlemi (b)



Şekil 2.5. Karışımda kullanılan kimyasal katkılar

Karışım sonrasında malzemeler 50x50x50 mm'lik küp numune kalıplarına doldurulmuştur (Şekil 2.6a). Malzeme karışımdan sonra kalıplara doldurulurken şişleme çubuğu ile yaklaşık 25 defa şişlendikten sonra kalıbın içerisine yerleştirilmiştir. Kalıba yerleştirilen numuneler daha sonrasında içerisinde hava boşluğu kalmayacak şekilde vibrasyon masasında yaklaşık 180 sn boyunca titreşime tabi tutulmuştur (Şekil 2.6c). Sonrasında nemli bir ortamda 1 gün bekletilen numuneler kalıplarından çıkartıldıktan sonra en az %90 nem oranına ve yaklaşık 20-22 °C hava şartlarına sahip numune saklama dolabında gerekli görülen kür süresi kadar bekletilmiştir (Şekil 2.6b).



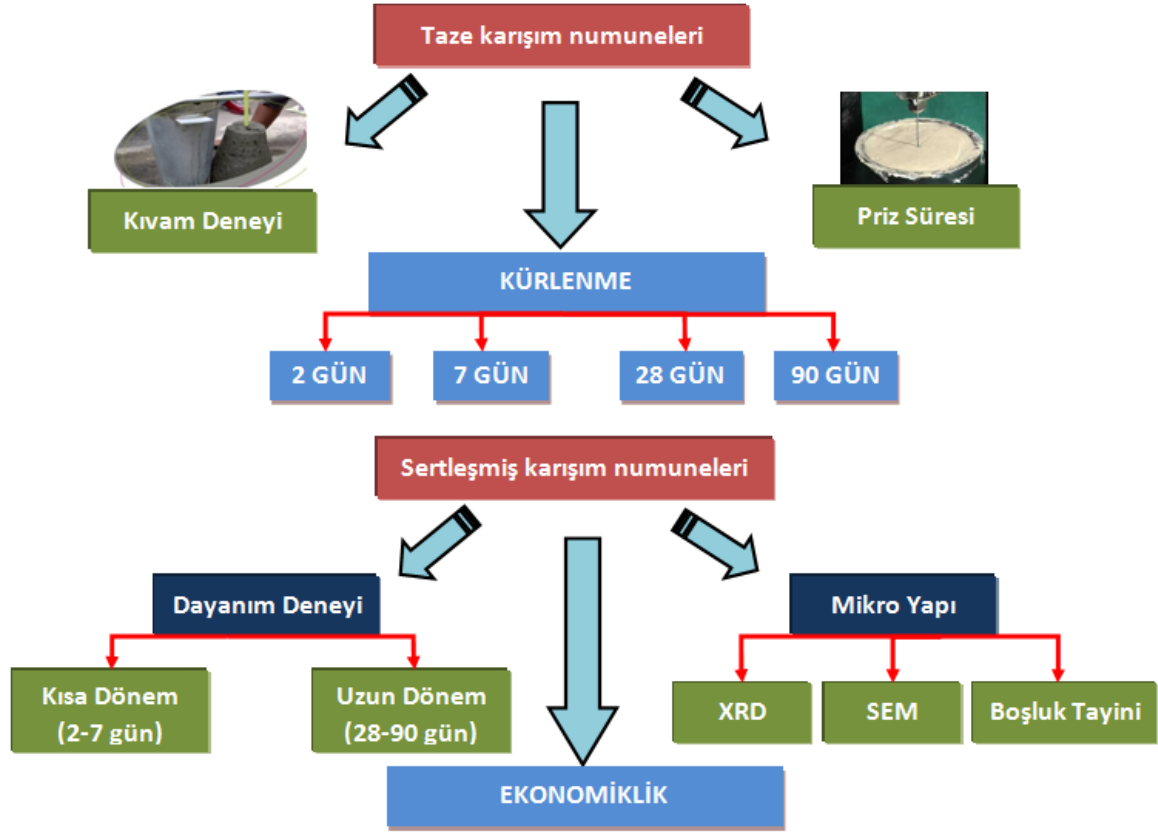
Şekil 2.6. Çalışmada kullanılan numune kalıpları (a), numunelerin bırakıldığı kür ortamı (saklama dolabı) (b) ve taze karışım numunelerinin kalıplandıktan sonra tabi tutulan vibrasyon masası (c)

## 2.4. Numunelere Yapılan Deneyler

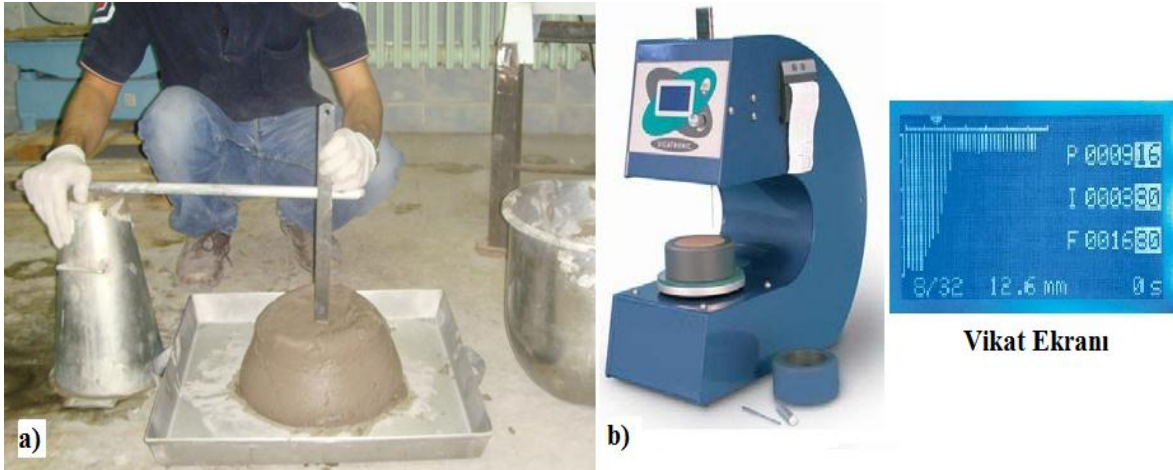
Karışım sonrasında oluşturulan dolgu numunelerine hem taze halde iken hem de sertleşmiş halde iken bazı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Şekil 2.7’de yapılan çalışmalara ait bir akış çizelgesi görülmektedir. Oluşturulan numunelere henüz küre tabi tutulmadan yani taze halde iken kıvam deneyi ve priz süreleri deneyi yapılmıştır. Kürlendikten sonra ise çeşitli dayanım testleri ve mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. Numunelerin kür süreleri 2, 7, 28 ve 90 gün olarak belirlenmiştir.

### 2.4.1. Taze Numunelere Yapılan Deneyler

Karışım tasarımı ile belirlenen miktarlar sonrasında karıştırma işlemi yapılan malzemeye taze haldeyken iki farklı deney yapılmıştır. Karışımın kıvamını belirlemek için çökme (slump) deneyi (Şekil 2.8a) ve karışımın priz başlangıç-bitiş sürelerini belirlemek için ise vikat deney aleti ile priz süresi tayini deneyi yapılmıştır (Şekil 2.8b). Karışımın kıvam değerine etkileyen bazı parametreler vardır ancak bütün karışımların kıvamı aynı değerde olduğu için S/Ç oranına etkileyen parametreler bulunmuştur. S/Ç oranına etkileyen parametreler Şekil 2.9’da gösterilmiştir.



Şekil 2.7. Taze ve sertleşmiş numunelere yapılan deneysel çalışmaların akış şeması



Şekil 2.8. Taze karışıma yapılan çökme deneyi (a) ve priz başlangıç-bitiş süresi ölçer vikat deney aleti (b)

Betonda kıvam belirlemek için standartlarda bulunan taze beton deneyleri kapsamında TS EN 12350-2'ye göre deney yapılmıştır. Taze karışım, kalıba eşit kalınlıkta üç tabaka halinde ve her tabakanın sıkıştırılmış durumdaki kalınlığı kalıp yüksekliğinin

yaklaşık olarak 1/3'ü olacak şekilde doldurulmuştur. Doldurma esnasında her tabaka, sıkıştırma çubuğu ile en az 25 defa şişlemek kaydıyla sıkıştırılmıştır. Daha sonra kalıp, el tutamaklarından tutularak, düşey şekilde yukarıya doğru 2-4 saniye sürede çekilerek alındı. Kalıbın üst yüzeyi ile çöken malzemenin en üst yüzeyi arasındaki mesafe çökme değeri olarak ölçüldü.

Priz başlangıç-bitiş süresi için ise TS EN 13409 Priz Süresi Tayini deney metodu ile otomatik vikat aleti kullanılarak yapılmıştır. Priz süreleri vikat haznesine yerleştirilen malzemeye vikat iğnesinin 10 dk aralıklarla batmasıyla ölçülmüştür. 40 mm boyu olan vikat haznesine doldurulan taze karışımda iğnenin 4 mm ( $\pm 1$ ) yukarıda kalmasıyla priz başlangıç, 0,5 mm'ye kadar girmesiyle de priz bitiş süresi hesaplanmıştır. Priz sürelerine etkileyen parametreler ise Şekil 2.10'da gösterilmiştir.



Şekil 2.9. S/Ç oranını etkileyen parametreler



Şekil 2.10. Priz süresini etkileyen parametreler

#### 2.4.2. Sertleşmiş Numunelere Yapılan Deneyler

Taze karışım sonrasında oluşturulan numuneler kür ortamında belirlenen kür süresi kadar bekletilmiştir. Kür süresi sonunda numunelere tek eksenli basma dayanımı deneyi yapılarak sonuçları elde edilmiştir. Numunelerin tek eksenli basma dayanımına çeşitli parametreler etki etmektedir (Şekil 2.11). Bu parametrelerin etkileri bulunarak bulgular kısmında paylaşılmıştır. Kür süreleri sonunda sertleşmiş numunelerin hepsine tek eksenli

basma dayanım deneyi (Şekil 2.12a), bir kısmına ise o numunelerden elde edilen parçalara SEM analizi (Şekil 2.12b), XRD analizi (Şekil 2.12c) ve civa porozimetresi (boşluk tayini) deneyi (Şekil 2.12d) yapılmıştır.

Tek eksenli basma dayanım deneyi TS EN 196-1 Çimentolarda Dayanım tayini deney standartına göre yapılmıştır. Deney için kullanılacak numuneler 2400 ( $\pm$  200) N/s yükleme hızı ayarlanan basma dayanım aletine yerleştirilmiş ve basma dayanım deney sonuçları elde edilmiştir.



Şekil 2.11. Tek eksenli basınç dayanımına etki eden parametreler



Şekil 2.12. Sertleşmiş numunelere yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan cihazlar; tek eksenli basma dayanım aleti (a), SEM analizi deney aleti (b), XRD analizi deney aleti (c) ve civa porozimetresi deney aleti (d)

SEM analizleri 90 günlük kür süresi sonunda numunelerden alınan küçük parçalara gerçekleştirilmiştir. Analizlerin bir kısmı Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği Laboratuvarında diğerleri ise KTÜ Metalürji Mühendisliği Bölümü Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. İletken olmayan numuneler püskürtme (sputtering) cihazı ile iletken bir tabaka (Au) ile kaplanmış ve sonrasında analiz gerçekleştirilmiştir.

XRD analizleri için 90 günlük numunelerden homojen bir biçimde elde edilen küçük parçalar halkalı değirmende un kıvamına kadar öğütülmüştür. Analizler KTÜ Fizik Bölümü Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Analizler  $2\theta^\circ$  derecesinde ve 5-70 şiddet aralığında yapılmıştır.

Civa porozimetresi deney için 90 günlük numunelerden yaklaşık 1 cm en ve 2 cm boy oranını geçmeyecek şekilde deney için küçük parçalar alınmıştır. Bu parçalar Yıldız Teknik Üniversitesi Merkez Laboratuvarına gönderilmiş ve yapı biriminde bulunan PM60 isimli deney cihazında gerçekleştirilmiştir.

Numunelere yapılan mikro yapı incelemelerinde priz hızlandırıcı ve akışkanlaştırıcı katkıların etkileri incelenmiştir (Şekil 2.13).



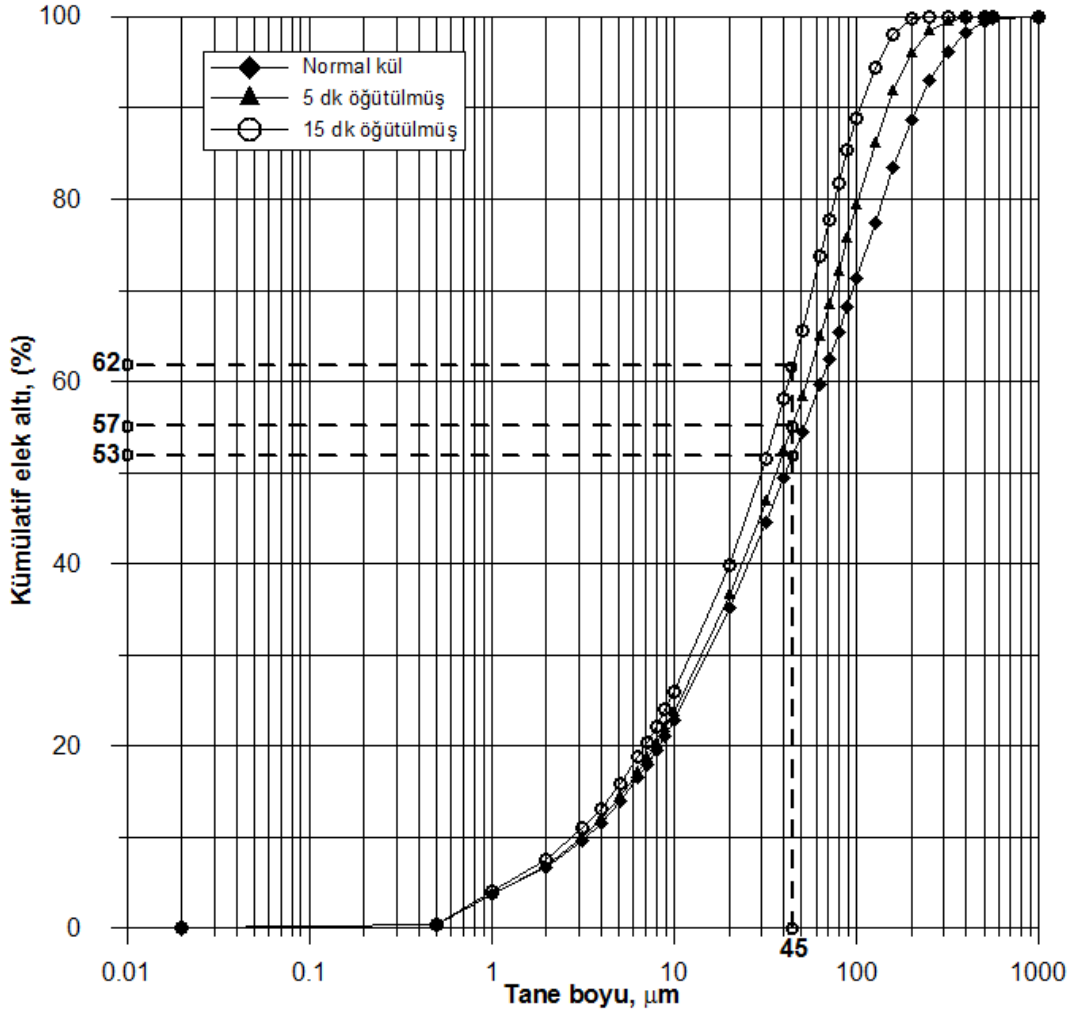
Şekil 2.13. Mikro yapıya etki eden parametreler

### 3. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

#### 3.1. Malzemelerin Karakterizasyonu

##### 3.1.1. Uçucu Kül (Atık Malzeme)

Tane boyu analizi; Deneysel çalışmada atık malzeme olarak kullanılan normal ve öğütülmüş uçucu küllere yapılan tane boyu analizi deneyi sonuçları Şekil 3.1’de görülmektedir.



Şekil 3.1. Uçucu küllerin tane boyu analizleri

Analiz sonucunda normal uçucu külün 45 µm altı malzeme miktarı yaklaşık %53 ve 20 µm altı malzeme ise %35'dir. 5 dk öğütülmüş malzemenin 45 µm altı malzeme miktarı yaklaşık %57 ve 20 µm altı malzeme ise %37'dir. 15 dk öğütülmüş malzemenin ise 45 µm altı malzeme miktarı yaklaşık %62 ve 20 µm altı malzeme ise %40'dır.

Uçucu külün betonda kullanımına yönelik hazırlanan standartlarda 45µm altı malzeme miktarının %60'ın altına düşmemesi gerektiği belirtilmiştir (TS EN 450-1/A1). Standartda belirtilen bu kriter uçucu külün puzolanik aktivitesi ile alakalıdır. Malzeme inceliği puzolanik aktivite indeksini artırmaktadır. Pan vd. (2003) yaptıkları çalışmalarında uçucu küle mekanik öğütme yaparak inceltmiş ve aktivite dayanım indekslerini incelemiştirler. Yaptıkları çalışmalarında malzemenin tane boyunun inceliğinin artmasıyla aktivite dayanımının arttığını belirtmişlerdir. Ancak Felekoğlu vd. (2009) çalışmalarında fazla öğütme yapılan malzemelerde yüzey alanının arttığını ve bu durumun ise su ihtiyacını arttırdığını belirtmişlerdir. Su ihtiyacını çok artması hidrasyon için yeteri kadar su olmadığı anlamına gelmektedir. Çalışmalarında öğütülmüş malzeme içerisinde daha iri malzemelerle hazırlanan harçların dayanımının çok ince öğütülmüş tanelerle hazırlananlardan yüksek olduğunu belirtmişlerdir. Bundan dolayı optimum tane inceliğinin bulunması gerekliliğini ifade etmişlerdir.

Dolgularda genellikle farklı tipte atık ve kayaç malzemeler kullanıldığı için tane boyu dağılımına yönelik herhangi bir standart yoktur. Buna rağmen dolguda kullanılacak malzemenin tane boyu dağılımının iyi bilinmesi gerekmektedir. Malzemenin tane boyu dağılımı dolguda nakliye işlemini etkilemektedir. İyi bir boyut dağılımına sahip olmayan dolgu malzemesini yerleştirileceği alana homojen bir şekilde transfer etmek zor olmaktadır. Bu transfer sonrasında kalıp içerisindeki dolguda bir ayrışma ve sınılaşma görülmekte ve bu durumda da dolgunun uzun dönemli dayanım ve dürabilitesi olumsuz yönde etkilenmektedir. Genellikle dolgu karışımı içindeki malzemenin optimum bir tane boyu dağılımı göstermesi için her tane boyut aralığından malzeme içermesi gerekmektedir.

Macun dolguda 20 µm altı malzeme oranının %15'ten az olmaması gerekmektedir (Brakebusch, 1994). Atık malzeme uçucu külün 20 µm altı malzeme oranının %35 olması dolgu için macun kıvamı sağlayacak koloidal yapıya sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca ince boyutlu malzemelerin iri taneler arasında kalan boşlukları doldurmak sureti ile düşük çimento içeriklerinde yüksek dayanım verdiği de bilinmektedir (Yılmaz, 2003).

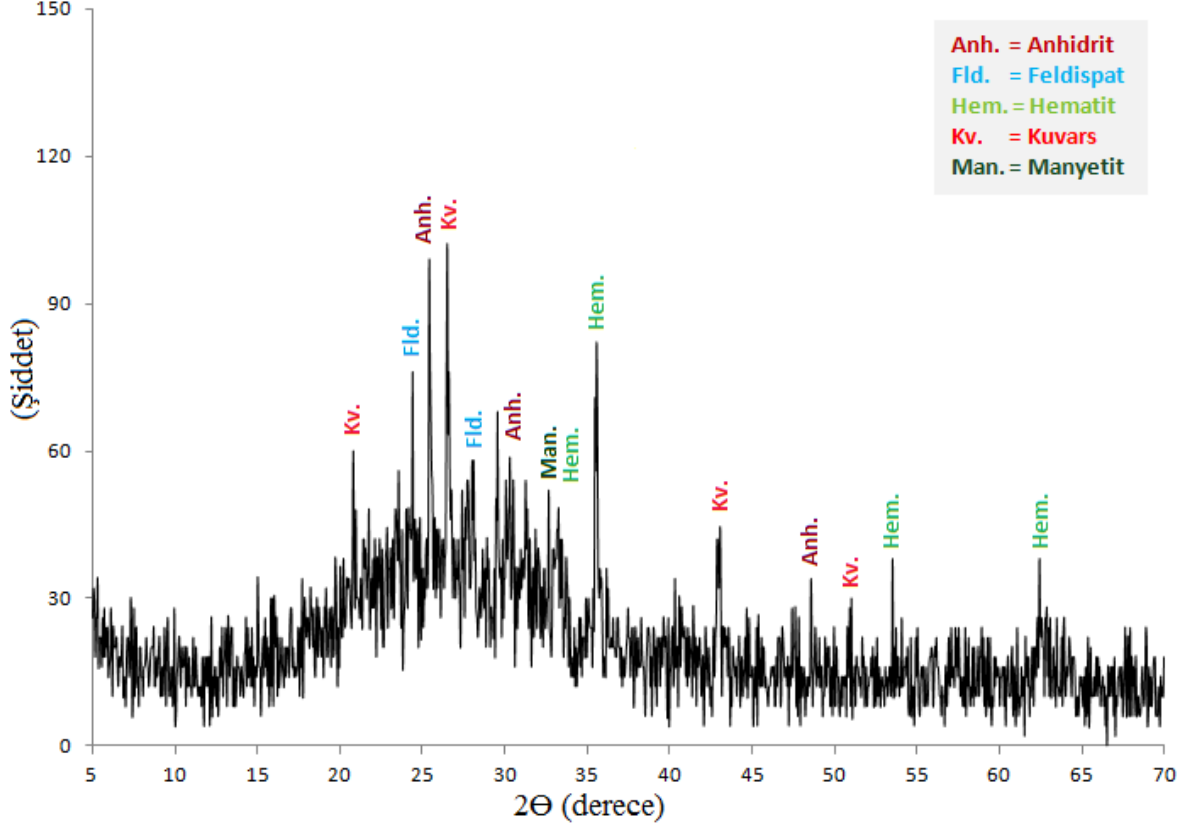
Kimyasal analiz; Uçucu külün kimyasal analizine yönelik çalışmalar TÇMB’de yapılmıştır (Tablo 3.1). Analizler sonucunda santral atığı uçucu külüm S+A+F toplamının >70 olması dolayısıyla ASTM C618’e göre F sınıfı (düşük kireçli) kül standartına girdiği tespit edilmiştir. Ayrıca TS EN 450-1’e göre S+A+F toplamının >70 olduğu ve bu standarta uygunluğu belirlenmiştir. CaO miktarı %10’dan büyük olduğundan kireçsi kül sınıfına da girmektedir. Uçucu külün kızdırma kaybı, reaktif silis ve Cl<sup>-</sup> miktarı standart sınırları içerisinde. Ancak TS EN 450/A1’e göre SO<sub>3</sub> miktarı >%3 olduğundan standarta uygun değildir.

Tablo 3.1. Uçucu külün kimyasal analizi ve standartları ile karşılaştırması

Oksit (%)	Uçucu Kül	Standartlar				
		ASTM C 618		TS EN 197-1		TS EN 450-1
		F	C	V	W	
SiO <sub>2</sub>	50,38					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,06	>70	>50		>70	
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9,9					
<b>S+A+F</b>	<b>74,34</b>					
CaO	13,25					
MgO	1,2				<4	
SO <sub>3</sub>	3,16	<5	<5		<3	
K <sub>2</sub> O	1,97					
Na <sub>2</sub> O	3,18				<5	
KK	0,86	<5	<5	<5	<5	
Cl <sup>-</sup>	0,17				<1	
Serb. CaO	0,91			<10	>10	<2,5
Reak. SiO <sub>2</sub>	40,89			>25	>25	>25
Reak. CaO	8,78					<10

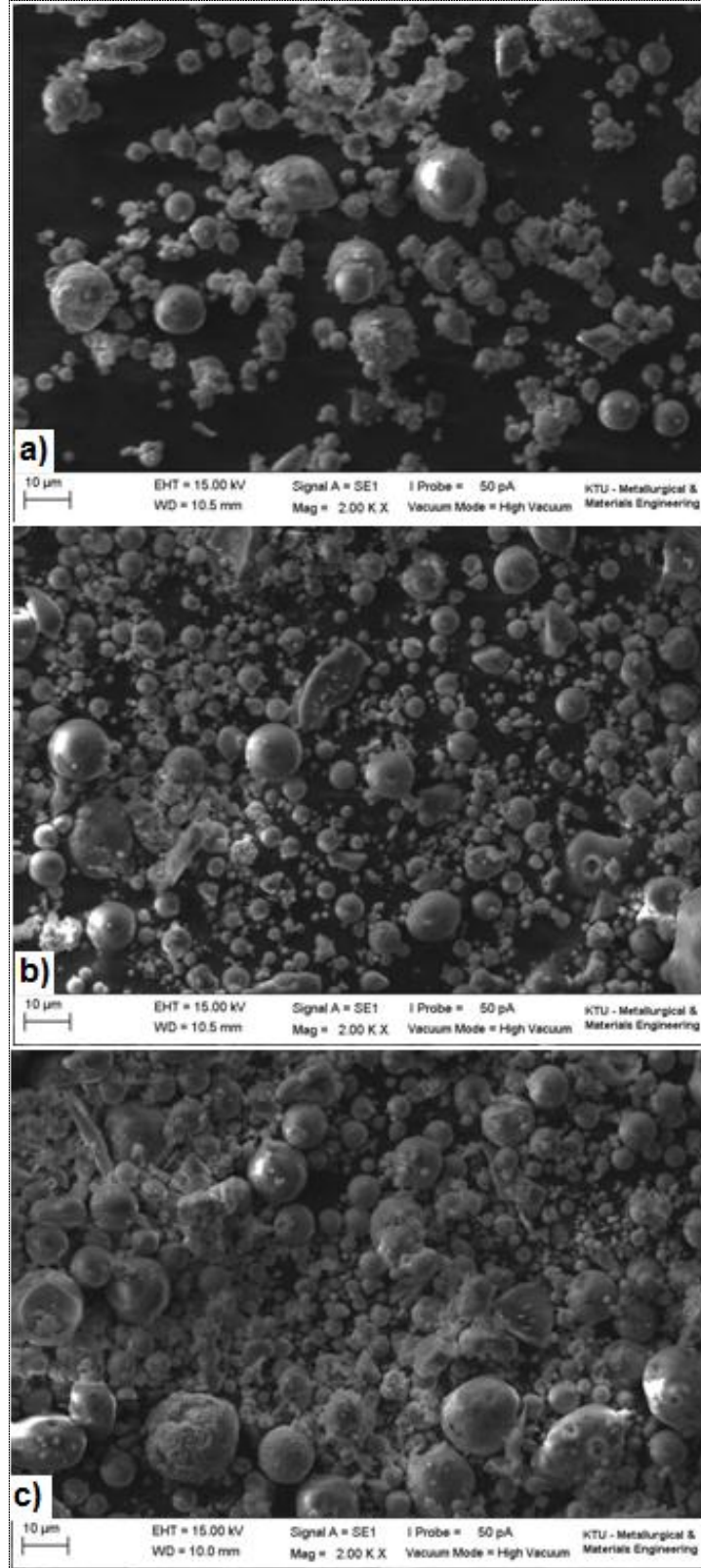
Uçucu külün mineralojik yapısı; Uçucu külün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı Şekil 3.2’de görülmektedir. Uçucu külün mineralojik yapısında XRD sonuçlarına göre anhidrit, hematit, kuvars, manyetit, feldispat gibi mineraller bulunmaktadır. Yapı incelendiğinde özellikle camsı ve kristalize fazlardan oluştuğu görülmektedir. Bazı kaynaklarda mullit gibi kil minerallerinin varlığına da rastlanmıştır. Bunlar kömürün arazideki jeolojik ortamda bünyesinde barındırdığı killerden kaynaklı

olduğu düşünülmektedir. Bu tip maddelerin yüksek sıcaklık altında farklı minerallere dönüştüğü bilinmektedir (Erol vd., 2008; Türker vd., 2009).



Şekil 3.2. Uçucu külün mineralojik bileşimine ait X-ışınları difraktogramı

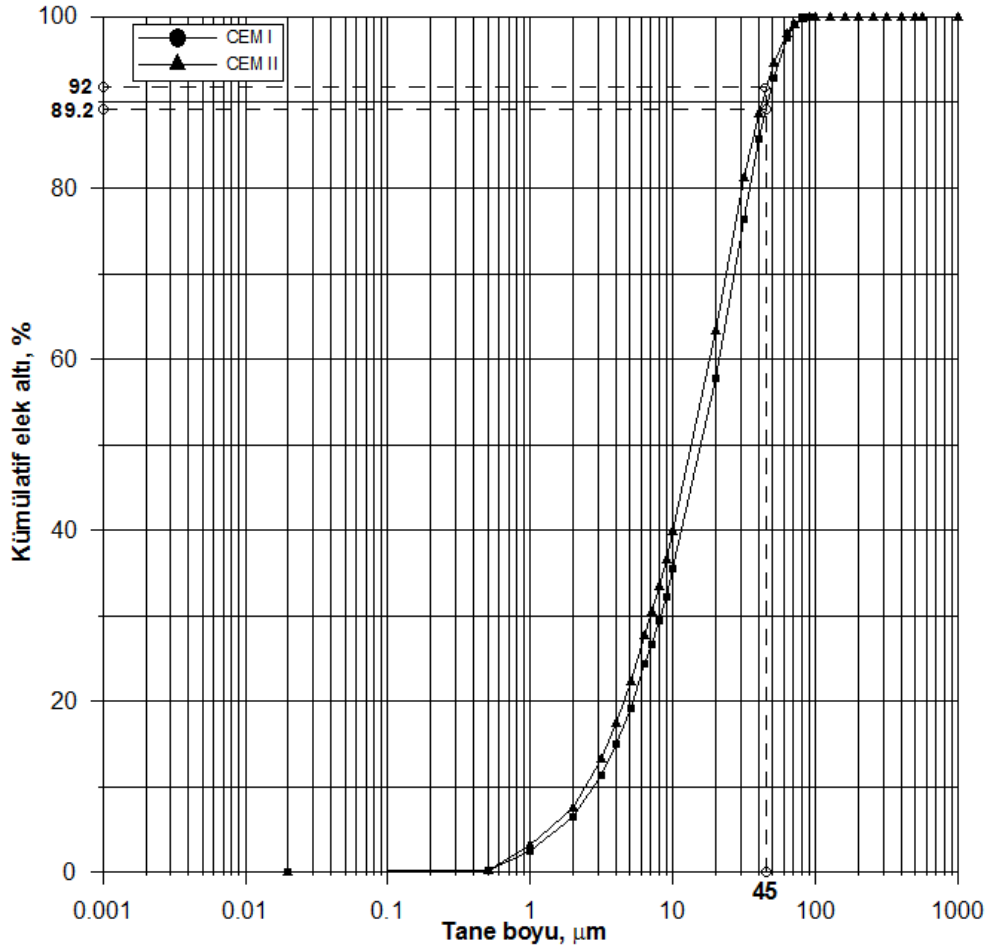
Uçucu küllerin mikroskobik yapısı; Uçucu küllere ait taramalı elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 3.3'te verilmiştir. Şekil incelendiğinde uçucu küllerin tipik tanecik morfolojisi olan küresel biçimli yapı göze çarpmaktadır. Malzemenin öğütülmesiyle iri taneler arasındaki ince malzeme miktarının arttığını şekilden görmekteyiz.



Şekil 3.3. Uçucu küllere ait SEM görüntüsü, normal kül (a), 5 dk öğütülmüş kül (b) ve 15 dk öğütülmüş kül (c)

### 3.1.2. Çimento

Tane boyu analizi; Yapılan tane boyu analiz testinde CEM II 42,5 çimentosunun hacimce yaklaşık %92'si 45  $\mu\text{m}$ 'nin altında, CEM I 42,5 R tipli çimentonun ise yaklaşık %89,2'i 45  $\mu\text{m}$ 'nin altındadır. CEM I ve CEM II çimentolarına ait tane boyu dağılım grafiği Şekil 3.4'te görülmektedir.



Şekil 3.4. CEM I ve CEM II çimentosuna ait tane boyu analizi

Çimentoların kimyasal analizleri; Çimentoların kimyasal analizleri TÇMB Laboratuvarında yaptırılmıştır. Bazı değerler TS EN 196-2 yöntemine göre bazıları ise XRF yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçların TS EN 197-1'e göre uygun olduğu tespit edilmiştir (Tablo 3.2).

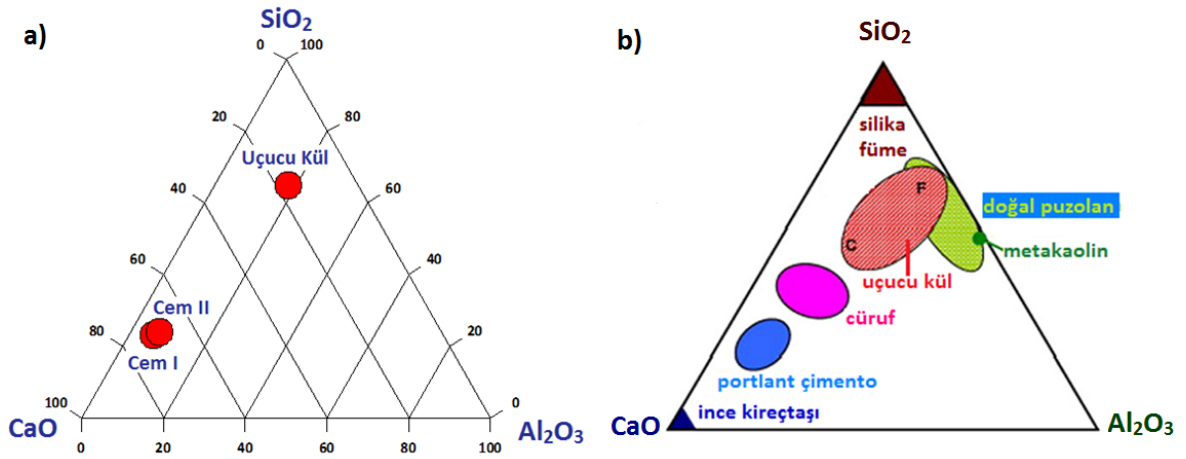
Tablo 3.2. Çimentolara ait kimyasal analiz sonuçları, standartlar ve kimyasal bileşenleri

Oksit (%)	Cem I	Cem II	Standartlar		Kimyasal Bileşenler	
			TS EN 197-1	Bileşen (%)	Cem I	Cem II
SiO <sub>2</sub>	19,61	20,98		C <sub>3</sub> S	55,00	49,19
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,86	6,25		C <sub>2</sub> S	14,73	4,91
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,10	3,19		C <sub>3</sub> A	7,63	5,62
CaO	61,35	59,74		C <sub>4</sub> AF	9,43	9,38
MgO	2,92	1,43		<b>Fiziksel Özellikleri</b>		
SO <sub>3</sub>	3,03	3,01	<4	Özgül Ağırlık	3,11	3,09
K <sub>2</sub> O	0,65	0,44		Priz Başlangıç	02:22	02:45
Na <sub>2</sub> O	0,38	0,56		Priz Sonu	03:10	03:10
Na <sub>2</sub> O (eşd.)	0,81	0,85		Blain Yüzey (g/cm <sup>2</sup> )	3603	4692
Cl	0,0148	0,0166	<0,1	<b>Mekanik Özellikler [Bas. Day. (MPa)]</b>		
KK	4,21	4,51	<5	2 gün min. 20	25,6	26
Çözünmeyen Kalıntı	1,82	-	<5	7 gün		
				28 gün min. 42,5	56,7	47,9
				C <sub>3</sub> S = Tri kalsiyum silika	C <sub>3</sub> A = Tri kalsiyum alümina	
				C <sub>2</sub> S = Di kalsiyum silika	C <sub>4</sub> AF = Tetra kalsiyum alümino ferrit	

CEM I çimentosu katkısız, doğal çimento sınıfındadır. %95-100 kalker ana bileşenli, %0-5 aralığında minör ilave bileşenlerden oluşan çimento türüdür. CEM II çimentoları ise katkılı çimento sınıfındadır. Çalışmada kullanılan çimentonun A-M (P-L) olması içerisinde %80-94 aralığında klinker ana bileşeni, %6-20 aralığında kalker (L) ve doğal puzolan (P) bileşeni olduğunu ifade eder (TS EN 197-1, 2002).

Çimentonun davranışlarını belirleyen bünyesindeki karma bileşenlerdir (C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A, C<sub>4</sub>AF) ve bu bileşenler “Bogue” formüllerinden yararlanılarak hesaplanmaktadır (Erdoğan, 2003). Kullanılan çimentolardan CEM I çimentosunun bileşenlerinin değerleri hesaplanmış CEM II'nin ise ilgili firmadan elde edilerek Tablo 3.2'te verilmiştir.

Çalışmada kullanılan malzemelerin (çimento ve uçucu kül) CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> içerikleri bakımından Scrivener ve Nonat (2011) kaynağından alınan standart çimentolu malzeme ternary grafiklerinin karşılaştırması Şekil 3.5'te verilmiştir. Grafiklerde uçucu külün F tipi küle daha yakın özellikte olduğu, çimentoların ise diyagramda belirlenen portlant çimento sınırları içerisinde olduğu görülmektedir.



Şekil 3.5. Çalışmada kullanılan çimentoların ve külün CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> ternary diyagramı (a), çimentolu malzemelerin CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> standart ternary diyagramı (b) (Scrivener ve Nonat, 2011).

### 3.1.3. Kimyasal Katkılar

Çalışmada kullanılan akışkanlaştırıcı kimyasal katkılara ait bazı özellikler Tablo 3.3'te görülmektedir. Kullanılan kimyasal katkıların özellikleri katkıların elde edildiği üretici firmadan alınmıştır. Normal akışkanlaştırıcı katkının kimyasal yapısı modifiye polimer esaslı, süperakışkanlaştırıcı katkının ise melamin sülfonat esaslıdır. Kimyasal katkıların beton içerisinde kullanım sarfiyatları üretici firma tarafından NA için çimento ağırlığının en az %0,4 ve en fazla %0,9'u, SA için en az %0,8 ve en fazla %3,0'ü olarak belirlenmiştir.

Tablo 3.3. Kullanılan kimyasal katkıların özellikleri

Özellik	Akışkanlaştırıcı Tipi	
	Normal Akışkanlaştırıcı	Süperakışkanlaştırıcı
Kimyasal yapı	Modifiye polimer esaslı	Melamin sülfonat polimeri esaslı
Yoğunluk	1,16–1,20 kg/l, 20°C'de	1,15–1,19 kg/l, 20°C'de
pH değeri	7–11	7–11
Sarfiyat (çimentonun)	%0,4–0,9	%0,8–3,0
Standart	TS EN 934–2	TS EN 934–2

Priz hızlandırıcı katkıya ait bazı özellikler ise Tablo 3.4'te verilmiştir. Priz hızlandırıcının kimyasal yapısı incelendiğinde  $N_2O/SiO_2$  oranı 1/3 olduğundan 3 modül cam suyu grubuna girmektedir. Bu tip kimyasal katkılar modül oranları ile tanımlanmaktadır ve silikatlı bileşiklerin alkalilere oranı ile ifade edilmektedir.

Tablo 3.4. Kullanılan priz hızlandırıcının kimyasal yapısı

Özellik	Değer
Toplam $Na_2O$ , kütlece %	8,43
Silikat Halindeki $Na_2O$ , kütlece %	8,37
$Na_2CO_3$ , kütlece %	0,09
Toplam $SiO_2$ , kütlece %	26,36
Kuru Madde, 600 °C bakiyesi, kütlece %	37
$Na_2O / SiO_2$ Oranı	1/3,0
Viskozite, cP (20 °C)	170
Asidite, pH birimi (%1'lik çözeltide)	11,5
Bağıl Yoğunluk, (27 °C / 27 °C) $gr/cm^3$	1,382

### 3.2. Taze Karışımlara Yapılan Çalışmalar

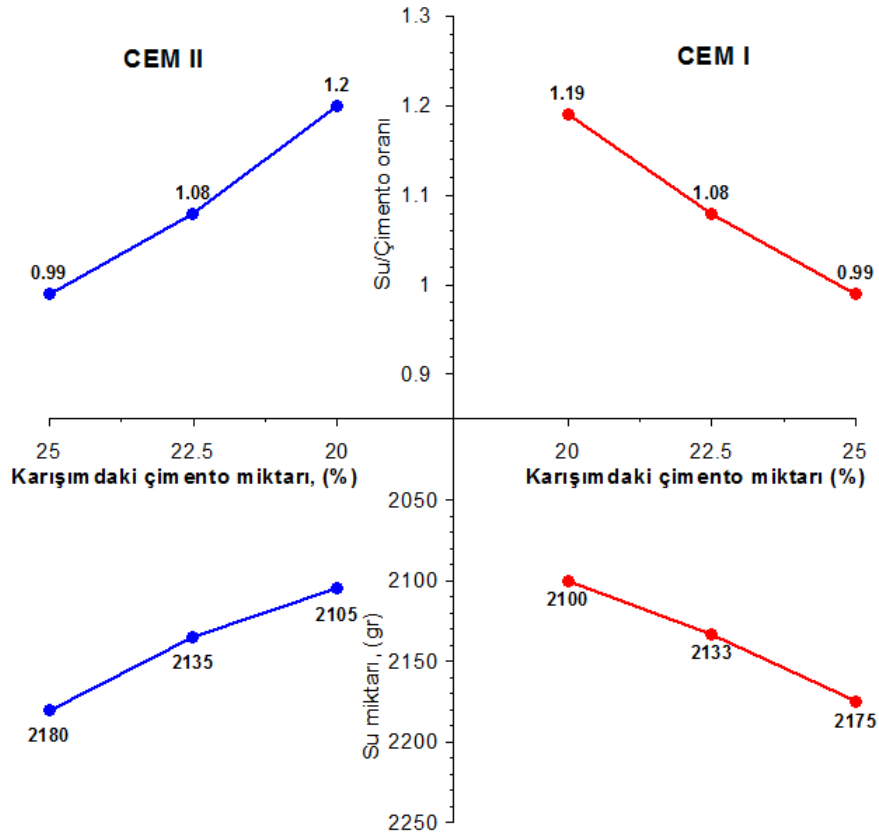
Taze karışımlara ilk olarak laboratuarda kıvam deneyi yapılmıştır. Oluşturulan bütün karışımların kıvamı yeraltı dolgusu ile aynı olacak biçimde oluşturulmuştur. Bundan dolayı tüm karışımlar kıvamı 20 cm çökme derecesinde olmak koşuluyla hazırlanmıştır. Burada birinci karışım oranında (%25 çimento ve %75 kül) kullanılan su miktarı ile çimentonun azaltılmasıyla oluşturulan ikinci (22,5-77,5) ve üçüncü (20-80) karışım oranlarındaki su miktarları arasında aynı kıvamda fark oluşmuştur. Çimento miktarı Su/Çimento (S/Ç) oranına doğrudan etki etmiştir. Aynı zamanda karışımlarda kullanılan akışkanlaştırıcı katkılar aynı kıvam ve karışım oranlarında belirli miktarlarda su azaltmışlardır. Yine akışkanlaştırıcı katkılarında S/Ç oranlarına etki ettiği tespit edilmiştir.

Kıvam deneyi dışında taze karışımların priz süresini ölçmek için vikat deneyi yapılmıştır. Çimento tipi ve miktarı, priz hızlandırıcı katkı miktarı ve akışkanlaştırıcı katkı tipi ve miktarları da priz sürelerinin uzatılması ve kısalması yönünde etki etmişlerdir. Bu etkilerin her biri vikat cihazıyla yapılan priz süresi belirleme deneysel çalışmasıyla ortaya konmuştur.

### 3.2.1. Taze Karışımların Reolojik Özellikleri

#### 3.2.1.1. Çimento Tipi ve Miktarının S/Ç Oranına Etkisi

Çalışmada aynı karışım oranlarında çimento türleri arasında kullanılan su miktarı bakımından çok büyük farklılıklar görülmemiştir. CEM II çimentosu ile oluşturulan karışımlarda CEM I çimentosuna göre çok az miktarda fazla su kullanılmıştır. Bu durum CEM II çimentosunun CEM I çimentosuna göre tane boyu analizlerinde biraz daha ince bir malzeme olmasından kaynaklanmaktadır.



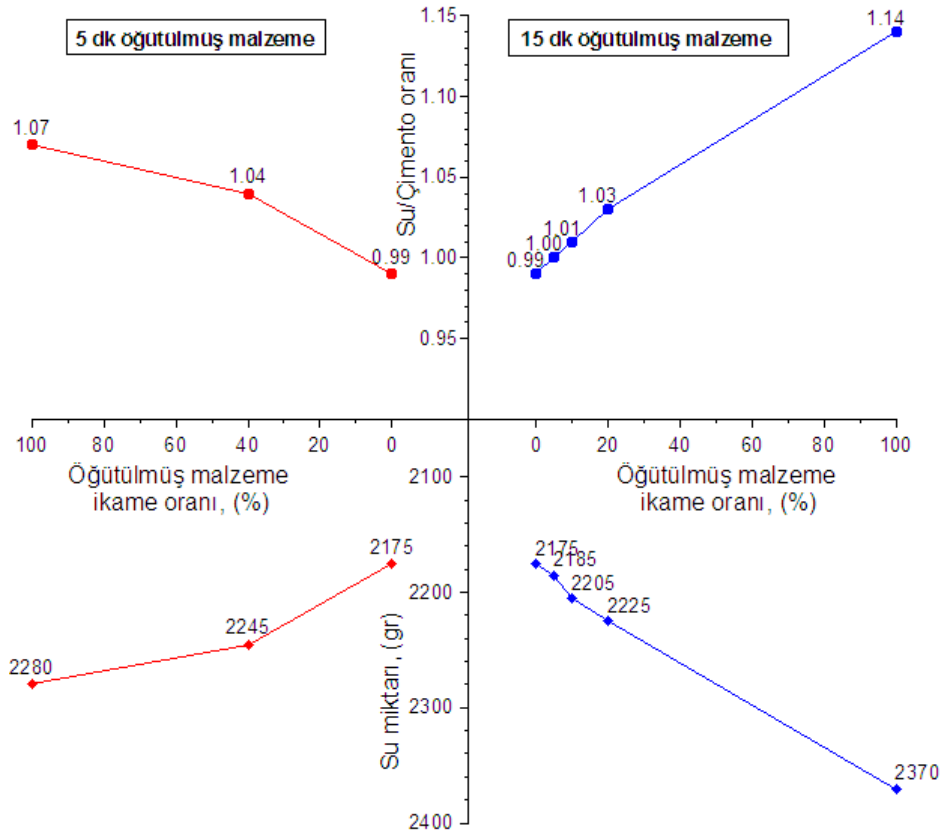
Şekil 3.6. Çimento tiplerine göre (CEM I, CEM II) çimento miktarına bağlı olarak S/Ç ve su miktarı değişimleri

Şekil 3.6'da iki farklı çimento türüyle oluşturulan karışımlarda kullanılan çimento miktarlarına bağlı olarak değişen S/Ç oranları görülmektedir. Şekilde çimento miktarının azalmasıyla oluşturulan karışımlarda su miktarının azaldığı tespit edilmiştir. Buna bağlı olarak çimento miktarının azalmasıyla S/Ç oranında da bir artış görülmektedir. CEM I

çimentosuyla yapılan birinci karışım oranında S/Ç oranı 0,99 iken ikinci karışım oranında 1,08 ve üçüncü karışım oranında 1,19 seviyelerine çıkmıştır. CEM II çimentosuyla yapılan karışımlarda da oranlar aynı seviyede gerçekleşmiş yalnızca üçüncü karışım oranında 1,20 seviyelerine çıkmıştır.

### 3.2.1.2. Malzeme İnceliğinin S/Ç Oranına Etkisi

Laboratuar çalışmalarında 15 dk ve 5 dk öğütülen kül malzemesi dolgu karışımları içerisinde atık kül malzemesi yerine ikame olarak kullanılmış ve malzeme inceliğinin karışımın su miktarına ve S/Ç oranına etkisi araştırılmıştır (Şekil 3.7). 15 dk öğütülen kül sırasıyla %5, %10, %20 ve %100 olmak koşuluyla atık kül içerisinde ikame olarak kullanılmıştır. 5 dk öğütülen kül malzemesi ise sırasıyla %40 ve %100 ikame olacak şekilde kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Öğütülmüş kül malzemesi (15 dk ve 5 dk) ilave oranlarına bağlı olarak S/Ç ve su miktarı değişimleri

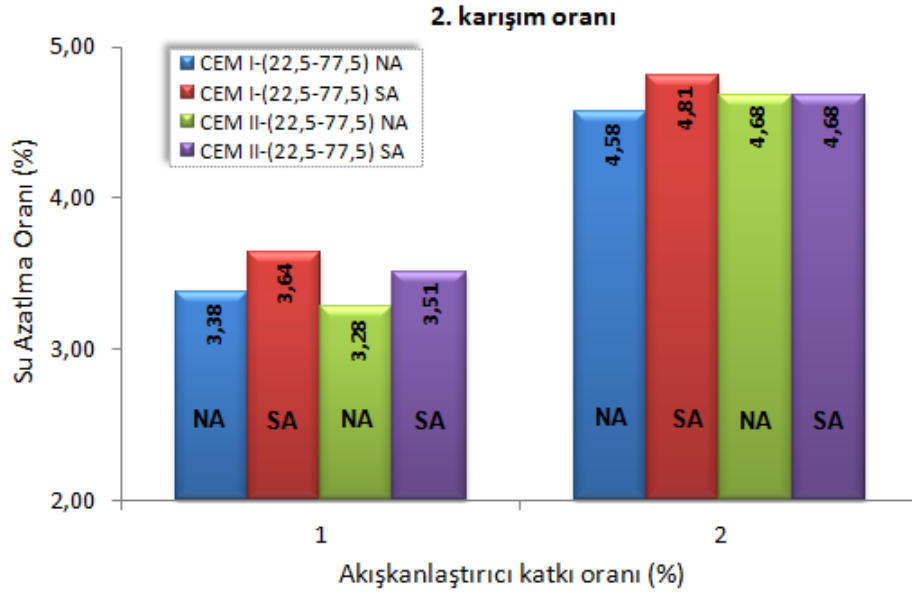
Şekil 3.7’de malzeme inceliğinin dolgu karışımının su miktarına ve S/Ç oranına etkisini göstermektedir. Şekil incelendiğinde malzeme inceliği ile karışımda kullanılan su miktarının arttığı görülmektedir. %100 oranında atık kül yerine kullanılan 15 dk öğütülmüş kül dolgu karışımının S/Ç oranını 1,14’e kadar yükseltmiştir. Yine aynı şekilde 5 dk öğütülen kül malzemesinin dolgu karışımı içerisinde %100 oranında atık kül yerine kullanıldığında karışımın S/Ç oranı 1,07’e yükselmiştir. Malzemenin inceltilmesiyle yüzey alanında artış sağlanmış ve daha fazla su ihtiyacı doğmuştur.

Karışımda kullanılan su miktarlarına baktığımızda en yüksek kullanım değeri %100 ikame edilen inceltilmiş kül malzemelerinin olduğu karışımlarda görülmüştür. 15 dk öğütülen kül malzemesinin %100 ikame edildiği yani dolgu karışımında atık malzeme olarak tamamen öğütülmüş kül kullanıldığında su miktarı 2370 gr olmaktadır. 5 dk öğütülen malzemenin %100 kullanımında ise 2280 gr olmaktadır.

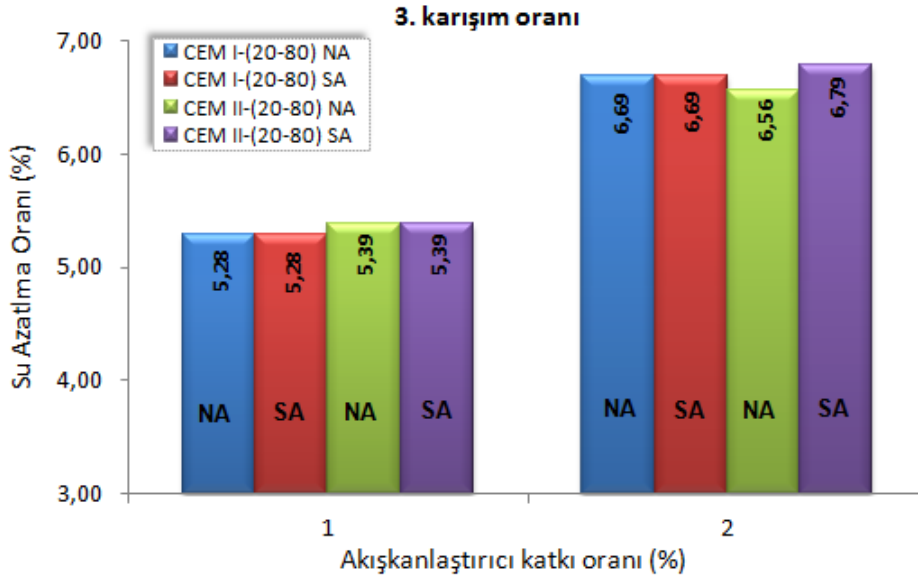
### **3.2.1.3. Akışkanlaştırıcı Katkıların S/Ç Oranına Etkisi**

Çalışmada kullanılan akışkanlaştırıcı katkıları karışım içerisinde %1 ve %2 oranında kullanılmıştır. Akışkanlaştırıcılar ile oluşturulan numunelerde kullanılan su miktarları katkısız yapılan numunelerde kullanılanlara göre daha düşük miktarlardadır. Katkıların su azaltma oranları ikinci karışım oranları için Şekil 3.8 ve üçüncü karışım oranları için Şekil 3.9’da verilmiştir.

Her iki çimento ile ikinci karışım oranlarında oluşturulan ve akışkanlaştırıcıların %1 ilave edildiği numunelerde su azaltma oranları %3,28 ile %3,64 arasında gerçekleşmiştir. %2 ilave edildiği karışımlarda ise su zaltma oranları artarak %4,58 ile %4,81 arasında gerçekleşmiştir. Üçüncü karışım oranlarında ise su azaltma miktarları çimento miktarının azalmasıyla birlikte biraz daha fazla gerçekleşmiştir. Yine her iki çimento ile üçüncü karışım oranlarında oluşturulan ve akışkanlaştırıcıların %1 ilave edildiği numunelerde su azaltma oranları %5,28 ile %5,39 arasında gerçekleşmiştir. %2 ilave edildiği karışımlarda ise su zaltma oranları %6,56 ile %6,79 arasında gerçekleşmiştir. Her iki akışkanlaştırıcının su azaltma miktarları birbirine yakın değerdedir. SA katkısı bazı denemelerde NA katkısına göre su miktarında biraz daha fazla azalmaya sebebiyet verdiği görülmüştür.

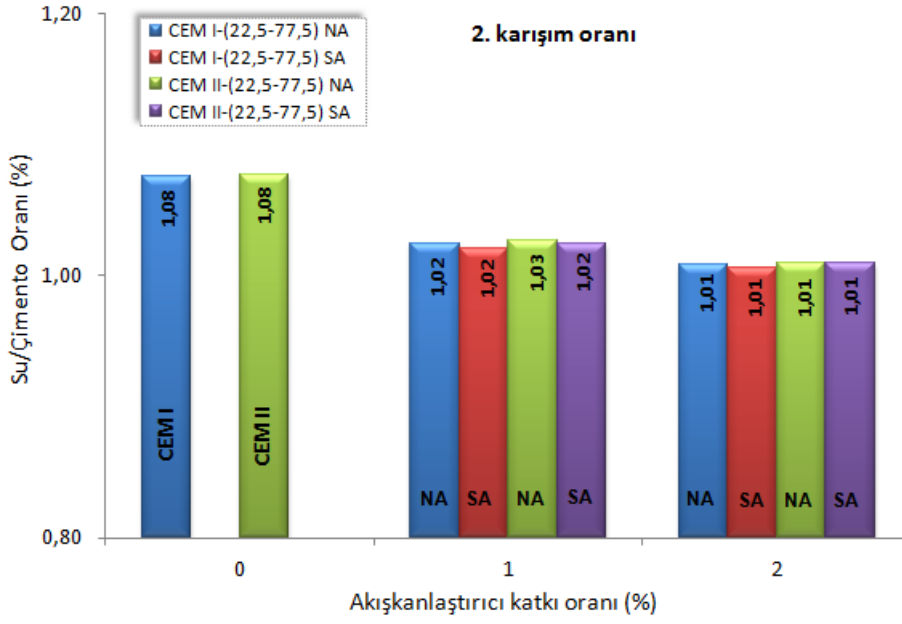


Şekil 3.8. İkinci karışım oranlarıyla hazırlanan numunelerde akışkanlaştırıcıların su azaltma oranları

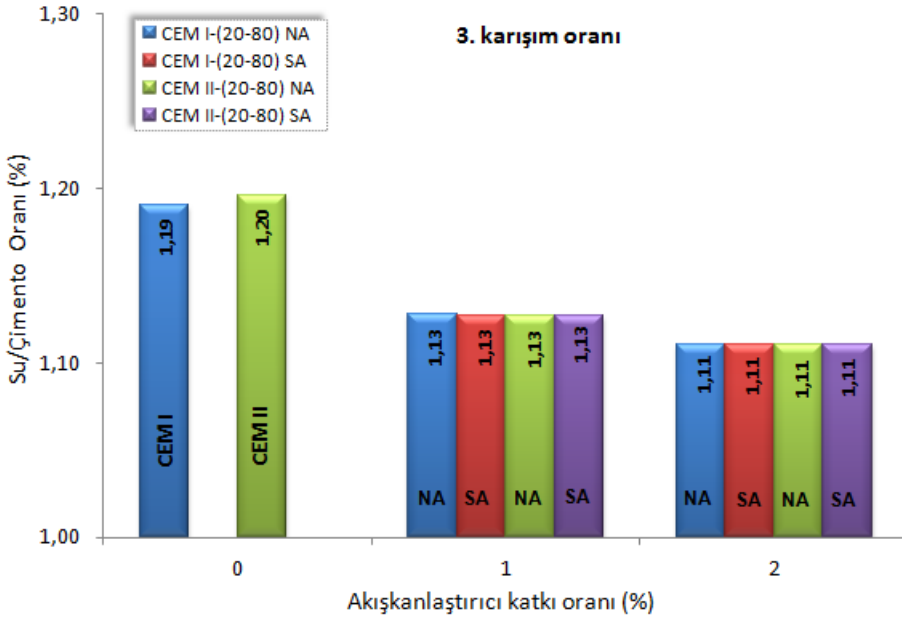


Şekil 3.9. Üçüncü karışım oranlarıyla hazırlanan numunelerde akışkanlaştırıcıların su azaltma oranları

Akışkanlaştırıcı katkıları karışım içerisinde su azaltma eğilimleri olduğunda bundan S/Ç oranını da etkilemektedirler. Her iki akışkanlaştırıcının karışımların S/Ç oranlarına etkileri Şekil 3.10 ve Şekil 3.11’de verilmiştir.



Şekil 3.10. İkinci karışım oranlarında akışkanlaştırıcıların S/Ç oranına etkisi



Şekil 3.11. Üçüncü karışım oranlarında akışkanlaştırıcıların S/Ç oranına etkisi

Şekil 3.10 incelendiğinde ikinci karışım oranında S/Ç oranı her iki çimento için 1,08 iken %1 oranında akışkanlaştırıcı katkı kullanımında bu oran 1,02'ye %2 ilave oranında 1,01'e kadar düşmüştür. Şekil 3.11'de üçüncü karışım oranında ise S/Ç oranı 1,19 ve 1,20 seviyelerinde iken akışkanlaştırıcı katkı ile bu oran %1 ilave oranında 1,13'e, %2 ilave oranında 1,11'e düşmüştür.

Akışkanlaştırıcı katkıların hedeflenen kıvamdaki bir beton için gereken karışım suyu miktarında %5-12 oranında su azaltma eğilimleri mevcuttur. Bundan daha yüksek oranda su azaltma eğilimleri olan katkılar ise yüksek oranda su azaltıcı katkı olarak bilinirler (Erdoğan ve Erdoğan, 2007). Çalışmada kullanılan katkılar taneler arası bir itme kuvveti uygulayarak karışımların kıvamını düzenlemiş ve su miktarında azaltma sağlamıştır. Katkıların su azaltma eğilimleri betonda kullanılan performanslarının biraz altında kalmıştır. Bunun sebebi olarak dolgu içerisinde kullanılan karışım suyu miktarının ve S/Ç oranının yüksek olmasıdır. Su miktarın yüksek olması katkıların etkin kullanımlarını olumsuz etkilemiştir. Aynı zamanda S/Ç oranının yüksek olması azaltılan su miktarının toplam su miktarına oranını da düşürmektedir. Akışkanlaştırıcıların 3. karışım oranında daha fazla su azaltma yüzdesinin gerçekleşmesi çimento miktarının düşmesiyle azalan su miktarından kaynaklanmaktadır.

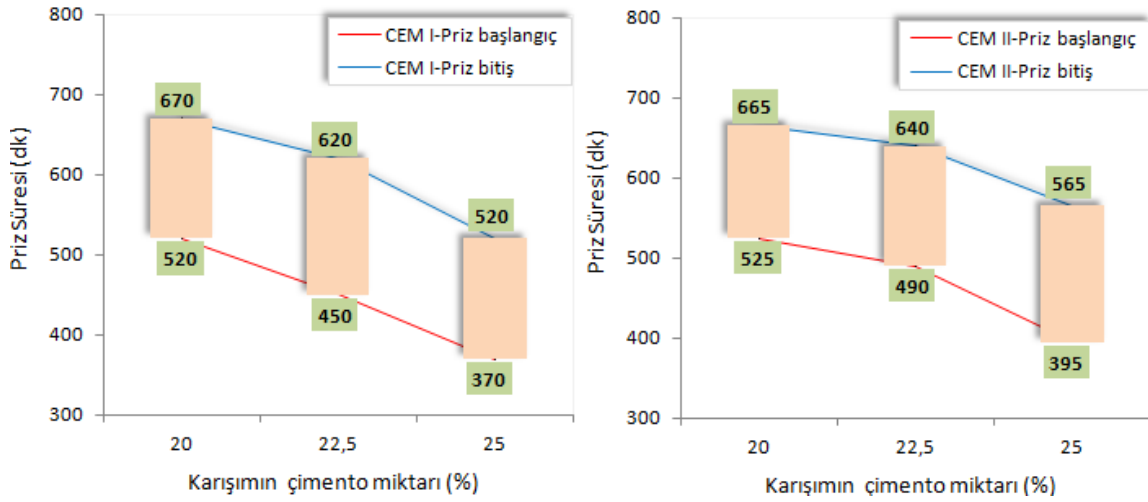
#### **3.2.1.4. Priz Hızlandırıcıların S/Ç Oranına Etkisi**

Priz hızlandırıcı katkılar genellikle püskürtme betonun erken sertleşmesini sağlamak için kullanılırlar. Uygulanacağı karışımın yüzeye yapışma ve burada sertleşme kontrolünü sağlarlar. Çalışmada kullanılan ve cam suyu diye adlandırılan priz hızlandırıcı sodyum silikat katkısı suyla oluşturduğu pelte ile dolgu karışımının koagüle özelliğini (katılaşma) ve karışım malzemelerinin adezyonunu artırmıştır. Dolayısıyla karışım S/Ç oranına herhangi bir etkisi olmamış ancak sağladığı katılaşma özelliği sayesinde karışımın kıvamının tamamen kaybolmasına neden olmuştur.

#### **3.2.2. Taze Karışımların Priz Özellikleri**

##### **3.2.2.1. Çimento Tipi ve Miktarının Priz Sürelerine Etkisi**

Çimento tipi ve miktarlarının dolgu karışımlarının priz sürelerine olan etkileri Şekil 3.12'de gösterilmiştir. Herhangi bir katkı kullanılmayan karışımlarda çimento miktarının artmasıyla priz sürelerinin kısaldığı görülmektedir. CEM I çimentosunun ise bütün karışım oranlarında CEM II çimentosuna göre priz başlangıç ve bitiş sürelerinin daha erken sürede gerçekleştiği görülmektedir.



Şekil 3.12. Çimento tipi ve miktarının priz süresine etkisi

CEM I çimentosuyla yapılan karışımların çimento oranının %20 olduğu numunelerde priz başlangıç süresi 520 dk, çimento oranı %25 olduğunda priz başlangıç süresi 370 dk olmuştur. %22,5 çimento oranında ise 450 dk olarak gerçekleşmiştir. Aynı şekilde CEM II çimentosuyla oluşturulan ve çimento oranı %20 olan karışımlarda numunelerin priz başlangıç süresi 525 dk, çimento oranı %25'te ise priz başlangıç süresi 395 dk olmuştur. %22,5 çimento oranında ise 490 dk olarak gerçekleşmiştir.

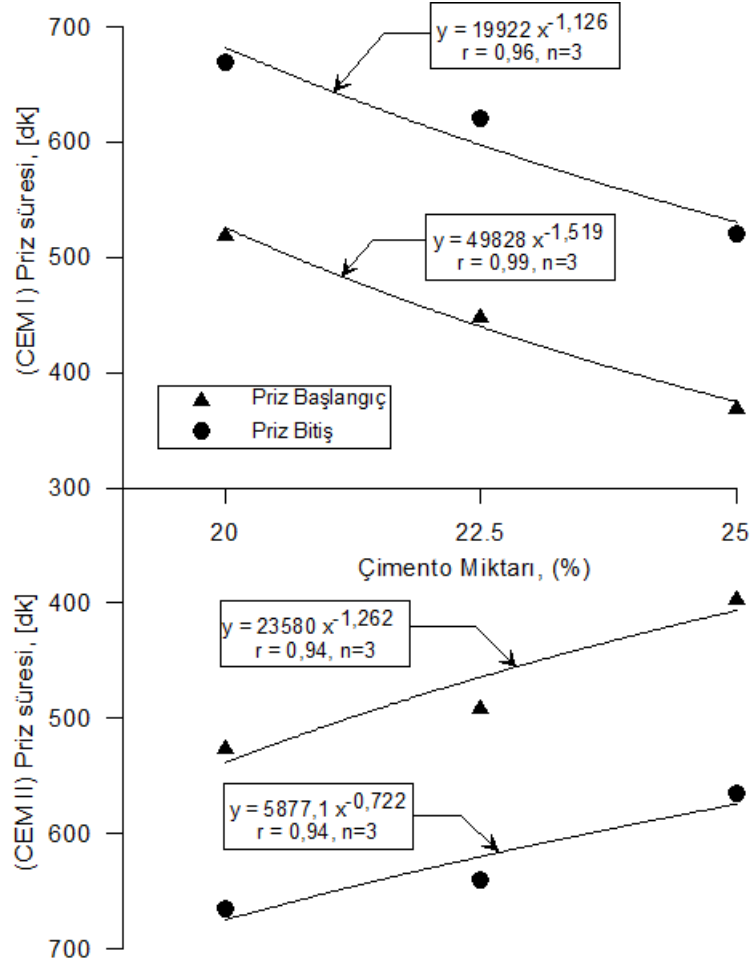
Tablo 3.5. Farklı çimento miktarlarının priz başlangıç-bitiş süreleri.

Karışım Tipi	Priz Süresi (dk)				
	Başlangıç, [A]	Bitiş, [B]	Fark, [C]	Artma Miktarı, [D]	Artma Yüzdesi,[E]
CEM I					
1. Karışım oranı [1]	370	520	150	0	0%
2. Karışım oranı [2]	450	620	170	80	22%
3. Karışım oranı [3]	520	670	150	150	41%
CEM II					
1. Karışım oranı [1]	395	565	170	0	0%
2. Karışım oranı [2]	490	640	150	95	24%
3. Karışım oranı [3]	525	685	160	130	33%
$[C_{1,2,3}] = [(B_{1,2,3}-A_{1,2,3})]$ , $[D_{1,2,3}] = [(A_{1,2,3})-(A_i)]$ , $[E_{1,2,3}] = [(D_{1,2,3})/(A_i) *100]$					

Değişen çimento miktarları ile birlikte priz başlangıç sürelerindeki değişim Tablo 3.5'te verilmiştir. Tablo incelendiğinde CEM I kullanılan karışımlarda çimento kullanım oranının %25'ten %22,5'a düşerken priz başlangıç süresindeki uzama 80 dk, %20'ye düştüğünde 150 dk olarak gerçekleşmiştir. CEM II kullanılan karışımlarda ise çimento kullanım oranının %25'ten %22,5'a düşerken priz başlangıç süresindeki uzama 95 dk, %20'ye düştüğünde 130 dk olarak gerçekleşmiştir. Tabloya baktığımızda çimento kullanım oranının %25'ten %20'ye düşmesiyle priz başlangıç süresindeki uzama oranı CEM I çimentosunda %41, CEM II çimentosunda %33 oranlarında gerçekleşmiştir. Çimento kullanım oranının %25'ten %22,5'a düşmesiyle priz başlangıç süresindeki uzama oranı ise CEM I çimentosunda %22, CEM II çimentosunda %24 olarak gerçekleşmiştir.

Çimento hamuru veya betonu oluştururken çimentoya ilave edilen su, çimento bünyesinde bulunan her ana bileşen ile ayrı ayrı reaksiyona girmektedir. Bunun sonucunda her ana bileşenin reaksiyon hızı, reaksiyon esnasında açığa çıkan ısı ve reaksiyon sonucunda ortaya çıkan ürünü farklı geliştirdiğinden çimento hamurunun bağlayıcı özelliğine (dayanıma) etkisi farklı olmaktadır. Çimento hamurunun erken prizlenmesinde ve kazanacağı nihai dayanımda  $C_3S$  ve  $C_2S$  gibi kalsiyum silikatlı ana bileşenlerin hidratasyonunun etkisi ön plana çıkmaktadır. Ancak erken dayanım gelişiminde  $C_2S$ 'in katkısı  $C_3S$  kadar değildir (Erdoğan, 2003).  $C_3A$ 'nın çimento hamuru dayanım gelişimi üzerine etkisi hem erken hem ileri kür sürelerinde çok düşük kalmaktadır. Ancak hidratasyonun ilk birkaç saati içerisinde dayanıma katkısı reaksiyon hızının yüksekliğinden dolayı oldukça dikkate değerdir. Bu çalışmada CEM I çimentosunun  $C_3S$  ve  $C_2S$  gibi prizlenmede en etkili olan ana bileşenlerinin CEM II çimentosuna göre fazla miktarda olması (Tablo 3.2) priz süresinin daha erken gelişmesine sebebiyet vermiştir. Ayrıca karışım içerisinde artan kül miktarı nedeniyle de priz sürelerinde bir uzama meydana gelmiştir. Daha önceki yapılan çalışmalarda (Koçak, 2010; Yijin vd., 2004) uçucu küllerin hidratasyon ısılarının ve hidratasyon reaksiyon hızlarının çimentodan daha düşük olması ilave edildikleri çimentolu karışımların priz sürelerinin daha da uzamasına sebebiyet verdiği belirtilmiştir. Bunun yanında çimento miktarında düşüş ve artan S/Ç oranı da bu priz sürelerinin uzamasına etkindir.

Artan çimento miktarında ve farklı iki çimento (CEM I-CEM II) ile oluşturulan katkısız numunelerin priz sürelerinde meydana gelen değişimi Şekil 3.13'te gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde çimento miktarı artışı ile priz süreleri arasında çok yüksek bir korelasyon olduğu belirlenmiştir ( $r > 90$ ).



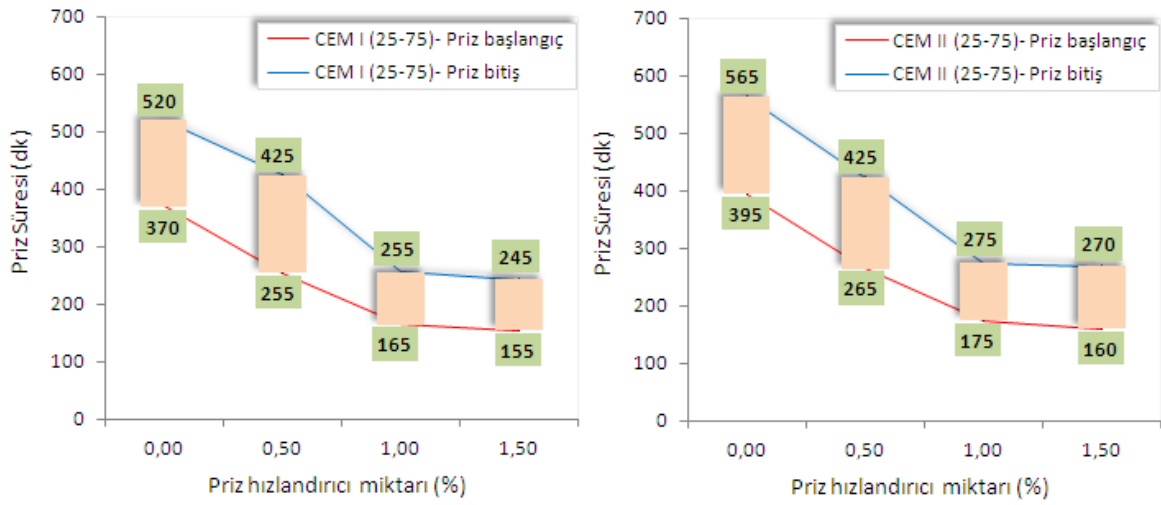
Şekil 3.13. Çimento (CEM I ve CEM II) miktarına bağlı olarak priz başlangıç-bitiş süresi değişimleri

### 3.2.2.2. Priz Hızlandırıcı ve Miktarının Priz Sürelerine Etkisi

Priz hızlandırıcı katkının ve kullanım oranının priz sürelerine olan etkileri Şekil 3.14'te verilmiştir. Şekil değerlendirildiğinde priz hızlandırıcı miktarının artmasıyla malzemelerin priz sürelerinin kısaldığı görülmektedir.

Sonuçlar incelendiğinde CEM I çimentosuyla oluşturulan katkısız numunelerde priz başlangıç süresi 370 dk, priz bitiş süresi ise 520 dk'dır. Priz hızlandırıcının toplam katkı miktarının %0,5'i oranında kullanıldığı numunenin priz başlangıç süresi 255 dk'ya priz bitiş süresi ise 425 dk'ya düşmektedir. %1'i kadar priz hızlandırıcı katkı ilave edildiğinde priz başlangıç 165 dk'ya, priz bitiş süresi ise 255 dk'ya düşmektedir. %1,5 ilavesinde ise priz başlangıç 155 dk'ya, priz bitiş süresi ise 245 dk'ya düşmektedir.

CEM II çimentosuyla oluşturulan katkısız numunelerde priz başlangıç süresi 395 dk, priz bitiş süresi ise 565 dk olarak tespit edilmiştir. Priz hızlandırıcının toplam katı miktarının %0,5'i oranında kullanıldığı numunenin priz başlangıç süresi 265 dk'ya priz bitiş süresi ise 425 dk'ya düşmektedir. %1 oranında priz hızlandırıcı katkı ilave edildiğinde priz başlangıç 175 dk'ya, priz bitiş süresi ise 275 dk'ya düşmektedir. %1,5 katkı ilavesinde ise priz başlangıç 160 dk'ya, priz bitiş süresi ise 270 dk'ya düşmektedir. Aynı oranlarda CEM I çimentosuyla yapılan karışımların priz sürelerinin CEM II çimentosuyla yapılanlara göre daha kısa olduğu şekilde görülmektedir.



Şekil 3.14. Priz hızlandırıcı katkı ve kullanım oranının priz süresine etkisi

Çalışmada kullanılan sodyum silikat tipi priz hızlandırıcı katkının dolgu içerisinde %0-0,5-1,0-1,5 oranlarında kullanıldığında numunelerin priz sürelerindeki değişimi Tablo 3.6'da verilmiştir. Tabolda ayrıca artan priz hızlandırıcı oranı ile birlikte başlangıç sürelerindeki azalma durumu da verilmiştir. CEM I çimentosuyla oluşturulan numunelerde priz hızlandırıcı katkı kullanılmayan numunelerde kullanım oranının %0,5'e çıktığı durumda priz başlangıç süresinde kısalma oranı %31, %1'e çıkması durumunda %55 ve %1,5'a çıktığında %58 olarak gerçekleşmiştir. CEM II çimentosuyla oluşturulan numunelerde ise priz hızlandırıcı kullanımının %0,5 olduğu durumda priz başlangıç süresinde kısalma oranı %33, %1 olduğunda %56 ve %1,5 olduğunda %59 olarak gerçekleşmiştir.

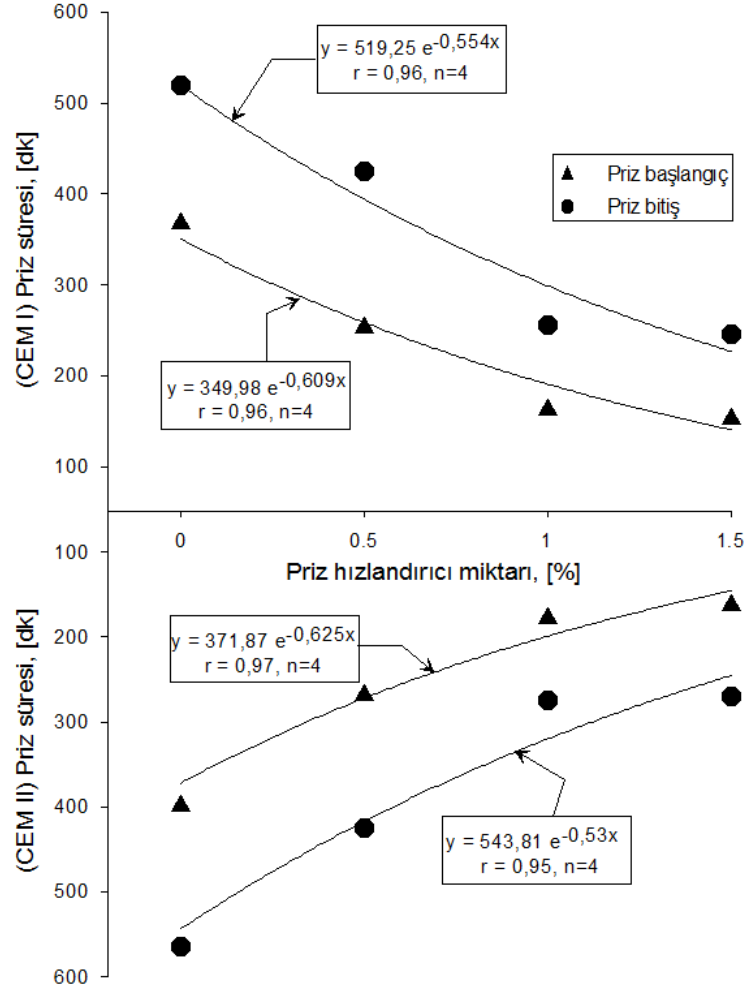
Tablo 3.6. Farklı oranlarda priz hızlandırıcı katkının dolgu priz başlangıç-bitiş süreleri

Karışım Tipi		1. Karışım Oranı (25-75)				
Priz Hızlandırıcı Miktarı (Katının %'si)		Priz Süresi (dk)				
		Başlangıç, [A]	Bitiş, [B]	Fark, [C]	Azalma Miktarı,[D]	Azalma Yüzdesi, [E]
Çimento Tipi		CEM I				
%0,0	[1]	370	520	150	0	0%
%0,5	[2]	255	425	170	115	31%
%1,0	[3]	165	255	90	205	55%
%1,5	[4]	155	245	90	215	58%
Çimento Tipi		CEM II				
%0,0	[1]	395	565	170	0	0%
%0,5	[2]	265	425	160	130	33%
%1,0	[3]	175	275	100	220	56%
%1,5	[4]	160	270	110	235	59%

$[C_{1,2,3,4}] = [(B_{1,2,3} - A_{1,2,3,4})]$ ,     
 $[D_{1,2,3,4}] = [(A_1) - (A_{1,2,3,4})]$ ,     
 $[E_{1,2,3,4}] = [(D_{1,2,3,4}) / (A_1) * 100]$

Priz hızlandırıcı katkıları ilave edildikleri karışımların priz sürelerinde bir kısalmaya sebebiyet veren katkılardır. Özellikle sodyum silikat tipi katkıları taze karışımlara ilave edildiklerinde karışım içerisindeki tanelerin topaklanma (koagüle) isteğini hızlandırmaktadır. Ayrıca taneler arasında topaklanma ile beraber malzemede bir yapışma etkisi (jel yapısı) oluşturmaktadır. Bunun sonucunda karışım malzemesi çok kısa sürede taze haldeki kıvamını kaybedip sertleşmeye başlamaktadır. Dolayısıyla karışımın prizlenme süreci daha erken başlamaktadır. Çimentolu karışımların ilk birkaç saatinde  $C_3A$ 'nın yüksek reaksiyon verdiği bilinmektedir. Priz hızlandırıcıların da  $C_3A$  reaksiyonları üzerine hızlandırıcı etki yapması erken priz süresine ve dayanıma ulaşmalarında etkili olmaktadır (Rixom and Mailvaganam, 1999).

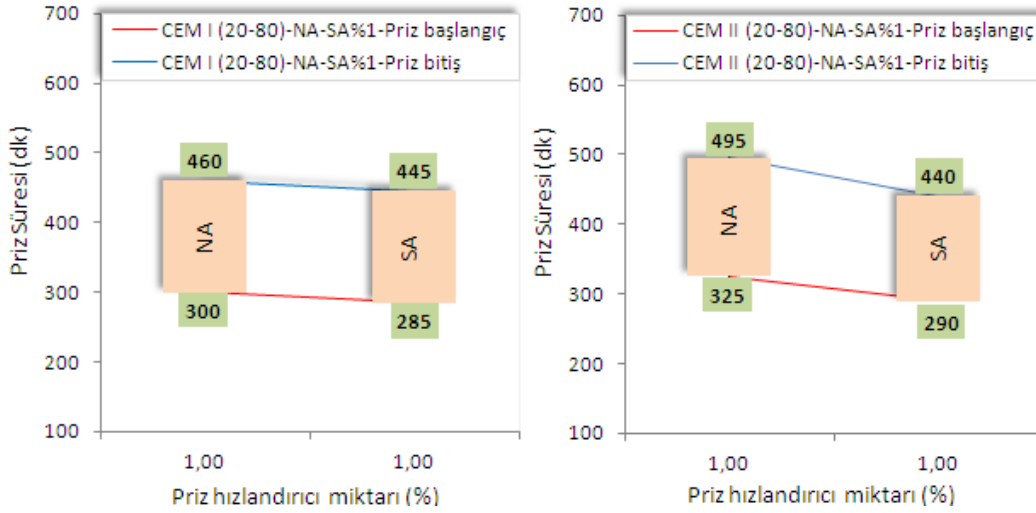
Farklı iki çimento (CEM I ve CEM II) ile birlikte artan priz hızlandırıcı miktarlarıyla oluşturulan numunelerin priz sürelerinde meydana gelen değişimler Şekil 3.15'te verilmiştir. Şekil incelendiğinde her iki çimento tipinde priz hızlandırıcı miktarı ile priz süreleri arasında çok yüksek bir korelasyon olduğu belirlenmiştir ( $r > 90$ ).



Şekil 3.15. Her iki çimento tipinde (CEM I-CEM II) priz hızlandırıcı miktarına bağlı olarak priz başlangıç-bitiş süresi değişimleri

### 3.2.2.3. Akışkanlaştırıcı ve Priz Hızlandırıcı Katkıların Priz Sürelerine Etkisi

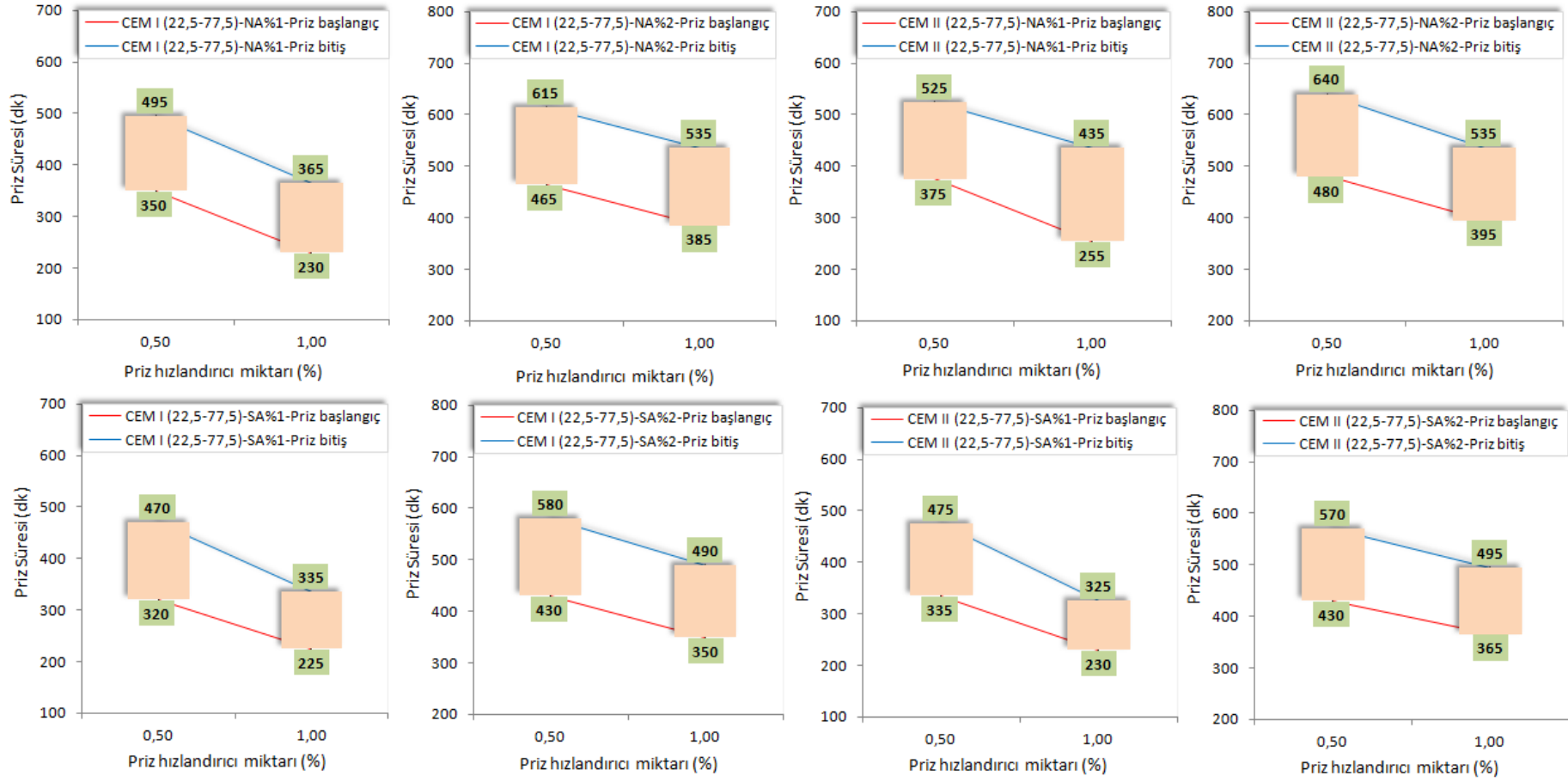
İkinci ve üçüncü karışımlarda akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı katkıları aynı numunelerin içerisinde kullanılmış ve priz sürelerine olan etkileri araştırılmıştır. Üçüncü karışım oranlarında akışkanlaştırıcıların ve priz hızlandırıcıların %1 oranında kullanıldığı ve farklı çimento tipleri (CEM I ve CEM II) hazırlanan numunelerin priz süresine olan etkileri Şekil 3.16'da gösterilmiştir. Üçüncü karışım oranlarında karışımların %0,5 priz hızlandırıcı kullanılan ve %2 akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerinden priz süresi değeri elde edilememiştir. Priz başlangıç süresinin en erken geliştiği numune 285 dk ile CEM I çimentosuyla ve %1 SA kullanılan numunedir. CEM II çimentosuyla hazırlanan ve %1 NA kullanılan numunede ise priz başlangıç süresi diğer numunelere göre daha uzun zamanda ve 325 dk olarak gerçekleşmiştir. Priz bitiş sürelerinde de aynı etki görülmektedir.



Şekil 3.16. Üçüncü karışım oranında %1 priz hızlandırıcı ve akışkanlaştırıcı katkı kullanımının priz başlangıç-bitiş sürelerine etkisi

İkinci karışım oranlarında akışkanlaştırıcıların %1-2 ve priz hızlandırıcıların %0,5-1,0 oranında kullanıldığı ve farklı çimento tipleri (CEM I ve CEM II) hazırlanan numunelerin priz süresine olan etkileri Şekil 3.17’de gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde priz hızlandırıcı katkıların kullanım oranının artmasıyla dolgu karışım numunelerinin priz başlangıç ve bitiş sürelerinin kısaldığı görülmektedir. Akışkanlaştırıcı katkı kullanılan numunelerde ise kullanım oranının artmasıyla priz sürelerinin uzadığı görülmektedir. CEM I çimentosuyla oluşturulan numunelerin priz sürelerinin ise CEM II çimentosuyla yapılanlara göre daha kısa olduğu da yapılan çalışmayla ortaya konmuştur. Çalışmada priz başlangıç süresinin en kısa olduğu numune 325 dk ile CEM I çimentosuyla %1 priz hızlandırıcı ve %1 SA katkısı kullanılan numuneden elde edilmiştir. Priz başlangıç süresinin en uzun olduğu numune ise 480 dk ile CEM II çimentosuyla %0,5 priz hızlandırıcı ve %2 NA katkı ilaveli numuneden elde edilmiştir.

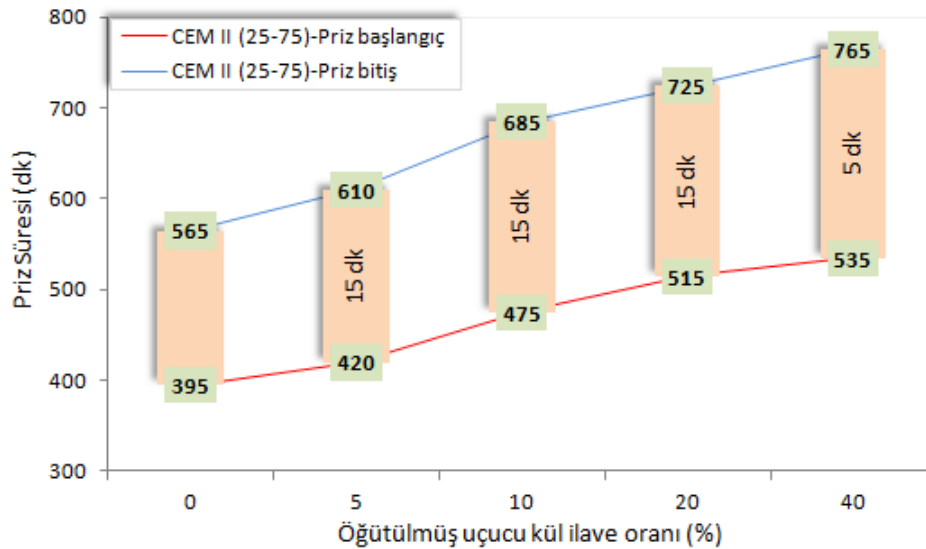
Akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı katkıların bir arada kullanıldığı numunelerde akışkanlaştırıcı numuneler priz süresini uzatma eğiliminde, priz hızlandırıcı katkı ise priz sürelerini kısaltma eğilimindedirler. Bundan dolayı her iki katkının kullanıldığı numunelerde priz süreleri sadece priz hızlandırıcı kullanılan numunelerden daha geç gerçekleşmiştir. Ancak hiçbir katkı kullanılmayan numunelerden daha erken sürelerde gerçekleştiği belirlenmiştir. 3. karışım oranlarında %0,5 priz hızlandırıcı ve %2 akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerde akışkanlaştırıcıların karışımın hareketsiz periyodunu uzatması nedeni ile priz süreleri tespit edilememiştir.



Şekil 3.17. İkinci karışım oranlarında CEM I ve CEM II çimentosuyla oluşturulan numunelerde %1 ve %2 oranında NA ve SA akışkanlaştırıcı katkıların priz hızlandırıcı ile birlikte kullanımının priz süresine etkisi

### 3.2.2.4. Malzeme İnceliğinin Priz Sürelerine Etkisi

Öğütülmüş uçucu kül malzemesinin dolgu içerisinde kullanılan uçucu kül ile belirli oranlarda yer değiştirmesiyle priz süresine olan etkileri incelenmiştir. Malzeme inceliğinin dolgu priz sürelerine etkisinin grafiği Şekil 3.18’de gösterilmektedir. İnceliğin artmasıyla aynı kıvamda su ihtiyacının artması ve dolayısıyla S/Ç oranının artması sağlanmıştır. Bu artışla beraber çimentoların hidrasyon süresinde ve aynı zamanda priz süresinde bir uzamaya sebebiyet vermiştir. CEM II çimentosuyla 1. karışım oranında gerçekleştirilen deneylerde normal kül kullanılan numunelerin priz başlangıç süreleri 395 dk olarak gerçekleşmiştir. 15 dk öğütülmüş külün atık kül içerisinde %5’lik ilavesi sonrasında ise priz başlangıç süresi 420 dk olarak gerçekleşmiştir. Bununla birlikte %10 ve %20 ilaveleri sonrasında priz başlangıç süreleri sırasıyla 475 ve 515 dk olarak gerçekleşmiştir. 5 dk öğütülmüş külün %40 ilavesinde ise priz başlangıç süresi 535 dk olarak gerçekleşmiştir. Her iki öğütme dakikasında (5-15 dk) inceliği arttırılan küllerin %100 ilave oranlarında ise kullanılan su miktarının fazlalığından dolayı priz başlangıç ve bitiş süreleri elde edilememiştir. Bu numunelerde su kullanımı sırasıyla 2280 ve 2370 gr olmuştur. Dolgu numunesi içerisinde su hacminin artması, katı ve bağlayıcı malzeme oranının düşmesi kıvamın aynı olmasına rağmen priz sürelerine olumsuz etki etmiştir.



Şekil 3.18. Öğütülmüş külün (5 ve 15 dk öğütülmüş malzeme) dolgu içerisinde atık malzeme yerine ikame kullanımının priz süresine etkisi

Malzeme inceliğinin priz süresine olan etkileriyle ilgili veriler Tablo 3.7’de görülmektedir. İnceliğin artmasıyla priz başlangıç ve bitiş süreleri arasındaki fark atmıştır. Normal külün kullanıldığı numunelerde priz süreleri arasındaki fark 170 dk iken 15 dk öğütülmüş melzemedede bu fark %5 ikame kullanım oranında 190 ve %10 ve %20 ikame oranlarında 210 dk’ya çıkmıştır. 5 dk öğütülmüş malzemedede ise %40 ikame kullanım oranında ise 230 dk seviyelerine çıkmıştır. İnceliğin artmasıyla aynı zamanda priz başlangıç süreleri de uzamıştır. 15 dk öğütülmüş malzemededen %5 ilave oranında kullanıldığında priz başlangıcındaki uzama miktarı değişimi %6, %10 kullanımında %19 ve %20 kullanımında ise %29 şeklinde gerçekleşmiştir. Aynı şekilde 5 dk öğütülmüş malzemenin %40 ikame oranında kullanılmasıyla priz süresinde %35’lik bir uzama gerçekleşmiştir.

Tablo 3.7. Öğütülmüş malzemenin farklı oranlarda kullanımı ile dolgu priz sürelerinin değişimi

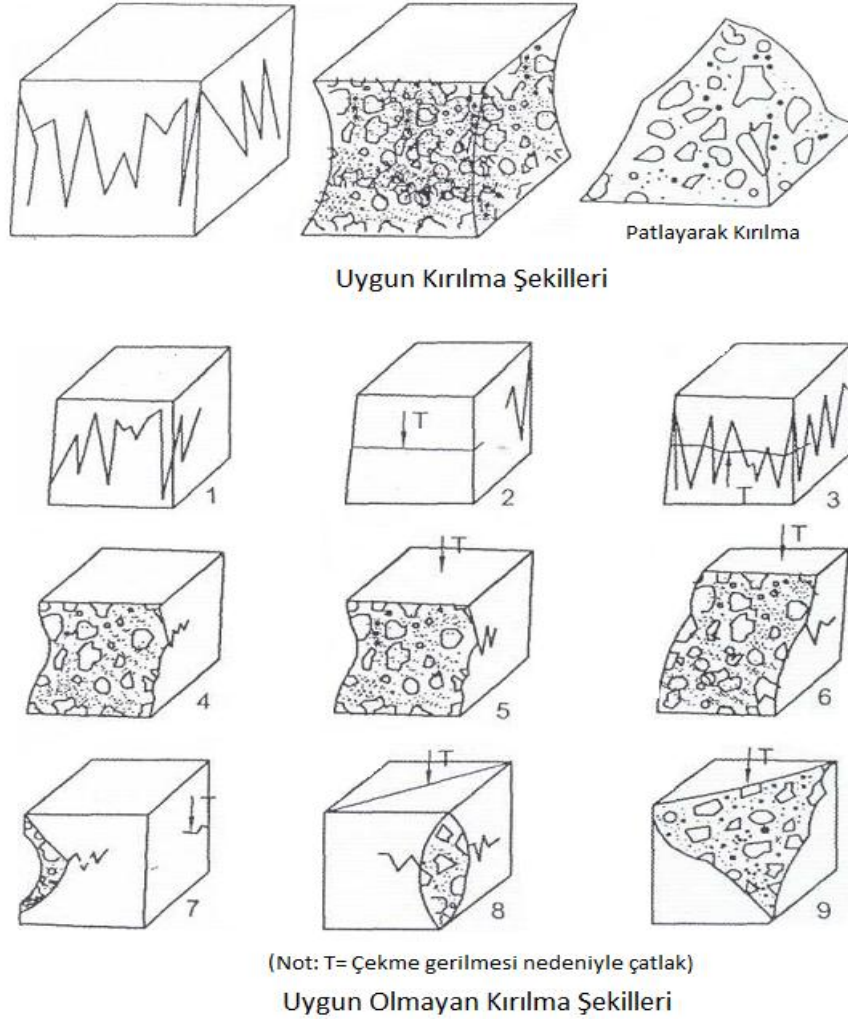
Karışım Tipi	Kullanılan Çimento CEM II				
	Priz Süresi (dk)				
1. Karışım oranı (25-75)	Başlangıç, [A]	Bitiş, [B]	Fark, [C]	Artma Miktarı, [D]	Artma Yüzdesi, [E]
15 dk öğütülmüş					
İlave Oranı (%0) [1]	395	565	170	0	0%
İlave Oranı (%5) [2]	420	610	190	25	6%
İlave Oranı (%10) [3]	475	685	210	80	19%
İlave Oranı (%20) [4]	515	725	210	120	29%
5 dk öğütülmüş					
İlave Oranı (%0) [1]	395	565	170	0	0%
İlave Oranı (%40) [2]	535	765	230	140	35%
$[C_{1,2,3,4}] = [(B_{1,2,3,4} - A_{1,2,3,4})]$ , $[D_{1,2,3,4}] = [(A_{1,2,3,4}) - (A_1)]$ , $[E_{1,2,3,4}] = [(D_{1,2,3,4}) / (A_1) * 100]$					

Malzemelerin inceliğinin artmasıyla puzolanik özelliklerinin arttığı bilinmektedir (Toutanji vd., 2004). Bu durumda uçucu kül inceliği dayanıma olumlu etki etmektedir. Ancak puzolanik aktivite deneylerinde su hacmi sabit tutulup çimento yerine kül ilave edilmektedir. Dolgu karışımlarında ise malzemelerin inceliğiyle beraber karışımın su ihtiyacında bir artma meydana gelmekte ve priz sürelerinin uzamasına temel etken olmaktadır. Pan vd. (2003) çalışmasında inceliğin artmasıyla sabit S/Ç oranında priz sürelerinin uzadığını belirtmiştir.

### 3.3. Sertleşmiş Numunelere Yapılan Çalışmalar

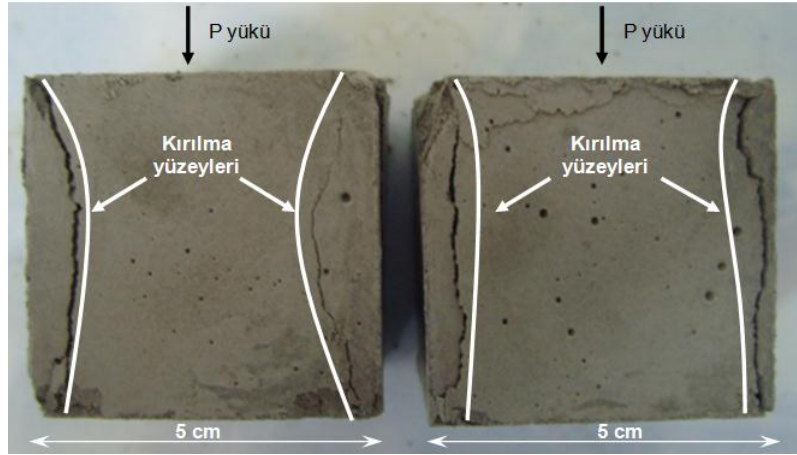
#### 3.3.1. Dayanım Deneyleri

Sertleşmiş numunelere UTEST marka maksimum 30.000 Newton basma gücünde olan dayanım aleti ile tek eksenli basma dayanım testleri yapılmıştır. Tek eksenli basma dayanım deneyleri sonucunda kırılan küp numunelerin standartlara uygun ve uygun olmayan kırılma biçimleri Şekil 3.19'da görülmektedir. Yapılacak olan deneyler sonrasında kırılan numunelerin şekildeki uygun kırılma biçimlerine benzer olması gerekmektedir.



Şekil 3.19. Basma dayanım deneyi sonunda kırılan numunelerin uygun ve uygun olmayan kırılma biçimleri (MEGEP, 2006).

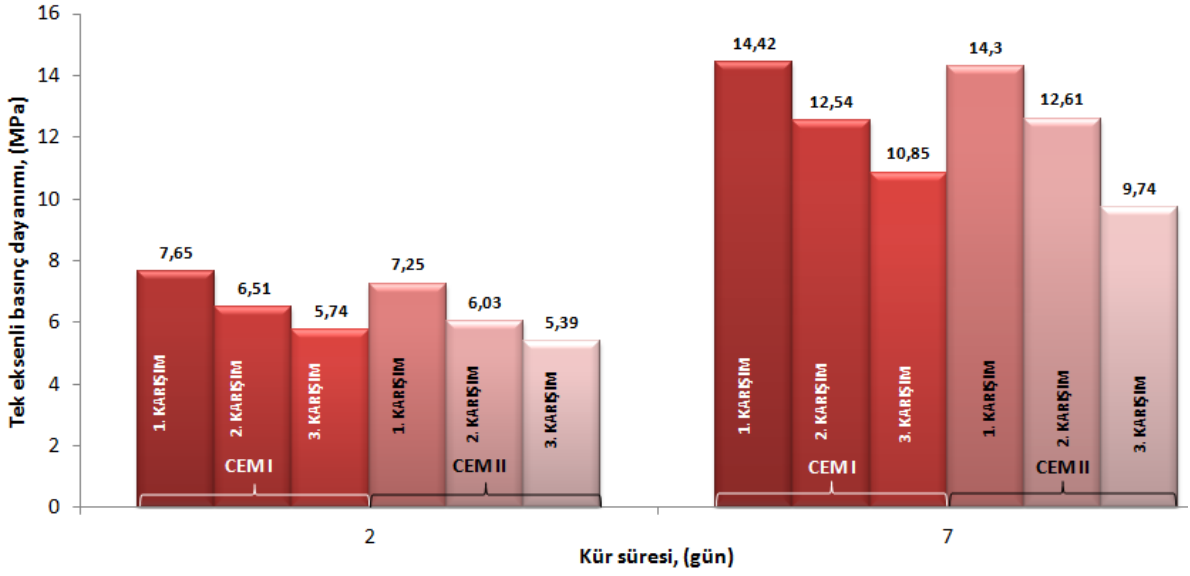
Çalışmada 5 x 5 x 5 cm boyutlarında küp kalıplar ile oluşturulan dolgu numuneleri tek eksenli basma dayanım deneyine tabi tutulduktan sonra Şekil 3.20'deki gibi kırılma biçimi göstermiştir. Gerçekleştirilen kırılma biçimleri Şekil 3.19'de gösterilen standart kırılma biçimleriyle uygunluk göstermiştir.



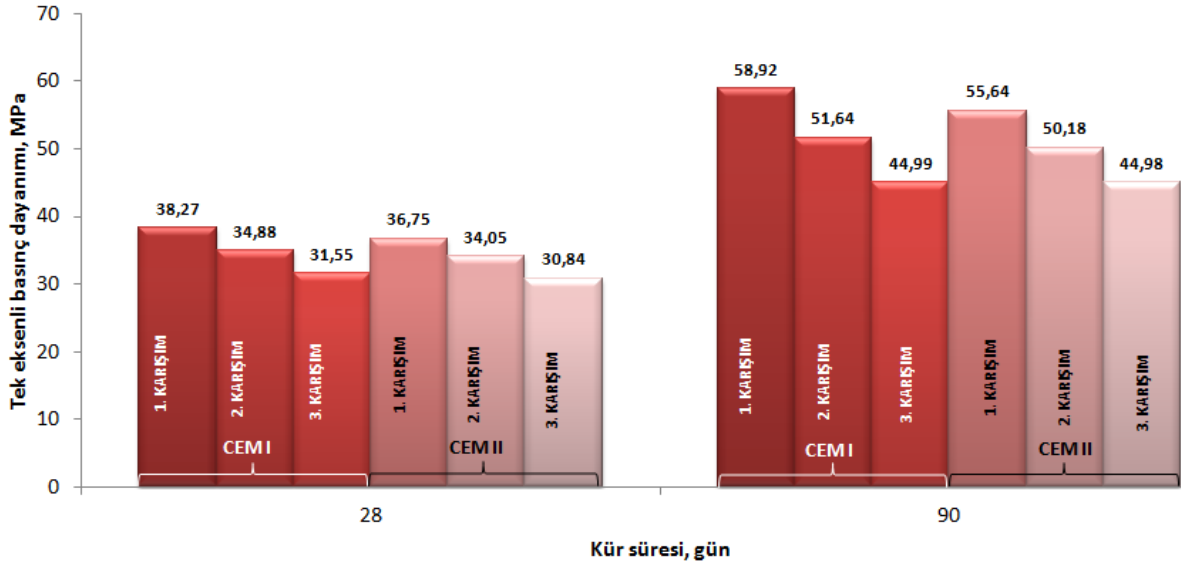
Şekil 3.20. Tek eksenli basınç dayanım deneyi sonunda kırılan numune şekilleri

### 3.3.1.1. Bağlayıcı Tipi ve Miktarının Dayanıma Etkisi

Şekil 3.21'de farklı çimento miktarlarında (%25-22,5-20) ve farklı çimento tipinde (CEM I ve CEM II) dolgu karışımlarına ait kısa (2-7 gün) ve Şekil 3.22'de uzun (28-90 gün) dönemli tek eksenli basma dayanım sonuçları gösterilmektedir. Aynı karışım oranı değerlerinde iki farklı çimento tipi ile oluşturulan numunelerin dayanım değerlerine bakıldığında belirgin bir fark görülmemiştir. Ancak CEM I çimentosuyla hazırlanan numunelerin dayanım değerleri CEM II çimentosuna göre biraz daha yüksek değerde olduğu görülmüştür. Şekil 3.21 incelendiğinde her iki çimento tipiyle oluşturulan numunelerin çimento miktarlarının artmasıyla tüm kür sürelerinde dayanım değerlerinin arttığı görülmektedir. 2 günlük dayanım değerlerinde en yüksek dayanım 7,65 MPa değeriyle %25 çimento içerikli CEM I çimentosuyla hazırlanan karışımlardan elde edilmiştir. 7 günlük dayanım değerlerinde ise en yüksek değer 14,42 MPa dayanım değeri ile %25 çimento içerikli CEM I çimentosuyla hazırlanan karışımdan elde edilmiştir. 2 ve 7 günlük numunelerde en düşük dayanım ise sırasıyla 5,39 ve 9,74 MPa değerleriyle %20 çimento içerikli CEM II çimentosuyla hazırlanan karışımlardan elde edilmiştir.



Şekil 3.21. Farklı tipte çimento ile farklı çimento-kül değerlerinde oluşturulan katkısız dolgu karışımlarının kısa dönemli (2-7 gün) dayanım değerleri

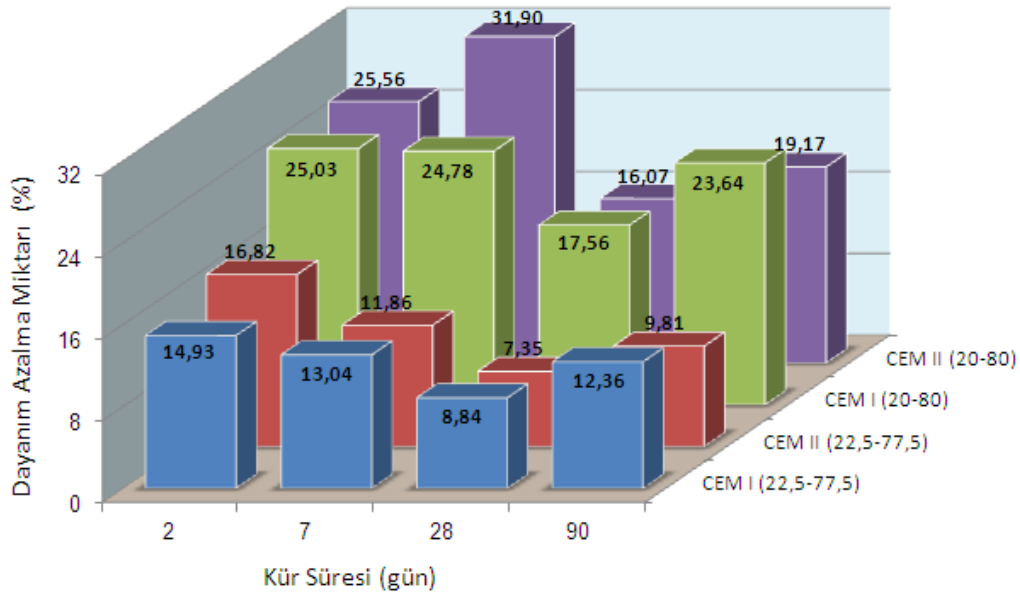


Şekil 3.22. Farklı tipte çimento ile farklı çimento-kül değerlerinde oluşturulan katkısız dolgu karışımlarının kısa dönemli (28-90 gün) dayanım değerleri

Numunelerin uzun dönemli (28-90 gün) dayanım değerleri incelendiğinde CEM I çimentosu CEM II çimentosuna kıyasla az miktarda da olsa fazla dayanıma sahip olduğu görülmüştür (Şekil 3.22). Şekil incelendiğinde 28 günlük kür süresinde en yüksek dayanım değeri CEM I çimentosuyla hazırlanan %25 karışım oranlı numunelerden 38,27 MPa değeriyle elde edilmiştir. 90 günlük kür süresinde ise en yüksek dayanım değeri %25

karışım oranı ile CEM I çimentosuyla hazırlanan karışım numunelerinden 58,92 MPa değer ile elde edilmiştir. 28 ve 90 günlük numunelerde en düşük dayanım değerleri ise sırasıyla 30,84 ve 44,97 MPa ile %20 çimento içerikli CEM II çimentosuyla hazırlanan karışımlardan elde edilmiştir.

Şekil 3.23 CEM I ve CEM II çimentosuyla hazırlanan ikinci ve üçüncü karışım numunelerinin birinci karışım numunelerine göre dayanım değerlerindeki azalmanın yüzde miktarını göstermektedir. CEM I çimentosuyla ikinci karışım oranlarında yapılan numunelerin birinci karışım oranı ile yapılanlara göre bütün kür sürelerinde %9 ile %15 arasında bir dayanım azalması gösterdiği görülmüştür. Üçüncü karışım oranlarıyla yapılanlar ise bütün kür sürelerinde %18 ile %26 arasında dayanımda bir azalma görülmüştür. Yine aynı şekilde CEM II çimentosuyla yapılan karışımlarda 2. karışım oranları ile hazırlanan numunelerin 1. karışım oranı ile hazırlananlara göre %7 ile %17 oranında bir dayanım azalması mevcuttur. Üçüncü karışım oranlarında ise %16 ile %32 oranında dayanımda bir azalma söz konusudur.



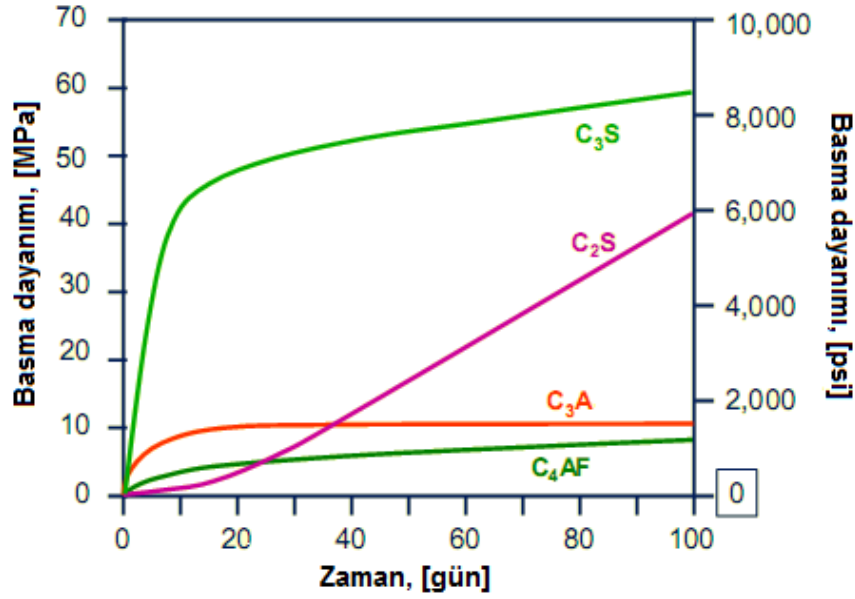
Şekil 3.23. İkinci ve üçüncü karışım oranları ile hazırlanan numunelerin birinci karışım oranlarıyla hazırlanan numunelerle dayanım kıyaslaması

Hazırlanan karışım numunelerinde aynı karışım oranlarında farklı çimentolarla oluşturulan numunelerin kısa dönemli kür sürelerinde dayanım değerleri birbirine yakın çıkmıştır. Ancak CEM I çimentosu CEM II çimentosuna kıyasla biraz daha fazla dayanım

değeri vermiştir. Çimentoların dayanım değerlerinin birbirine yakın çıkması mekanik özelliklerinin yakın olmasından kaynaklıdır. Uzun dönemli kür sürelerinde ise (28-90 gün) aradaki dayanım değeri farkı biraz daha artmaktadır. Bu kür süresi dönemlerinde CEM I çimentosu CEM II'ye kıyasla daha fazla dayanım değeri vermiştir ve bu durumun çimentoların ana bileşenleriyle alakalı olduğu düşünülmüştür. CEM II çimentosunun CEM I çimentosuna göre tane boyutunun daha ince olması oluşturulan numunelerin mekanik dayanımı açısından avantajlı olsada CEM II çimentosunun bileşenlerinde doğal puzolan ve kalker gibi ilave ürünlerin olması ve çalışmada atık malzeme olarak uçucu külün kullanılması bu dayanım düşüşüne etken sayılabilir. Yani karışımdaki toplam puzolan malzeme miktarının fazla olması bu düşüşe sebebiyet verdiği düşünülmektedir.

Elde edilen sonuçlar literatürle de paralellik arz etmektedir. Ashraf ve Noor (2011) çalışmalarında CEM I ve CEM II çimentolarının dayanım, işlenebilirlik ve geçirgenlik bakımından karşılaştırmalarını yapmışlardır. 28 günlük kür süresi sonunda CEM I çimentosunun CEM II çimentosuna göre yüksek dayanım verdiğini ve bu durumu CEM I çimentosuyla oluşturulan numunelerin daha düşük işlenebilirlik ve permeabilitesinden kaynaklı olduğunu belirtmişlerdir. Ülker (2010) yaptığı çalışmasında TS EN 196-1'e göre çeşitli çimentoların basınç dayanım değerlerini karşılaştırmıştır. Çalışmasında sabit su oranı ve sabit işlenebilirlik gibi iki farklı yöntemle CEM I ve CEM II çimentoları ile yapılan numunelerin 2 ve 28 günlük basınç dayanım değerlerini bulmuştur. Elde ettiği sonuçlara göre her iki karışım şeklinde de CEM I ve CEM II çimentosuna ait numunelerin basınç dayanımlarının birbirine çok yakın değerler verdiğini ortaya koymuştur.

Şekil 3.24'te saf çimento bileşenleri ile üretilen karışımın dayanım gelişimi gösterilmektedir. Çimentolarda  $C_3S$  bileşeni hidrasyonun başlamasından kısa bir süre sonra sertleşmeye başlar. Aynı zamanda uzun dönem dayanım gelişimine en yüksek katkı bu bileşen tarafından sağlanır.  $C_2S$  bileşeni ise kısa dönemli dayanımdan ziyade uzun döneme katkısı daha fazladır. Diğer bileşenlerin  $C_3A$  ve  $C_4AF$  hem kısa hem de uzun dönem dayanıma katkıları  $C_3S$  ve  $C_2S$  kadar olmamaktadır (Mindess vd, 2003). Çalışmada kullanılan çimentoların ise bileşen değerleri birbirinden farklıdır. CEM I çimentosunun bileşen değerleri CEM II çimentosundan daha yüksektir. CEM II çimentosunun katkılı çimento olması buna sebebiyet vermiştir. Bundan dolayı CEM II çimentosuyla oluşturulan numunelerin dayanım değerleri CEM I çimentosundan biraz daha düşük seviyede gerçekleşmiştir.



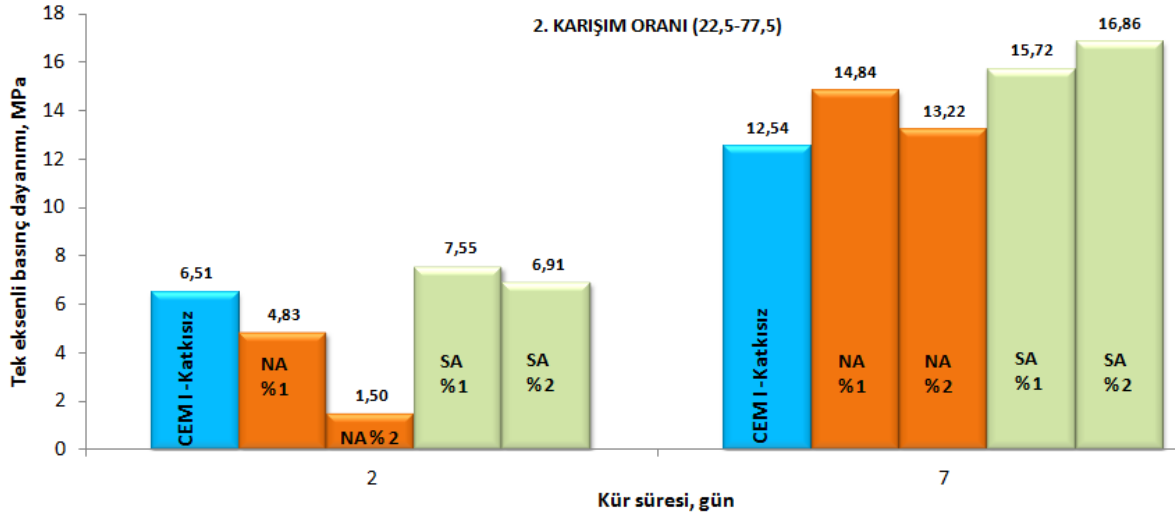
Şekil 3.24. Saf çimento bileşenlerinin dayanım gelişimi (Mindess vd, 2003).

### 3.3.1.2. Akışkanlaştırıcı Tipi ve Miktarının Dayanıma Etkisi

Çalışmada normal ve süper olmak üzere iki farklı akışkanlaştırıcı tipi iki farklı oranda kullanılmıştır. Kullanılan akışkanlaştırıcıların etkisini görmek için katkı kullanılmayan karışımlarla karşılaştırması yapılmıştır. Akışkanlaştırıcıların etkilerini iki farklı çimento oranında kısa (2-7 gün) ve uzun (28-90 gün) kür sürelerinde olacak biçimde farklı şekillerde gösterilmiştir. İkinci karışım oranlarında CEM I ve CEM II çimentosuyla yapılan ve farklı oranlarda ve tipte akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerin kısa ve uzun dayanıma etkileri Şekil 3.25-28'te gösterilmiştir. Üçüncü karışım oranlarında CEM I ve CEM II çimentosuyla yapılan ve farklı oranlarda ve tipte akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerin kısa ve uzun dayanıma etkileri ise Şekil 3.29-32'de gösterilmiştir.

Şekil 3.25'te CEM I çimentosuyla ikinci karışım oranında oluşturulan ve farklı oranlarda kullanılan NA ve SA tipi akışkanlaştırıcıların numuneler üzerinde kısa gün periyodunda dayanıma etkileri görülmektedir. NA katkısı ile her iki çimento tipinde oluşturulan %1 ve %2 ilaveli numunelerin 2 gün dayanımları katkı kullanılmayan numunelere göre daha düşük çıkmıştır. CEM I çimentosu ile oluşturulan katkısız numunenin 2 günlük dayanım değeri 6,51 MPa iken %1 NA katkı ilaveli numunelerin dayanım değeri 4,83 MPa ve %2 katkılı numunenin dayanım değeri ise 1,50 MPa'dır. Katkılı numunelerin katkısız numunelere göre dayanım kaybı %1 için yaklaşık %26, %2

için %77'dir. 7 günlük kür süresinde ise NA katkısı ile oluşturulan %1 ve %2 ilaveli numunelerin dayanımları katkı kullanılmayan numunelere göre daha yüksek değerde çıkmıştır.

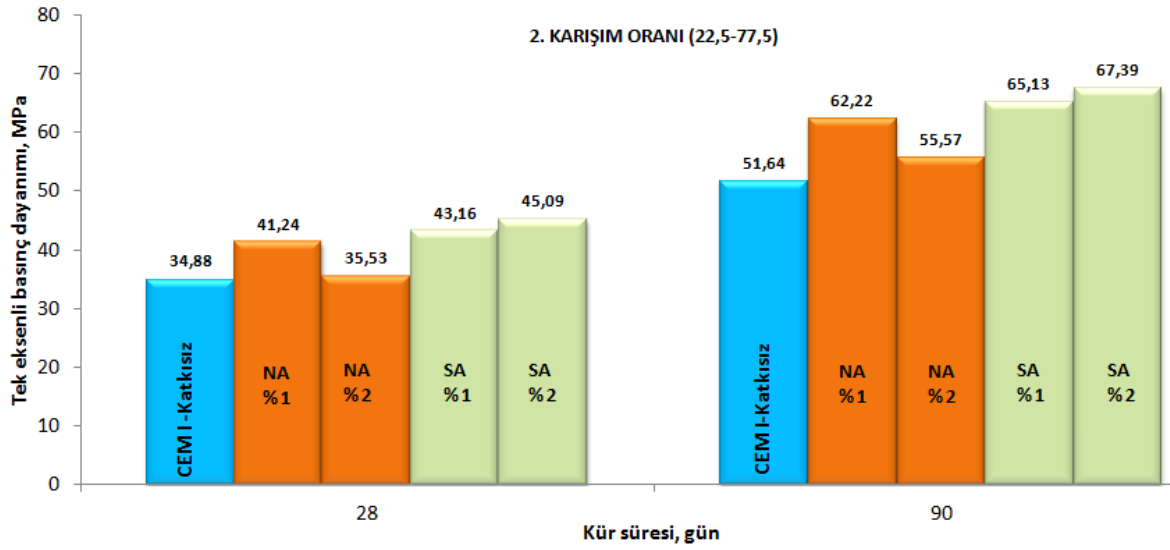


Şekil 3.25. İkinci karışım oranında CEM I çimentosuyla yapılan karışımlarda akışkanlaştırıcı tipi (SA ve NA) ve oranının kısa (2-7 gün) dönemli dayanıma etkisi

SA katkılı numunelerin dayanım değerlerinde ki durum ise NA katkılı numunelerden 2 günlük kür dönemlerinde biraz farklılık arz etmektedir. SA katkılı numunelerin 2 günlük kür süresinde dayanım değerlerinin katkısız numunelere göre yüksek çıktığı görülmüştür. CEM I çimentosuyla oluşturulan 2 günlük numunelerin dayanım değerlerine baktığımızda katkısız numune 6,51 MPa iken %1 SA katkılı numune 7,55 MPa ve %2 SA katkılı numune ise 6,91 MPa'dır. Burada SA katkılı numunelerin 2 günlük kür süresinde dayanım kazanma oranları ise %1 katkılı numunelerde %16 ve %2 katkılı numunelerde ise %6'dır. 7 günlük kür süresinde ise SA katkısı ile oluşturulan %1 ve %2 ilaveli numunelerin dayanımları katkı kullanılmayan ve NA katkısı kullanılan numunelere göre daha yüksek değerde çıktığı Şekil 3.25'de görülmektedir.

Şekil 3.26'da CEM I çimentosuyla ikinci karışım oranında oluşturulan ve farklı oranlarda NA ve SA kullanılan numunelerin uzun dönemli (28-90 gün) kür süresinde numune dayanımlarına etkileri görülmektedir. Şekil incelendiğinde katkı kullanılan bütün numunelerin uzun dönemli kür süresinde dayanım değerlerinin katkısız numuneye göre yüksek olduğu görülmüştür. CEM I çimentosuyla oluşturulan katkısız numune 34,88 MPa,

%1 NA katkıli numune 41,24 MPa ve %2 NA katkıli ise 35,53 MPa dayanım değerindedir. Bu numunelerde katkısiz numuneye göre dayanım kazanım oranları %1 katkıli numunede %18 ve %2 katkıli numunede ise %2 civarındadır. 90 günlük numunelerde ise katkısiz numune dayanımı 51,64 MPa, %1 NA katkıli numune 62,22 MPa ve %2 katkıli numune ise 55,57 MPa'dır. Bu numunelerdeki dayanım kazanımı ise %1 için %17, %2 için %7,5'dır.

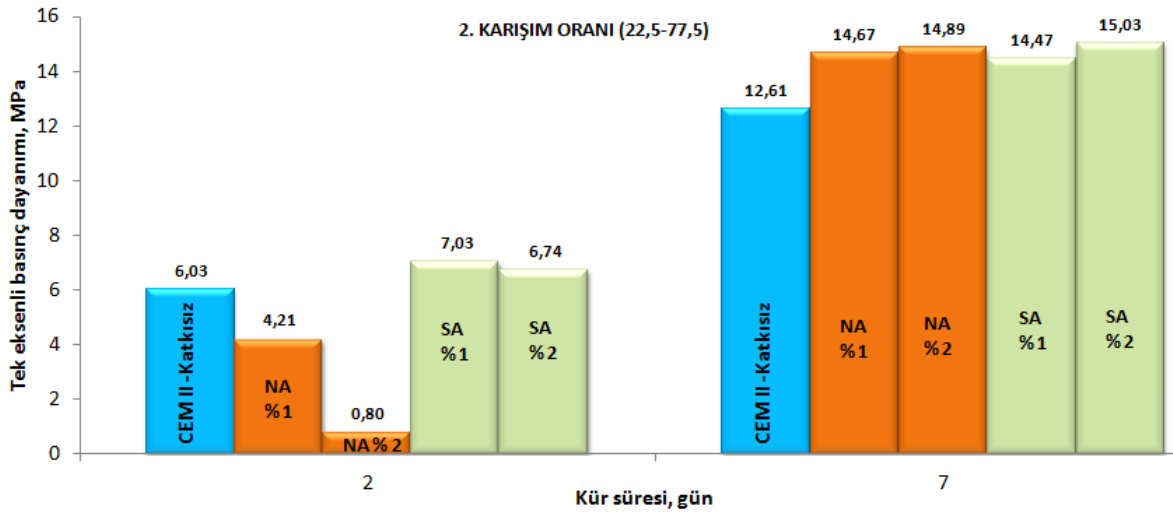


Şekil 3.26. İkinci karışım oranında CEM I çimentosuyla yapılan karışımlarda akışkanlaştırıcı tipi (SA ve NA) ve oranının uzun (28-90 gün) dönemli dayanıma etkisi

Aynı karışım oranında SA katkıli numunelerin dayanım değerlerine baktığımızda 28 günlük kür süresinde %1 SA katkıli numune 43,16 MPa, %2 SA katkıli numune 45,09 MPa değerinde iken katkısiz numunenin dayanımı 34,88 MPa olarak ölçülmüştür. Bu kür süresinde SA kullanılan numunelerin katkısiz numunelere göre dayanım kazanma oranları %1 SA katkıli numunelerde %24 ve %2 SA katkıli numunelerde ise %29 civarındadır. 90 günlük numunelerde ise katkısiz numunelerin dayanım değeri 51,64 MPa iken %1 SA katkıli numunenin dayanımı 65,13 MPa, %2 SA katkıli numunenin dayanımı ise 67,39 MPa'dır. Bu dönemde dayanım kazanımı ise %1 katkıli numunelerde %26 ve %2 katkıli numunelerde ise %30,5'dir.

İkinci karışım oranlarında CEM II çimentosuyla hazırlanan numunelerde de akışkanlaştırıcıların etkisi CEM I çimentosuyla hazırlanan numunelerdeki gibidir. CEM II çimentosuyla hazırlanan, SA ve NA katkısı kullanılan numunelerin kısa dönemli (2-7 gün)

kür sürelerinde dayanıma etkileri Şekil 3.27’de verilmiştir. CEM II çimentosuyla oluşturulan ve katkı kullanılmayan numunelerin 2 günlük dayanım değeri 6,03 MPa, %1 NA katkısı ilave edilen numunelerin dayanım değerleri 4,21 MPa ve %2 NA katkılı numunelerin dayanım değeri ise 0,80 MPa’dır. Katkılı numunelerin katkısız numunelere göre dayanım kaybı %1 için %30 ve %2 için %87’dir. 7 günlük dayanım değerlerinde ise durum 2 günlük kür süresinden farklıdır. Bu dönemde numunelerin dayanım değerleri katkısız numuneden yüksek değerde çıkmıştır.

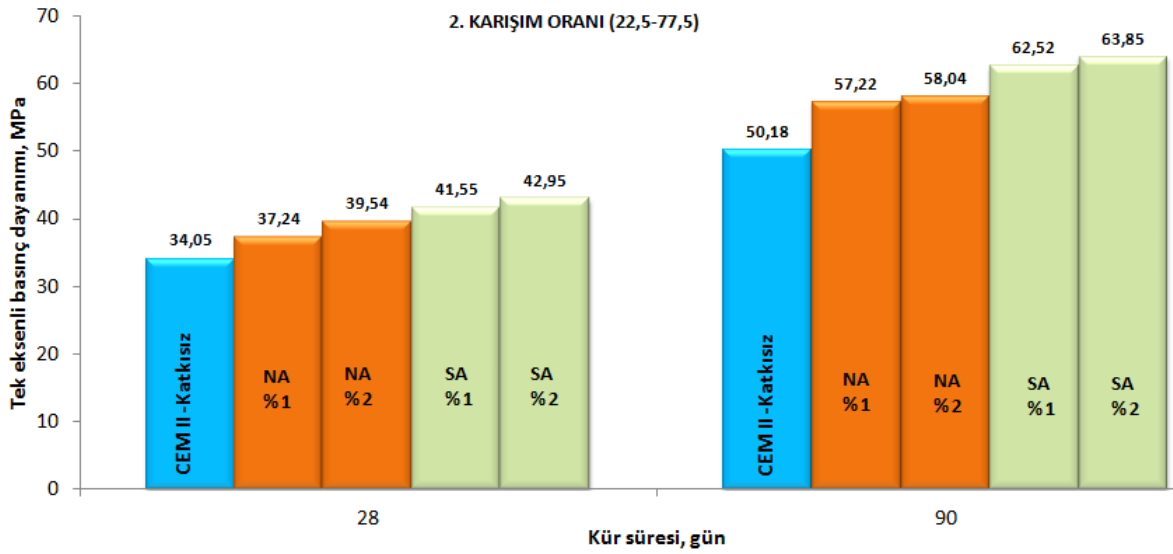


Şekil 3.27. İkinci karışım oranında CEM II çimentosuyla yapılan karışımlarda akışkanlaştırıcı tipi (SA ve NA) ve oranının kısa (2-7 gün) dönemli dayanıma etkisi

Aynı karışım oranında CEM II çimentosuyla hazırlanan numunelerde SA katkısının dayanıma olan etkileri incelendiğinde 2 günlük kür periyodunda katkı kullanılmayan numunelerin dayanım değeri 6,03 MPa iken %1 SA katkısı ilave edilen numunelerin dayanım değerleri 7,03 MPa ve %2 SA katkılı numunelerin dayanım değerleri ise 6,74 MPa’dır. Katkılı numunelerin katkısız numunelere göre dayanım kazanımı ise %1 SA için %16,5 ve %2 SA için %12’dir. 7 günlük dayanım değerlerinde SA katkılı numunelerin katkı kullanılmayan numunelere göre dayanımları yüksek çıkmıştır.

İkinci karışım oranında CEM II çimentosuyla oluşturulan uzun dönemli (28 ve 90 gün) dayanım değerleri incelendiğinde katkılı numunelerin katkısız numunelere göre daha yüksek değer verdiği görülmüştür (Şekil 3.28). CEM II çimentosuyla yapılan numunelerin 28 günlük kür süresindeki dayanım değerleri incelendiğinde katkısız numunelerin dayanım

değeri 34,05 MPa iken %1 NA katkıli malzemelerin 37,24 MPa ve %2 NA katkıli malzemelerin 39,54 MPa'dır. Katkıli numunelerin katkısizlere göre dayanımlarındaki artış miktarı %1 için %9 ve %2 için %16'dır. 90 günlük dayanım değerleri incelendiğinde katkısiz numune 50,18 MPa iken %1 NA katkıli numune 57,22 MPa ve %2 NA katkıli numune 58,04 MPa dayanım değerindedir. Katkıli numunelerin katkısizlere göre dayanımlarındaki artış miktarı ise %1 için %14 ve %2 için %15,5'dir.

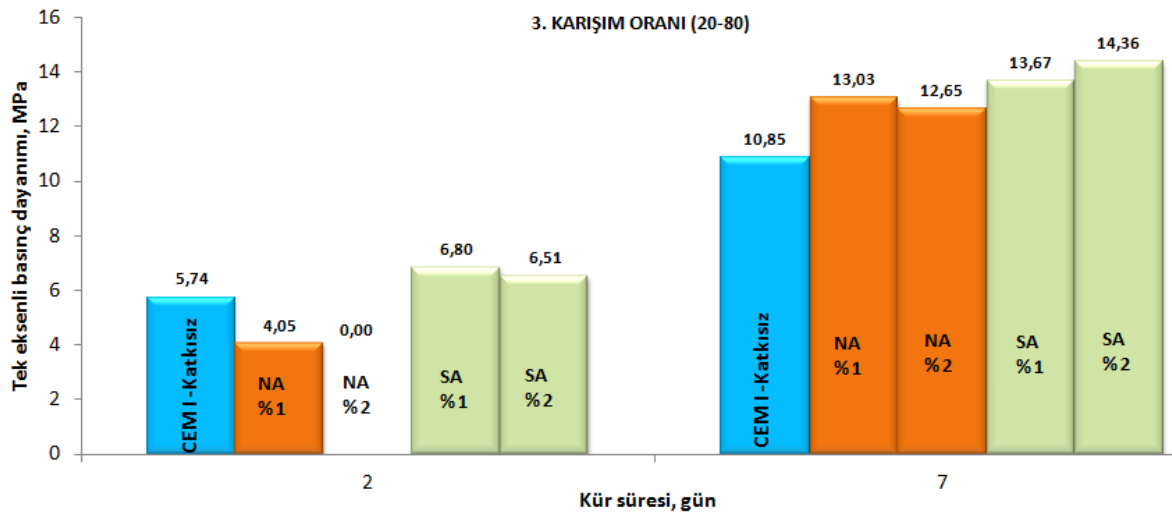


Şekil 3.28. İkinci karışım oranında CEM II çimentosuyla yapılan karışımlarda akışkanlaştırıcı tipi (SA ve NA) ve oranının uzun (28-90 gün) dönemli dayanıma etkisi

Aynı karışım oranında CEM II çimentosuyla oluşturulan numunelerde 28 günlük kür süresinde katkısiz numunelerin dayanım değeri 34,05 MPa iken %1 SA katkıli malzemelerin 41,55 MPa ve %2 SA katkıli malzemelerin 42,95 MPa'dır. Katkıli numunelerin katkısizlere göre dayanımlarındaki artış miktarı %1 SA için %22 ve %2 SA için %26'dır. 90 günlük kür süresinde dayanım değerleri incelendiğinde katkısiz numune 50,18 MPa iken %1 SA katkıli numune 62,52 MPa ve %2 SA katkıli numune 63,85 MPa değerindedir. Katkıli numunelerin katkısizlere göre dayanımlarındaki artış miktarı ise %1 SA için %24,5 ve %2 SA için %27'dir.

CEM I çimentosuyla üçüncü karışım oranlarında hazırlanan numunelerde akışkanlaştırıcı katkıların etkisi yine ikinci karışım oranlarıyla paralellik arz etmektedir. Kısa dönem (2-7 gün) kür sürelerinde NA katkıli numunelerin katkısiz numunelere oranla ikinci karışım oranlarında olduğu gibi daha düşük dayanıma sahip olduğu belirlenmiştir.

Şekil 3.29'da üçüncü karışım oranında CEM I çimentosuyla hazırlanan karışımlarda NA ve SA katkılarının kısa kür (2-7 gün) periyodunda dayanıma olan etkileri gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde katkısız numunenin dayanım değeri 5,74 MPa iken %1 NA katkılı numunenin dayanım değeri 4,05 MPa ve %2 NA katkılı numunenin dayanım değeri ise elde edilememiştir. Katkılı numunelerin katkısız numunelere göre dayanım kaybı %1 NA için %29,5 ve %2 NA için %100'dür. 7 günlük dayanımlarda ise NA'nın her iki oranda kullanıldığı numunelerin dayanım değerleri katkısız numuneye göre yüksek değerde çıkmıştır.

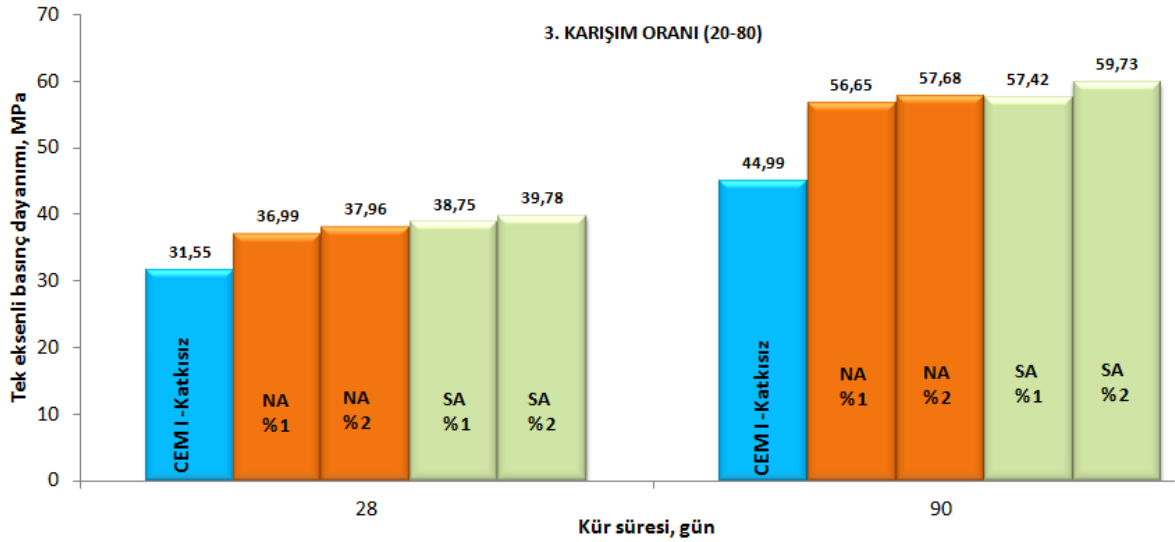


Şekil 3.29. Üçüncü karışım oranında CEM I çimentosuyla yapılan karışımlarda akışkanlaştırıcı tipi (SA ve NA) ve oranının kısa (2-7 gün) dönemli dayanıma etkisi

Üçüncü karışım oranında SA katkılı numunelerde 2 günlük kür periyodunda durum NA'lardan farklıdır. Bu kür periyodunda CEM I çimentosuyla oluşturulan katkısız numunelerin dayanım değerleri 5,74 MPa iken %1 SA katkılı numunelerin dayanım değerleri 6,80 MPa ve %2 SA katkılı numunelerin dayanım değerleri ise 6,51 MPa'dır. Bu kür süresinde %1 SA katkılı numunelerin dayanım kazanımı %18, %2 SA katkılı numunelerin dayanım kazanımı ise %13'tür. 7 günlük dayanımlarda ise her iki oranda kullanılan SA katkılı numunelerin dayanım değerleri katkısız numuneye göre yüksek değerde çıkmıştır.

Üçüncü karışım oranlarında CEM I çimentosuyla oluşturulan numunelerde akışkanlaştırıcıların uzun dönemli (28-90 gün) dayanıma etkileri Şekil 3.30'da

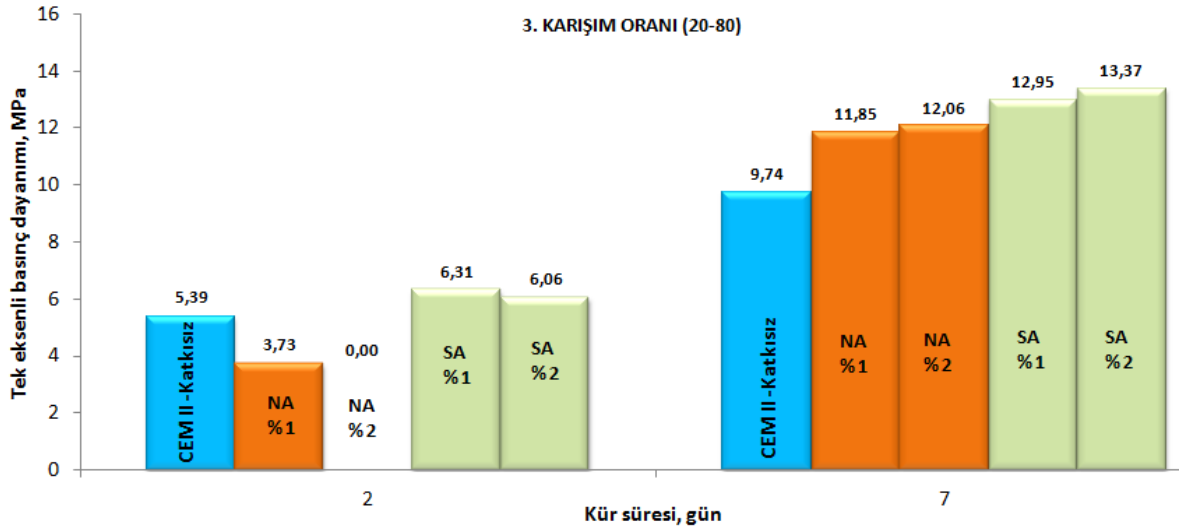
görülmektedir. Numunelerin 28 günlük dayanım değerlerin baktığımızda katkısız numuneler 31,55 MPa iken %1 NA katkılı numuneler 36,99 MPa ve %2 NA katkılı numuneler ise 37,96 MPa dayanım değerindedir. Katkılı numunelerin katkısız numunelere göre dayanım kazanımı %1 NA için %17 ve %2 NA için %20 değerindedir. 90 günlük kür sürelerinde katkısız numuneler 44,99 MPa, %1 NA katkılı numune 56,65 MPa ve %2 NA katkılı numune 57,68 MPa dayanım değerindedir. Bu kür süresinde katkılı numunelerin katkısızlara göre dayanım artışları %1 NA için %26, %2 NA için %28'dir. Katkılı numunelerin katkısız numunelere göre dayanım kazanımı %1 SA için %18,5 ve %2 SA için %13'dür.



Şekil 3.30. Üçüncü karışım oranında CEM I çimentosuyla yapılan karışımlarda akışkanlaştırıcı tipi (SA ve NA) ve oranının uzun (28-90 gün) dönemli dayanıma etkisi

Aynı karışım oranında CEM I çimentosuyla oluşturulan numunelerde SA katkısı için uzun dönemli dayanım değerleri incelendiğinde kullanılan her iki katkı oranı için dayanım değerlerinin yüksek olduğu Şekil 3.30'da görülmektedir. 28 günlük kür süresinde katkısız numuneler 31,55 MPa iken %1 SA katkılı numuneler 38,75 MPa ve %2 SA katkılı numuneler ise 39,78 MPa dayanım değerindedir. Katkılı numunelerin katkısız numunelere göre dayanım kazanımı %1 SA için %23 ve %2 SA için %26 değerindedir. 90 günlük kür süresinde katkısız numune 44,99 MPa iken %1 SA katkılı numune 57,42 MPa ve %2 SA katkılı numune 59,73 MPa dayanım değerindedir. Bu kür süresinde katkılı numunelerin katkısızlara göre dayanım artışları %1 SA için %27,5, %2 SA için %32,5'dir.

Üçüncü karışım oranında CEM II çimentosuyla hazırlanan ve akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerin kısa kür periyodunda dayanım değerleri Şekil 3.31’de verilmiştir. CEM II çimentosuyla oluşturulan numunelerin 2 günlük dayanım değerlerine bakıldığında katkısız numunelerin dayanım değerleri 5,39 MPa, %1 NA katkılı numunelerin dayanım değerleri 3,73 MPa ve %2 NA katkılı numunelerin dayanım değerleri ise elde edilememiştir. Bu kür periyodunda katkısız numunelerin katkı ilavesiyle yaşadığı dayanım kaybı oranları ise %1 NA katkılı numunelerde %30, %2 NA katkılı numunelerde %100’dür. 7 günlük numunelerde ise bütün katkı kullanım oranlarında dayanım değerleri katkısız numunelere göre yüksek çıkmıştır.

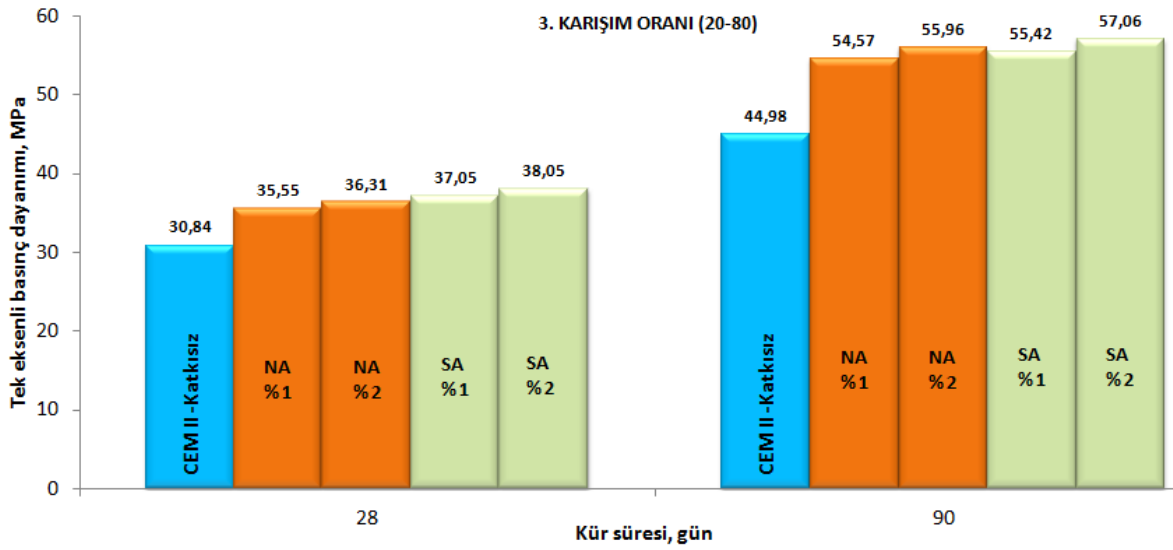


Şekil 3.31. Üçüncü karışım oranında CEM II çimentosuyla yapılan karışımlarda akışkanlaştırıcı tipi (SA ve NA) ve oranının kısa (2-7 gün) dönemli dayanıma etkisi

Aynı karışım oranında CEM II çimentosuyla oluşturulan SA katkılı numunelerin dayanım değerleri incelendiğinde 2 gün kür periyodunda katkısız numuneler 5,39 MPa, %1 SA katkılı numunelerin 6,31 MPa ve %2 SA katkılı numuneler 6,06 MPa dayanım değerlerindedir. 2 günlük kür periyodunda katkısız numunelerin katkı ilavesiyle yaşadığı dayanım kazanım oranları ise %1 SA katkılı numunelerde %17, %2 SA katkılı numunelerde %12 civarındadır. 7 günlük dayanım değerlerinde de SA katkılı numuneler katkısız numunelere göre yüksek dayanım değeri vermiştir.

Üçüncü karışım oranında CEM II çimentosuyla yapılan karışımların uzun dönemli (28-90 gün) kür sürelerinde dayanım değerleri Şekil 3.32’de verilmiştir. CEM II

çimentosuyla yapılan numunelerde 28 günlük kür zamanında katkısız numunelerin dayanımı 30,84 MPa, %1 NA katkılı numunelerin dayanımları 35,55 MPa ve %2 NA katkılı numunelerin dayanımları ise 36,31 MPa çıkmıştır. Katkılı numunelerin katkısızlara göre dayanım kazanımları %1 NA ilavesi için %15, %2 NA ilavesi için ise %17'dir. 90 günlük kür sürelerinde ise katkısız numunelerin dayanım değeri 44,98 MPa iken %1 NA katkılı numune 54,57 MPa ve %2 NA katkılı numune 55,96 MPa dayanım değerindedir. Bu kür süresinde katkılı numunelerin dayanım kazanımları ise %1 NA için %21 ve %2 NA için %24,5'dir.



Şekil 3.32. Üçüncü karışım oranında CEM II çimentosuyla yapılan karışımlarda akışkanlaştırıcı tipi (SA ve NA) ve oranının uzun (28-90 gün) dönemli dayanıma etkisi

Aynı karışım oranında 28 günlük kür süresinde CEM II çimentosuyla oluşturulan numunelerde katkısızların dayanımı 30,84 MPa, %1 SA katkılı numunelerin dayanımları 37,05 MPa ve %2 SA katkılı numunelerin dayanımları ise 38,05 MPa çıkmıştır. Katkılı numunelerin katkısızlara göre dayanım kazanımları %1 SA ilavesi için %20, %2 NA ilavesi için ise %23'dür. 90 günlük kür sürelerinde 90 günlük kür periyodunda ise katkısız numuneler 44,98 MPa iken, %1 SA katkılı numuneler 55,42 MPa ve %2 SA katkılı numuneler ise 57,06 MPa değerindedir. Katkılı numunelerin dayanım kazanımları ise %1 SA için %23 ve %2 SA için %27'dir.

İkinci ve üçüncü karışım oranlarında CEM I çimentosuyla oluşturulan katkısız numuneler CEM II çimentosuyla oluşturulan numunelere göre daha yüksek dayanım

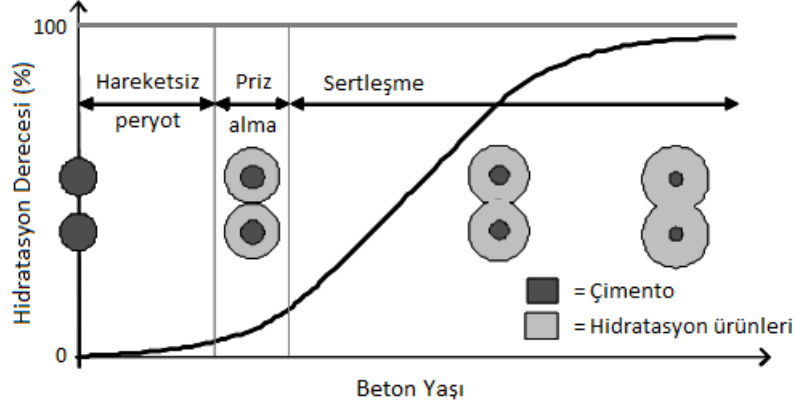
değerindedir. Katkı kullanılmayan numunelerin dayanım değerlerinde CEM I çimentosu CEM II çimentosuna göre biraz daha yüksek değer verdiği ve bu etkinin akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerin dayanım değerlerinde de devam ettiği görülmüştür.

Akışkanlaştırıcılardan SA katkısı ile oluşturulan numunelerin NA ile oluşturulan numunelere göre dayanım değeri daha yüksek çıkmıştır. Her iki akışkanlaştırıcı katkının su azaltma miktarları birbirine yakın çıkmasına rağmen SA katkısının dayanımda daha iyi değerler verdiği görülmüştür. Üçüncü karışım oranlarında ise %2 NA katkılı karışımların her iki çimento tipinde dayanım değerleri elde edilememiştir. Uzun dönemli kür süresinde (28-90 gün) bütün karışım oranlarında ise akışkanlaştırıcı katkı ilaveli karışımların dayanım değerleri katkısızlara göre yüksek çıkmıştır.

Akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların dayanım üzerine olan artırıcı yönde etkileri literatür ile paralellik arz etmektedir (Ramachandran ve Malhotra, 1995; Rixom ve Mailvaganam, 1999). Ancak NA katkısı ile oluşturulan bazı numunelerde kısa kür periyodunda dayanım değeri elde edilememiştir. Bunun sebebi kullanılan kimyasal katkının üretici firma tarafından verilen kullanım oranlarının üzerine çıkılmasıdır. Kimyasal katkılarda belirtilen kullanım oranlarının üzerine çıkılması durumunda oluşturulan beton veya benzeri karışımların priz sürelerinde ve betonun hareketsiz periyotlarında arttırıcı bir etki oluşturmaktadır (Charif vd., 1990). SA katkısının dayanımda daha yüksek değerler vermesi NA katkısının oranları ile alakalıdır.

Akman (2007) kaynağında ölü dönem (dormant period) olarak ifade edilen betonda hareketsiz periyot, çimentonun su ile temas etmeye başladıktan sonra çimento içerisindeki iyonik türlerin su içerisine çözünmeye başladığı ana kadar olan ve herhangi bir kimyasal aktivitenin gerçekleşmediği zaman dilimi olarak tarif edilir (Şekil 3.33) (Trezza, 2007; URL 10). Bazı çalışmalarda ise tetikleme veya başlatma periyodu (induction period) olarak ifade edilmektedir. Kimyasal reaksiyonun çok yavaş seyrettiği zaman dilimi olarak kabul edilir (Cheung vd., 2011). Bu periyotta çimento belirli bir zaman dilimi boyunca plastik durumda kalır. Hareketsiz periyodun sonunda ise prizlenme başlar ve betonun mukavemet kazanması gelişir. Bu çalışmada ise NA katkısının %2 ilavesi bu katkı için belirlenen ilave oranından fazla olduğu ve dolgu karışımlarının çökme değeri 20 cm gibi çok yüksek değerde olduğu için dolgu karışımlarında hareketsiz periyot zamanını uzatmıştır. Diğer bir ifadeyle çimento hamurunun plastik durumunu 2 günden fazla bir zaman diliminde tutmuştur. Aynı zamanda bu dilimde oldukça yavaş gelişen kimyasal reaksiyonun zamanı da ötelenmiştir. Böylelikle karışımın priz alma süresi uzamıştır. Priz

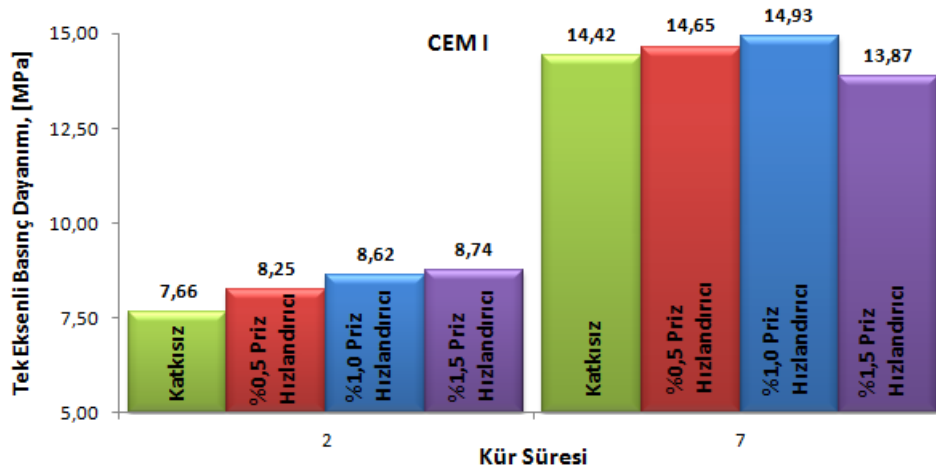
alma süresi ve sertleşme süresi geciken dolgu karışımının 2 günlük kür periyodunda dayanım kazanması gerçekleşmemiştir.



Şekil 3.33. Hidratasyon gelişme derecesinin fiziksel açıklaması (Schindler, 2004).

### 3.3.1.3. Priz Hızlandırıcı ve Miktarının Dayanıma Etkisi

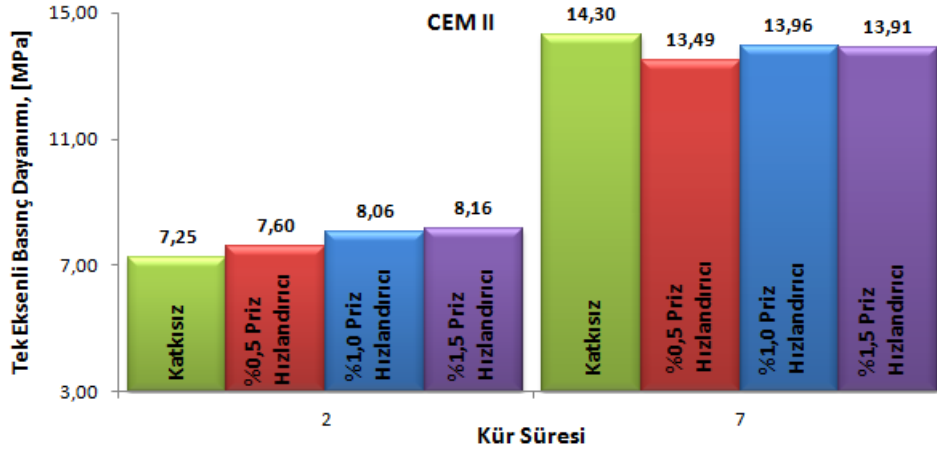
Sodyum silikat tipi priz hızlandırıcı katkının dolgu içerisinde dayanıma etkisinin belirlenmesi için her iki çimento tipiyle 1. karışım oranında katı malzeme miktarının 3 farklı oranında (%0,5-%1,0-%1,5) kullanılarak numuneler oluşturulmuş ve dayanım değerleri incelenmiştir. CEM I çimentosuyla oluşturulan katkı kullanılan ve kullanılmayan karışım numunelerinin kısa dönemli dayanım değerleri Şekil 3.34'te görülmektedir.



Şekil 3.34. Priz hızlandırıcı miktarının CEM I çimentosuyla oluşturulan karışımların kısa dönemli (2-7 gün) dayanım gelişimine etkisi

Kısa kür periyodunda (2–7 gün) dayanım değerleri incelendiğinde priz hızlandırıcı katkılı numunelerin katkısız numunelere göre yüksek dayanım değerinde olduğu tespit edilmiştir. CEM I çimentosuyla oluşturulan ve katkı kullanılmayan numunelerin dayanım değeri 7,66 MPa iken, %0,5 priz hızlandırıcı katkılı numunenin dayanımı 8,25 MPa, %1 priz hızlandırıcı katkılı numunenin dayanımı 8,62 MPa ve %1,5 priz hızlandırıcı katkılı numunenin dayanımı ise 8,74 MPa'dır. 7 günlük dayanım değerlerinde ise %1,5 katkılı numunenin dayanım değeri katkısız numuneden düşük çıkmıştır. Katkısız numunenin 7 günlük kür süresinde dayanımı 14,42 MPa iken, %0,5 katkılı numunenin 14,65 MPa, %1,0 katkılı numunenin 14,93 ve %1,5 katkılı numunenin dayanımı 13,87 MPa değerindedir.

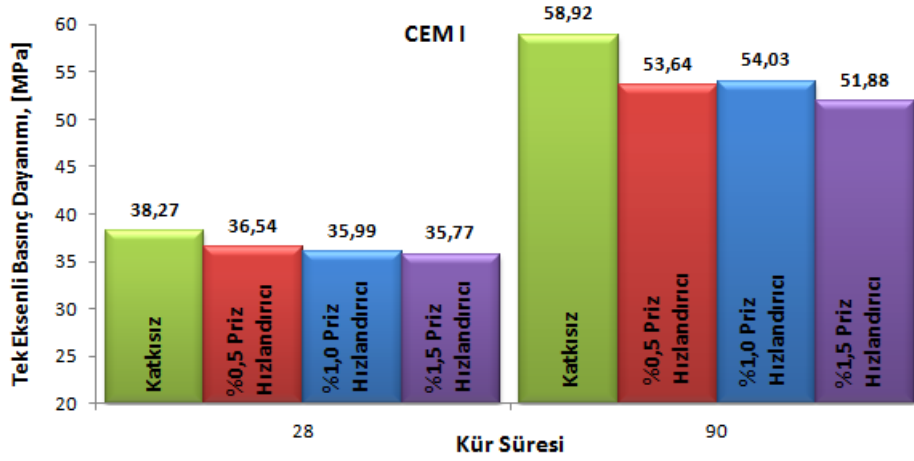
CEM II çimentosuyla hazırlanan karışımlarda 2 günlük kür süresinde priz hızlandırıcı katkı kullanılan numunelerin dayanım değerleri katkısız numunelere göre yüksek değerde çıkmıştır (Şekil 3.35). Katkısız numunenin dayanım değeri 7,25 MPa iken, %0,5 priz hızlandırıcı katkılı numunenin dayanımı 7,60 MPa, %1 priz hızlandırıcı katkılı numunenin 8,06 MPa ve %1,5 priz hızlandırıcı katkılı numunenin dayanım değeri ise 8,16 MPa'dır. 7 günlük kür süresinde ise katkısız numunenin dayanım değeri 14,30 MPa iken %0,5 priz hızlandırıcı katkılı numunenin dayanımı 13,49 MPa, %1 priz hızlandırıcı katkılı numunenin 13,96 MPa ve %1,5 priz hızlandırıcı katkılı numunenin ise 13,92 MPa'dır.



Şekil 3.35. Priz hızlandırıcı miktarının CEM II çimentosuyla oluşturulan karışımların kısa dönemli (2–7 gün) dayanım gelişimine etkisi

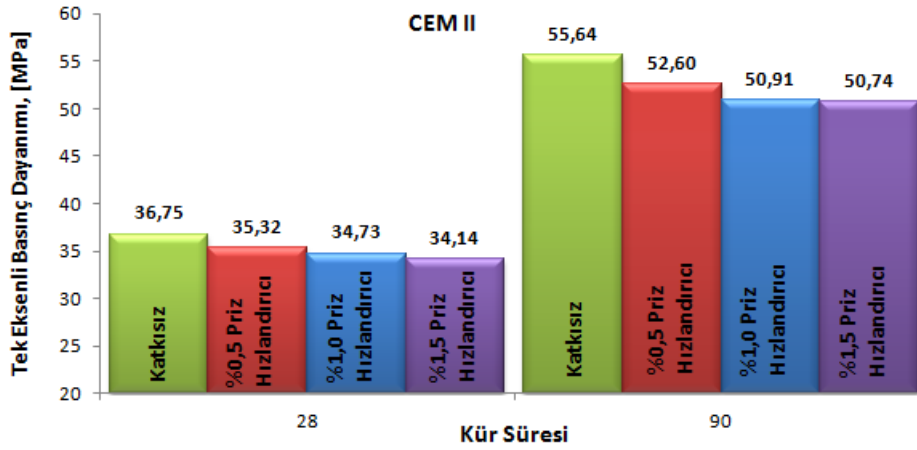
Uzun dönemli dayanım değerlerine baktığımızda katkısız numunelerin katkılı numunelere göre yüksek dayanım değeri verdiği tespit edilmiştir (Şekil 3.36). CEM I çimentosuyla oluşturulan karışımların 28 günlük kür periyodu incelendiğinde katkısız

numunelerin dayanım değeri 38,27 MPa iken, %0,5 priz hızlandırıcı katkıli numuneler 36,54 MPa, %1 priz hızlandırıcı katkıli numuneler 35,99 MPa ve %1,5 priz hızlandırıcı katkıli numuneler ise 35,77 MPa dayanım değeriindedir. 90 günlük kür süresinde ise katkısiz numuneler 58,92 MPa, %0,5 priz hızlandırıcı katkıli numuneler 53,64 MPa, %1 priz hızlandırıcı katkıli numuneler 54,03 MPa ve %1,5 priz hızlandırıcı katkıli numuneler 51,88 MPa dayanım değeri vermiştir. 90 günlük numunelerde priz hızlandırıcı katkıli numuneler katkısiz numuneye göre dayanım kaybına uğramıştır. %0,5 katkıli numunenin katkısizlere göre dayanım azalması %8,96, %1 katkıli numunenin %8,31 ve %1,5 katkıli numunenin ise %11,94'tür.



Şekil 3.36. Priz hızlandırıcı miktarının CEM I çimentosuyla oluşturulan karışımların uzun dönemli (28–90 gün) dayanım gelişimine etkisi

Priz hızlandırıcı katkıların CEM II çimentosuyla oluşturulan karışımlarda uzun dönemli dayanım değerlerine etkisi CEM I çimentosuna benzer şekildedir (Şekil 3.37). 28 günlük kür periyodunda katkısiz numunelerin dayanımı 36,75 MPa iken, %0,5 priz hızlandırıcı katkıli numuneler 35,32 MPa, %1 priz hızlandırıcı katkıli numuneler 34,73 MPa ve %1,5 priz hızlandırıcı katkıli numuneler ise 34,14 MPa dayanım değeriindedir. 90 günlük kür süresinde ise katkısiz numuneler 55,64 MPa iken %0,5 priz hızlandırıcı katkıli numuneler 52,60 MPa, %1 priz hızlandırıcı katkıli numuneler 50,91 MPa ve %1,5 priz hızlandırıcı katkıli numuneler 50,74 MPa dayanım değeri vermiştir. Bu sürede katkıli numunelerin katkısiz numunelere göre dayanım kaybı miktarı %0,5 priz hızlandırıcı katkıli numunede %5,47, %1 priz hızlandırıcı katkıli numunede %8,51 ve %1,5 priz hızlandırıcı katkıli numunede %8,81 oranındadır.



Şekil 3.37. Priz hızlandırıcı miktarının CEM II çimentosuyla oluşturulan karışımların uzun dönemli (28–90 gün) dayanım gelişimine etkisi

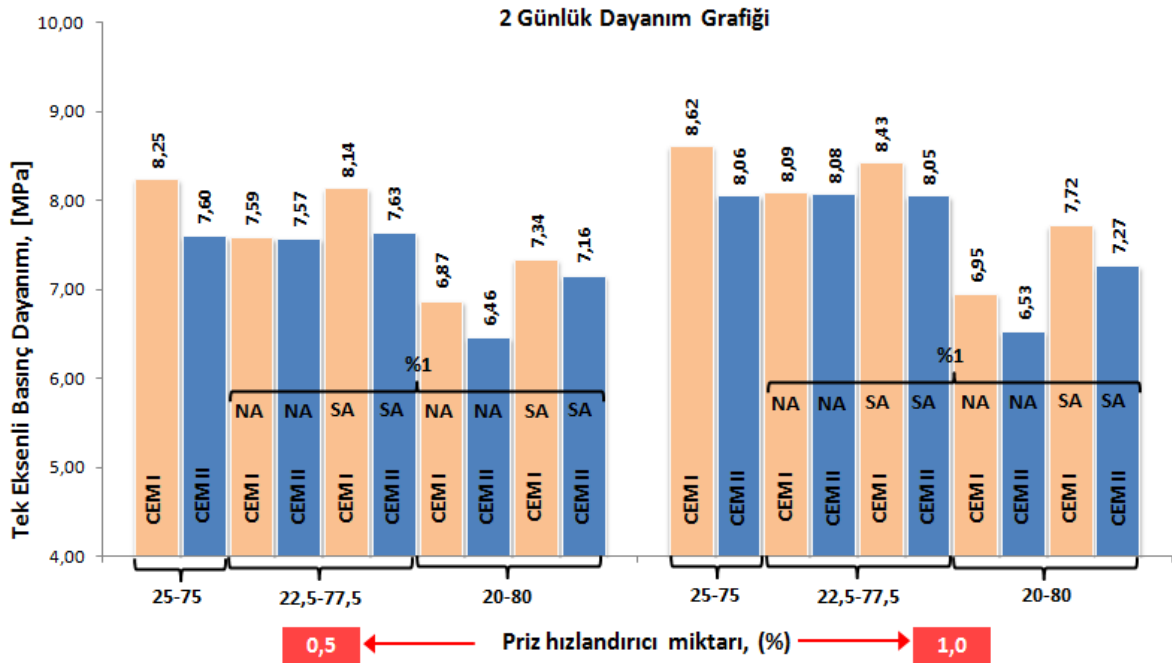
Kısa gün periyodunda (2 gün) genel olarak iki farklı çimento tipi ile oluşturulan numunelerde priz hızlandırıcı katkı kullanılan numunelerin dayanımı katkısız numunelere göre yüksek çıkmıştır. Ayrıca priz hızlandırıcı miktarı arttıkça dayanım değeri artmıştır. Ancak uzun kür sürelerinde ise (28–90 gün) her iki çimento tipinde tüm katkılı numunelerin dayanım değerleri katkısız numunelere göre düşük değerlerde çıkmıştır. Çimento tipi karşılaştırmasında ise CEM I çimentosuyla oluşturulan numunelerin dayanım değerleri CEM II çimentosuyla yapılanlara göre yüksek çıkmıştır. Priz hızlandırıcı katkıların yüksek  $C_3A$  oranına sahip çimentolar ile reaksiyon hızı fazla olmaktadır (Rixom ve Mailvaganam, 1999). CEM I çimentosunun özellikle  $C_3A$  ve  $C_2S$  bileşenlerinin CEM II çimentosuna göre yüksek oranda olması priz hızlandırıcı katkı ile olan karışımlarda dayanımın yüksek çıkmasına neden olmuştur.

#### 3.3.1.4. Akışkanlaştırıcı ve Priz Hızlandırıcı Katkıların Dayanıma Etkileri

Akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcıların aynı karışım içinde kullanıldığı numunelerin bütün kür sürelerinde dayanım değerleri Şekil 3.38-45 arasında verilmiştir. Şekiller sadece priz hızlandırıcı kullanılan 1. karışım oranındaki numuneler ile hem priz hızlandırıcı hem de akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılan 2. ve 3. karışım oranında oluşturulan numunelerin aynı kür süresinde dayanımlarının karşılaştırması şeklinde oluşturulmuştur.

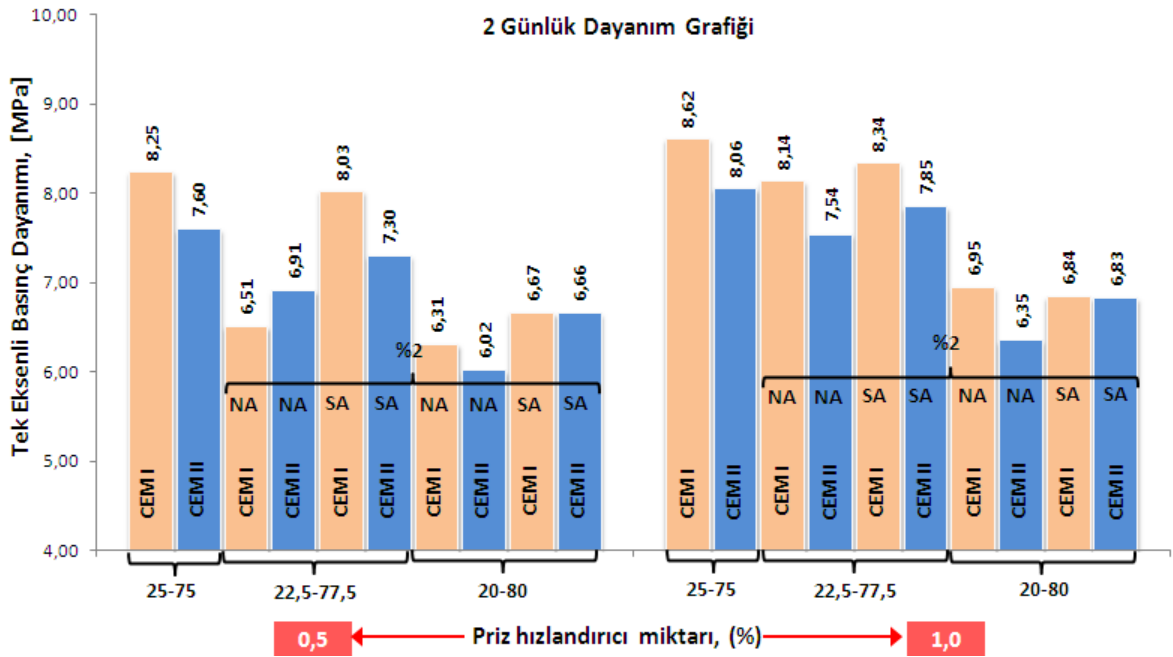
Şekil 3.38’de farklı tipte çimento ile birlikte akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı kimyasal katkı kullanılan karışımların 2 günlük dayanım karşılaştırması görülmektedir.

Şekil incelendiğinde karışımlarda çimento miktarının düşmesiyle dayanım değerinin düştüğü görülmüştür. Ayrıca priz hızlandırıcı oranının %0,5'ten %1'e yükselmesiyle 2 günlük dayanım değerlerinin arttığı görülmektedir. %0,5 priz hızlandırıcı katkılı numunelerde en yüksek dayanım değeri CEM I çimentosuyla 1. karışım oranında akışkanlaştırıcı katkı kullanılmayan numuneden 8,25 MPa değeri ile elde edilmiştir. %1 SA katkı kullanılan ve CEM I çimentosuyla hazırlanan numune 8,14 MPa dayanım değeri ile katkı kullanılmayan numuneye en yakın değerde çıkmıştır. En düşük dayanım değeri ise CEM II çimentosuyla 3. karışım oranında %1 NA ile hazırlanan numuneden 6,46 MPa değeri ile elde edilmiştir. %1 priz hızlandırıcı katkılı numunelerde ise en yüksek dayanım değeri CEM I çimentosuyla 1. karışım oranında akışkanlaştırıcı katkı kullanılmayan numuneden 8,62 MPa ile elde edilmiştir. Yine CEM I çimentosuyla 2. karışım oranında %1 SA akışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan numunenin dayanımı 8,43 MPa olarak gerçekleşmiş ve en yüksek dayanım değerine oldukça yakın çıkmıştır. En düşük dayanım değeri ise 3. karışım oranında CEM II çimentosu ve %1 NA katkısı ile oluşturulan numuneden 6,53 MPa ile elde edilmiştir.



Şekil 3.38. Her iki çimento tipinde hazırlanan ve priz hızlandırıcı katkının %0,5 ve %1 oranında kullanıldığı 1. karışım oranındaki numuneler ile aynı oranlarda priz hızlandırıcılar ile birlikte %1 oranında NA ve SA katkısının kullanıldığı 2. ve 3. karışım oranındaki numunelerin 2 günlük dayanım karşılaştırması

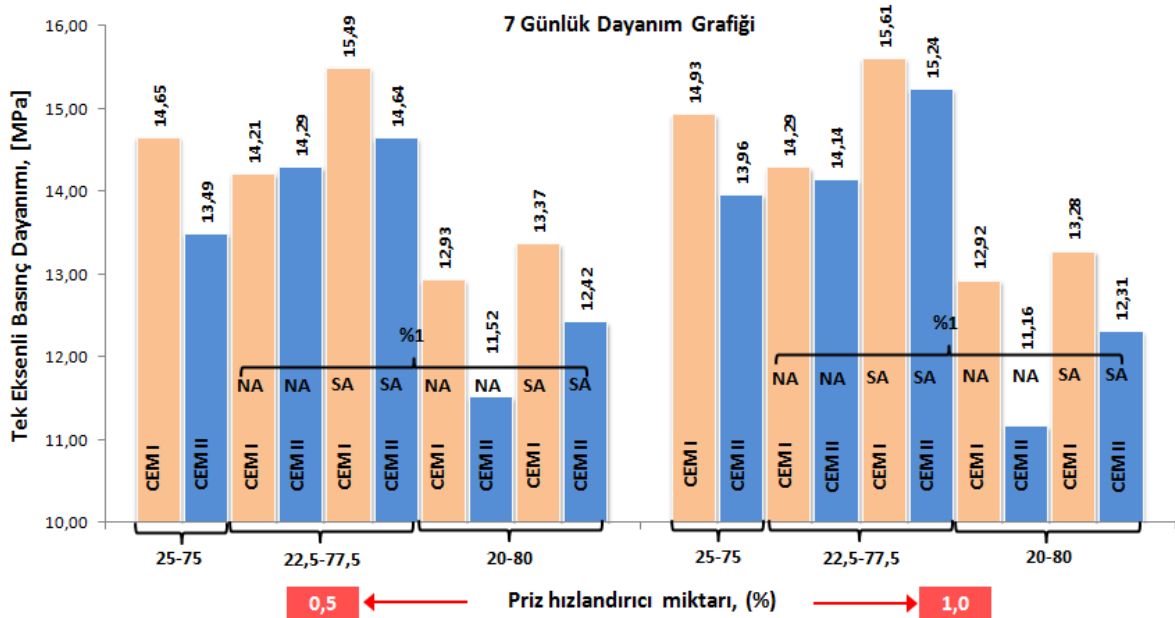
Akışkanlaştırıcı kullanım oranının %2'ye çıktığı ve priz hızlandırıcılar ile beraber kullanıldığı numunelerin 2 günlük dayanım değerleri Şekil 3.39'da verilmiştir. Bu oranda oluşturulan karışımlarda dayanıma etki %1 kullanılan karışımlarla aynıdır. Ancak priz hızlandırıcının %0,5 olduğu ve %2 NA kullanılan numunelerin dayanım değerlerinin daha düşük oranlarda gerçekleştiği görülmüştür. %0,5 priz hızlandırıcı kullanılan 2. karışım oranında CEM I çimentosu ve %2 SA katkısı ile oluşturulan numunenin dayanım değeri 8,03 MPa'dır ve akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerde en yüksek dayanım değeridir. En düşük dayanım değeri 3. karışım oranında CEM II çimentosu ve %2 NA katkısı ile oluşturulan numuneden 6,02 MPa ile elde edilmiştir. %1 priz hızlandırıcı katkılı numunelerde ise CEM I çimentosuyla 2. karışım oranında %2 SA akışkanlaştırıcı kullanılarak hazırlanan numunenin dayanımı 8,34 MPa olarak gerçekleşmiş ve en yüksek dayanım değerine yakın çıkmıştır. En düşük dayanım değeri ise 3. karışım oranında CEM II çimentosu ve %2 NA katkısı ile oluşturulan numuneden 6,35 MPa ile elde edilmiştir.



Şekil 3.39. Her iki çimento tipinde hazırlanan ve priz hızlandırıcı katkının %0,5 ve %1 oranında kullanıldığı 1. karışım oranındaki numuneler ile aynı oranlarda priz hızlandırıcılar ile birlikte %2 oranında NA ve SA katkısının kullanıldığı 2. ve 3. karışım oranındaki numunelerin 2 günlük dayanım karşılaştırması

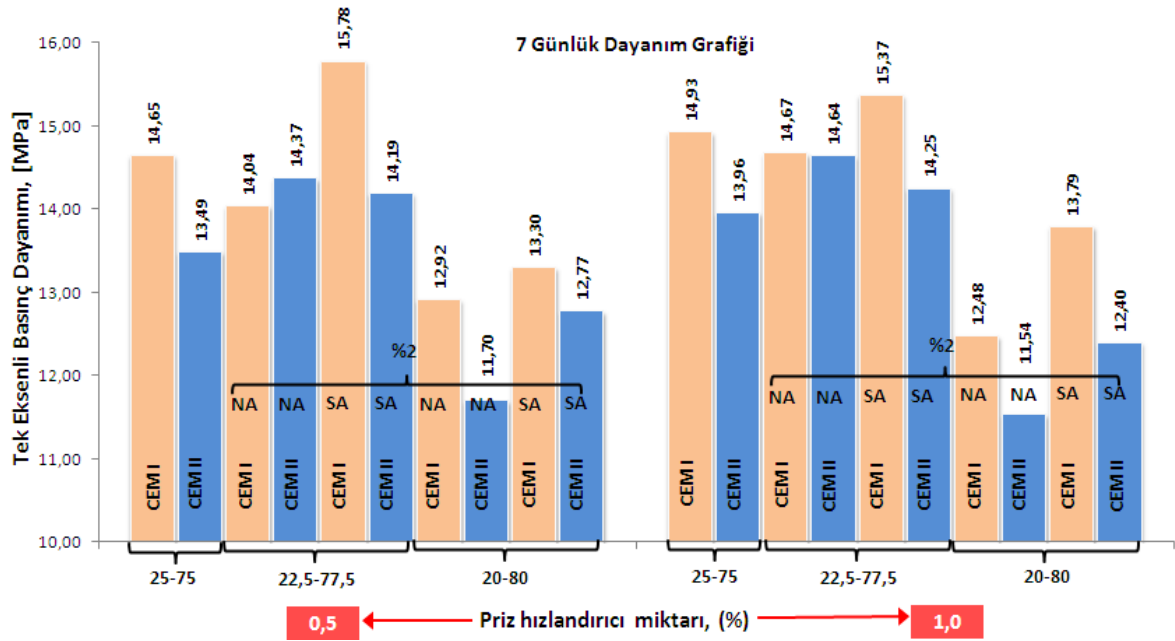
Şekil 3.40'da %1 oranında akışkanlaştırıcı ve %0,5, %1,0 oranında priz hızlandırıcı katkı kullanılan karışımların 7 günlük dayanım karşılaştırması görülmektedir. Şekilde

çimento miktarının düşmesi ile dayanım değerinin düştüğü görülmektedir. 7 günlük kür süresinde her iki priz hızlandırıcı oranında ve 2. karışımda SA kullanılan numuneler her iki çimento tipinde 1. karışım oranında akışkanlaştırıcı katkı kullanılmayan numunelerden daha yüksek dayanım değeri vermiştir. Priz hızlandırıcı oranının %0,5'ten %1'e yükselmesiyle 1. ve 2. karışım oranında hazırlanan numunelerin 7 günlük dayanım değerlerinin yüksek olduğu 3. karışım oranında hazırlanan numunelerin dayanım değerlerinin ise birbirine yakın olduğu görülmektedir. 2 günlük numunelerin aksine 7 günlük kür süresinde en yüksek dayanım değeri akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerden elde edilmiştir. %0,5 priz hızlandırıcı kullanılan numunelerde en yüksek dayanım değeri 2. karışım oranında %1 SA kullanılan numuneden 15,49 MPa değer ile elde edilmiştir. Bu oranda en düşük dayanım değeri ise CEM II çimentosu ile %1 NA kullanılan 3. karışım oranında hazırlanan numuneden 11,52 MPa ile elde edilmiştir. %1 priz hızlandırıcı kullanılan numunelerde ise en yüksek dayanım değeri 15,61 MPa değeri ile CEM I çimentosuyla 2. karışım oranında %1 SA kullanılan numunelerden elde edilmiştir. Yine bu oranda priz hızlandırıcı kullanılan karışımlarda en düşük dayanım değeri 3. karışım oranında CEM II çimentosuyla %1 NA katkısıyla oluşturulan numunelerden 11,16 MPa değeri ile elde edilmiştir.



Şekil 3.40. Her iki çimento tipinde hazırlanan ve priz hızlandırıcı katkının %0,5 ve %1 oranında kullanıldığı 1. karışım oranındaki numuneler ile aynı oranlarda priz hızlandırıcılar ile birlikte %1 oranında NA ve SA katkısının kullanıldığı 2. ve 3. karışım oranındaki numunelerin 7 günlük dayanım karşılaştırması

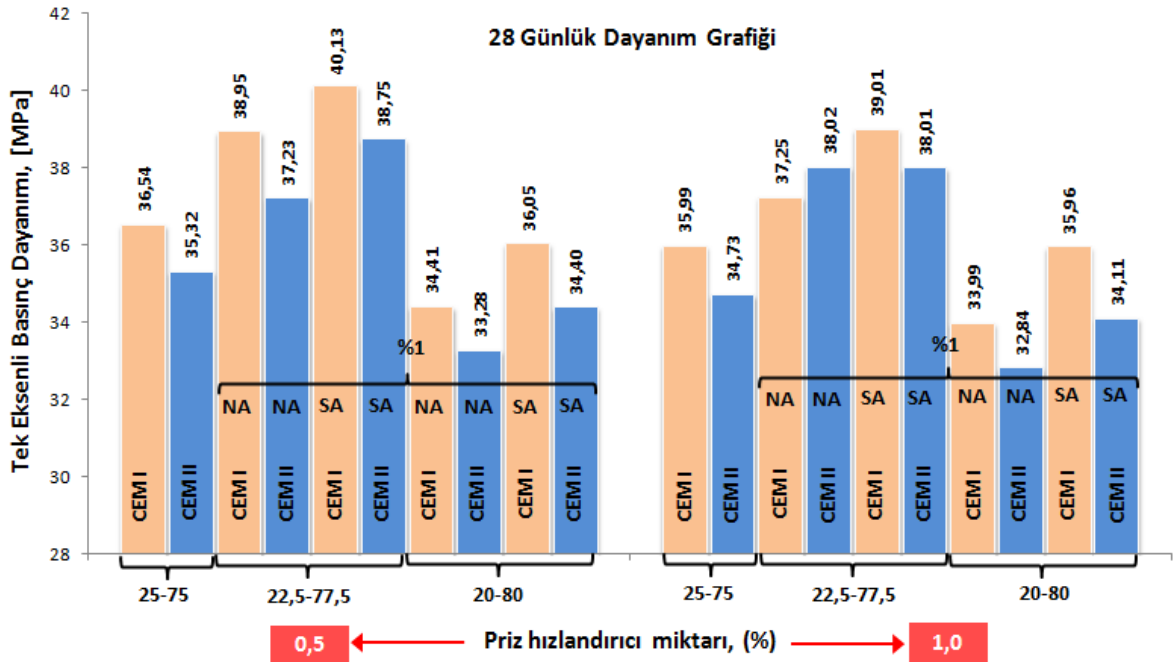
Şekil 3.41’de %2 oranında akışkanlaştırıcı ve %0,5, %1,0 oranında priz hızlandırıcı katkı kullanılan karışımların 7 günlük dayanım karşılaştırması görülmektedir. Akışkanlaştırıcı katkı oranının %2 olduğu bu karışımlarda dayanımdaki değişimler %1 oranında kullanılan karışımdakiler ile benzerlikler göstermektedir. %0,5 priz hızlandırıcı kullanılan numunelerde en yüksek dayanım değeri 15,78 MPa ile CEM I çimentosu ve %2 SA kullanılan 2. karışım oranındaki numuneden elde edilmiştir. En düşük dayanım değeri ise 3. karışım oranında CEM II çimentosuyla %2 NA kullanılan numuneden 11,70 MPa değeri ile elde edilmiştir. %1 priz hızlandırıcı kullanılan numunelerde ise en yüksek dayanım değeri 15,37 MPa ile CEM I çimentosu ve %2 SA kullanılan 2. karışım oranındaki numuneden elde edilmiştir. En düşük dayanım değeri ise 3. karışım oranında CEM II çimentosuyla %2 NA kullanılan numuneden 11,54 MPa değeri ile elde edilmiştir.



Şekil 3.41. Her iki çimento tipinde hazırlanan ve priz hızlandırıcı katkının %0,5 ve %1 oranında kullanıldığı 1. karışım oranındaki numuneler ile aynı oranlarda priz hızlandırıcılar ile birlikte %2 oranında NA ve SA katkısının kullanıldığı 2. ve 3. karışım oranındaki numunelerin 7 günlük dayanım karşılaştırması

Şekil 3.42’de %1 oranında akışkanlaştırıcı ve %0,5, %1,0 oranında priz hızlandırıcı katkı kullanılan karışımların uzun dönemli (28 gün) dayanım değerleri verilmektedir. Bu kür süresinde 2. karışım oranında her iki priz hızlandırıcı ve katkı tipi ile hazırlanan numunelerin dayanım değerleri 1. karışım oranı ile karşılaştırıldığında yüksek değerde çıkmıştır. 3. karışım oranında hazırlanan numuneler ise 1. karışım oranında hazırlanan

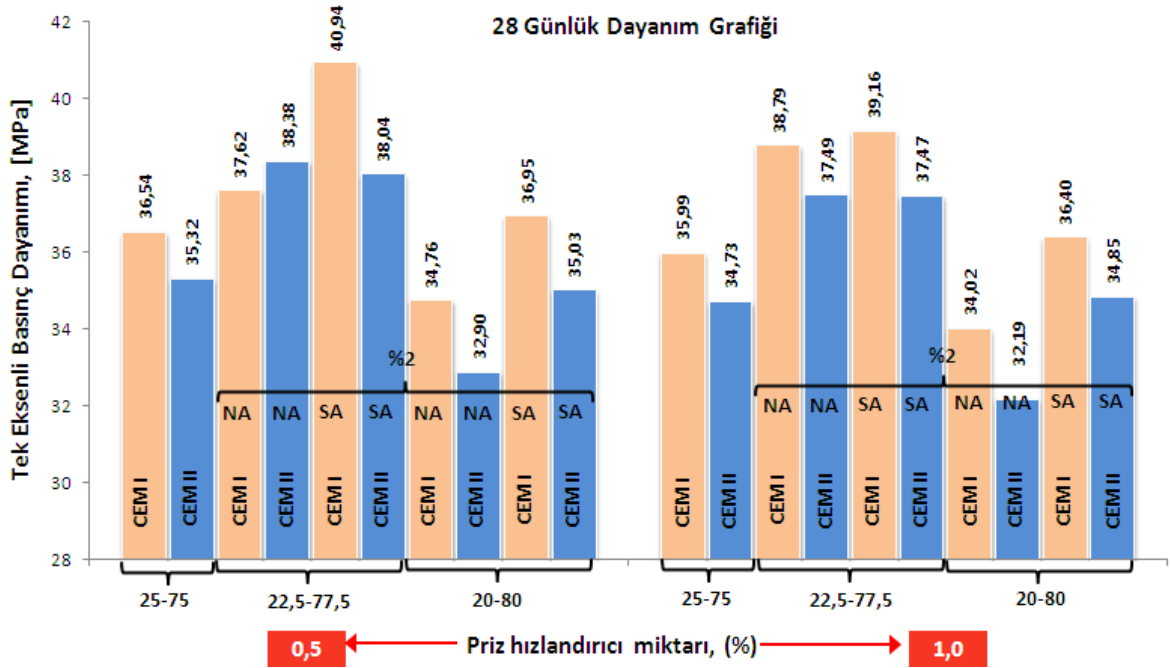
numunelerden daha düşük dayanım değerinde çıkmıştır. Ayrıca her iki priz hızlandırıcı oranlarında karışımların dayanım değerlerine baktığımızda priz hızlandırıcı katkı miktarının düşük olduğu numuneler daha yüksek değerde çıkmıştır. %0,5 priz hızlandırıcı kullanılan numunelerde en yüksek dayanım değeri 40,13 MPa ile CEM I çimentosu ve %1 SA katkılı numuneden elde edilmiştir. En düşük dayanım değeri ise 33,28 MPa ile CEM II ve %1 NA katkısı ile hazırlanan numuneden elde edilmiştir. %1 priz hızlandırıcı katkılı numunelerde ise en yüksek dayanım değeri CEM I çimentosu ve %1 SA katkılı numuneden 39,01 MPa değeri ile elde edilmiştir. Yine en düşük dayanım 32,84 MPa değeri ile CEM II ve %1 NA katkılı numuneden elde edilmiştir.



Şekil 3.42. Her iki çimento tipinde hazırlanan ve priz hızlandırıcı katkının %0,5 ve %1 oranında kullanıldığı 1. karışım oranındaki numuneler ile aynı oranlarda priz hızlandırıcılar ile birlikte %1 oranında NA ve SA katkısının kullanıldığı 2. ve 3. karışım oranındaki numunelerin 28 günlük dayanım karşılaştırması

Şekil 3.43'de %2 oranında akışkanlaştırıcı ve %0,5, %1,0 oranında priz hızlandırıcı katkı kullanılan karışımların uzun dönemli (28 gün) dayanım değerleri görülmektedir. Dayanım değerleri incelendiğinde %1 oranında kullanılan numuneler ile aynı etkiye sahip olduğu görülmektedir. 2. karışım oranında akışkanlaştırıcı katkı ile hazırlanan numuneler akışkanlaştırıcı katkı kullanılmayan 1. karışım oranında hazırlanan numunelerden daha yüksek dayanım değeri vermiştir. Ayrıca düşük priz hızlandırıcı

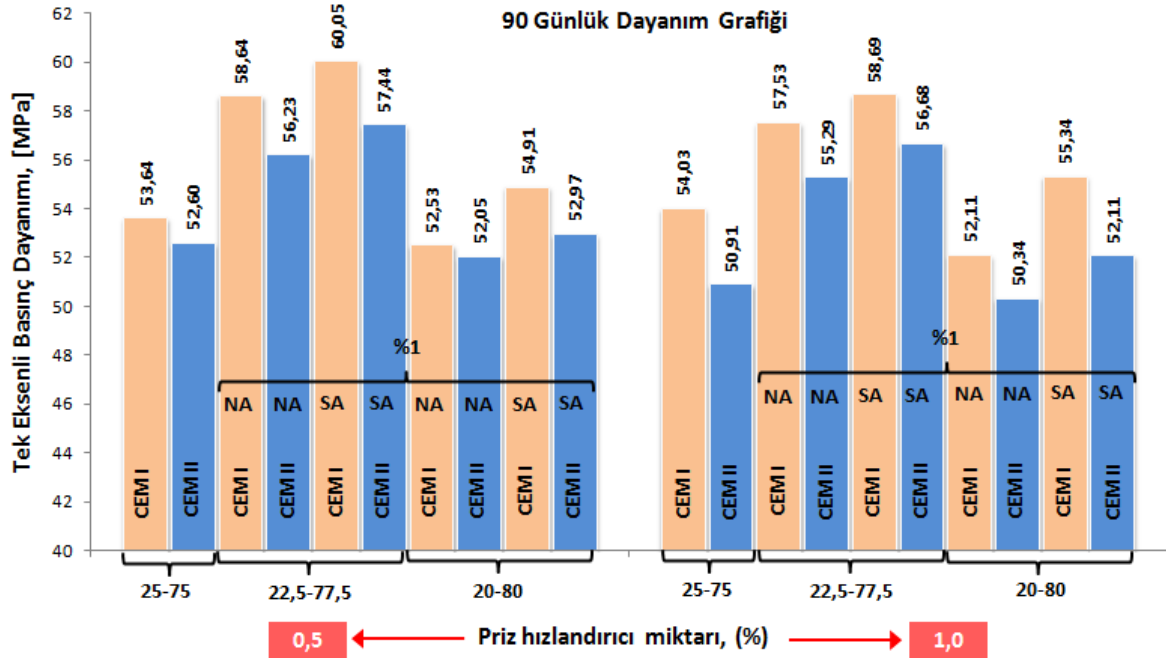
oranına sahip numunelerin dayanımlarının daha yüksek çıktığı belirlenmiştir. %0,5 priz hızlandırıcı kullanılan numunelerde en yüksek dayanım değeri %2 SA kullanılan CEM I çimentosuyla yapılan numuneden 40,94 MPa değeri ile elde edilmiştir. En düşük dayanım değeri ise %2 NA kullanılan CEM II çimentosuyla hazırlanan numuneden 32,90 MPa değeri ile elde edilmiştir. %1 priz hızlandırıcı kullanılan numunelerden ise en yüksek dayanım değeri yine %2 SA kullanılan CEM I çimentosuyla hazırlanan numuneden 39,16 MPa değeri ile elde edilmiştir. En düşük dayanım değeri ise %2 NA kullanılan CEM II çimentosuyla hazırlanan numuneden 32,19 MPa değeri ile elde edilmiştir.



Şekil 3.43. Her iki çimento tipinde hazırlanan ve priz hızlandırıcı katkının %0,5 ve %1 oranında kullanıldığı 1. karışım oranındaki numuneler ile aynı oranlarda priz hızlandırıcılar ile birlikte %2 oranında NA ve SA katkısının kullanıldığı 2. ve 3. karışım oranındaki numunelerin 28 günlük dayanım karşılaştırması

Şekil 3.44'te %1 oranında akışkanlaştırıcı ve %0,5, %1,0 oranında priz hızlandırıcı katkı kullanılan karışımların uzun dönemli (90 gün) dayanım değerleri görülmektedir. Bu kür süresinde 2. karışım oranında akışkanlaştırıcı kullanılan katkıların dayanım değerlerinin akışkanlaştırıcı kullanılmayan 1. karışım oranındaki numunelere göre daha yüksek çıktığı görülmektedir. 3. karışım oranında SA ile hazırlanan numunelerin dayanımlarının 1. karışım oranında ki numunelerden daha yüksek çıktığı da bu kür süresinde tespit edilmiştir. Yine priz hızlandırıcı miktarının düşük olduğu numunelerde

dayanım değerleri daha yüksek değerde çıkmıştır. 0,5 priz hızlandırıcı kullanılan numunelerde en yüksek dayanım değeri 60,05 MPa ile 2. karışım oranında %1 SA kullanılan ve CEM I çimentosuyla hazırlanan numuneden elde edilmiştir. Bu oranda priz hızlandırıcı kullanılan numunelerde en düşük dayanım değeri 3. karışım oranında %1 NA kullanılan ve CEM II çimentosuyla oluşturulan numuneden 52,05 MPa değeri ile elde edilmiştir. Priz hızlandırıcının %1 olduğu karışımlarda ise en yüksek dayanım değeri 2. karışım oranında %1 SA kullanılan ve CEM I çimentosuyla hazırlanan numuneden 58,69 MPa değeri ile elde edilmiştir. En düşük dayanım değeri yine 3. karışım oranında %1 NA kullanılan ve CEM II çimentosuyla hazırlanan numuneden 50,34 MPa değeri ile elde edilmiştir.



Şekil 3.44. Her iki çimento tipinde hazırlanan ve priz hızlandırıcı katkının %0,5 ve %1 oranında kullanıldığı 1. karışım oranındaki numuneler ile aynı oranlarda priz hızlandırıcılar ile birlikte %1 oranında NA ve SA katkısının kullanıldığı 2. ve 3. karışım oranındaki numunelerin 90 günlük dayanım karşılaştırması

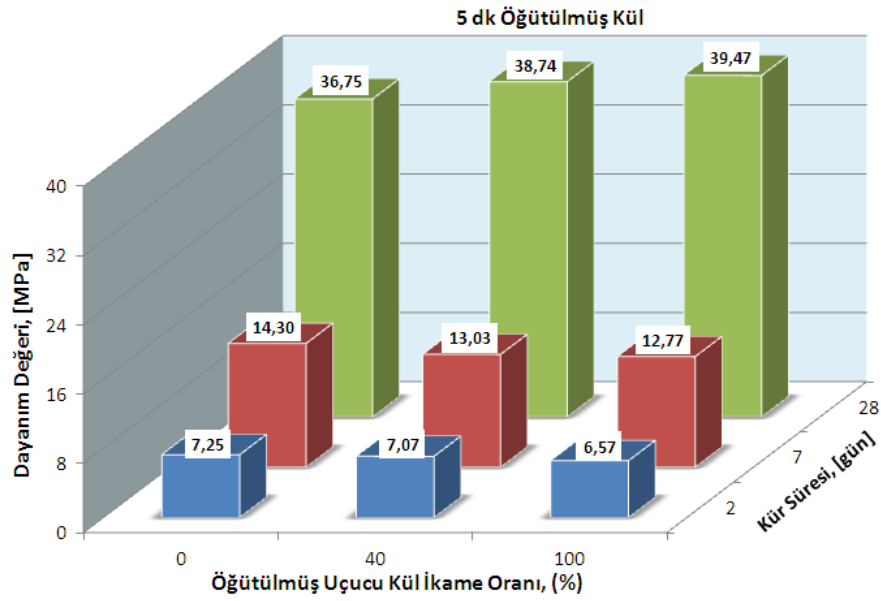
Şekil 3.45'te %2 oranında akışkanlaştırıcı ve %0,5, %1,0 oranında priz hızlandırıcı katkı kullanılan karışımların uzun dönemli (90 gün) dayanım değerleri görülmektedir. Bu karışım oranında ve kür süresinde akışkanlaştırıcı kullanılan katkıların dayanım değerlerinin akışkanlaştırıcı kullanılmayanlara göre daha yüksek çıktığı görülmektedir. 3. karışım oranında SA katkısı ile hazırlanan numunelerin dayanımlarının 1. karışım oranında



olan arttırıcı etkinliğini düşürmüştür. Akışkanlaştırıcı katkıları ise kısa kür (2-7 gün) sürelerinde priz hızlandırıcı katkıların etkinliğini azaltma eğiliminde oldukları görülmüştür. 2. karışım oranında çimento miktarının düşmesine rağmen kullanılan akışkanlaştırıcı katkıları sayesinde dayanımları akışkanlaştırıcı kullanılmayan 1. karışım oranındaki numunelere eşit veya yüksek çıkmıştır.

### 3.3.1.5. Malzeme İnceliğinin Dayanıma Etkisi

5 dk ve 15 dk öğütülmüş uçucu kül malzemelerinin dolgu karışımlarının içerisinde normal uçucu kül yerine ilave edildiğinde kısa ve uzun dönemli dayanıma etkileri Şekil 3.46 ve Şekil 3.47’de sırasıyla görülmektedir.



Şekil 3.46. Öğütülmüş (5 dk) malzemenin dayanıma etkisi

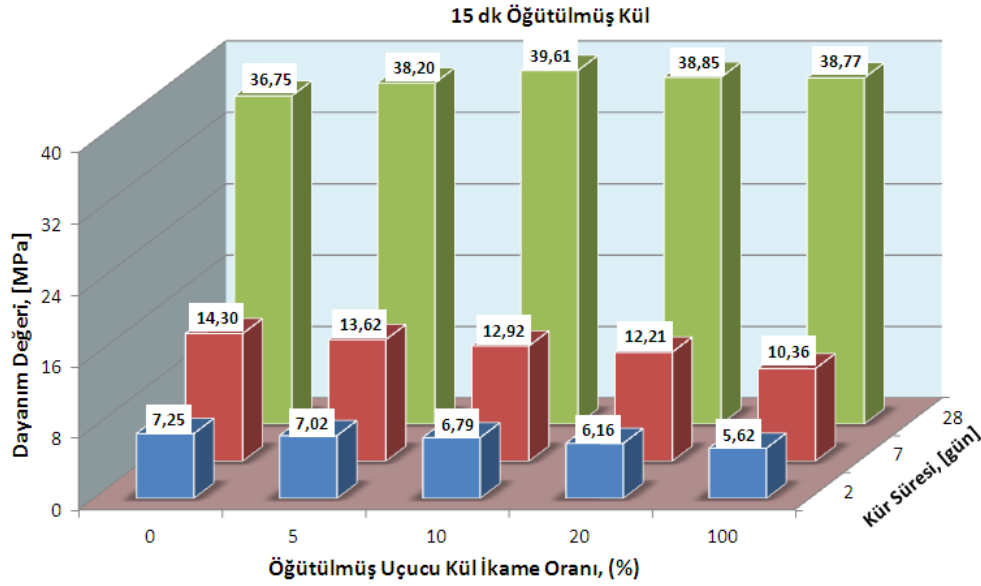
Öğütülmüş malzemelerde yüzey alanının artmasıyla aynı kıvamda oluşturulan karışım daha fazla suya ihtiyaç duymuştur. Öğütülmüş malzeme ilavelerinde fazla suyla oluşturulan numunelerin 2 ve 7 günlük dayanıma etkileri S/Ç oranının da artmasıyla düşmüştür (Şekil 3.46). 2 ve 7 günlük kür sürelerinde en yüksek dayanım değeri normal kül ile hazırlanan karışımlara ait olup sırasıyla 7,25 MPa ve 14,30 MPa olarak ölçülmüştür. 5 dk öğütülmüş külün %40 ilave edildiği karışımın 2 günlük dayanım değeri 7,07 MPa iken 7 günlük dayanım değeri 13,03 MPa değerindedir. %100 ilave edildiği karışımın ise 2

günlük dayanım değeri 6,57 MPa iken 7 günlük dayanım değeri ise 12,77 MPa olarak ölçülmüştür.

Malzemelerin su ihtiyaçları öğütülmüş malzeme kullanılmayan karışımda 2175 gr, 5 dk öğütülmüş malzemedan %40 ilave oranında kullanılan numunede 2245 gr ve %100 ilave oranında kullanılan numunede 2280 gr olmuştur. Aynı şekilde S/Ç oranları ise sırasıyla 0,99, 1,04 ve 1,07 olarak gerçekleşmiştir. Karışımlarda artan su miktarı dayanıma kısa kür sürelerinde olumsuz etkilemiştir. Ancak öğütülmüş uçucu kül kullanımının uzun dönemli dayanımda etkileri olumlu olmuştur. Öğütmeyle külden sağlanan tane inceliği karışım içerisinde su ve hidrasyon sonucu oluşan boşlukların doldurmasına etki etmiştir. Bu sayede daha kompakt bir numune elde edilmiştir. Uzun dönemli (28 günlük) kür süresi irdelendiğinde normal kül ile yapılan karışımın dayanım değeri 36,75 MPa iken 5 dk öğütülmüş külün %40 ilave edildiği karışımın 38,74 MPa ve %100 ilave edildiği karışım 39,47 MPa'dır. İnceltmiş malzeme ilave oranının artmasıyla dayanım değerinin 28 günlük kür süresinde arttığı tespit edilmiştir.

Şekil 3.47'de 15 dk öğütülmüş külün dolgu içerisinde normal kül yerine ikame olarak kullanıldığında dayanıma olan etkisi incelenmiştir. Öğütme dakikası arttığında malzemenin inceliği ve yüzey alanı artmaktadır. Öğütülmüş kül ilave edilen karışımlarda aynı kıvamda malzeme oluşturulduğunda daha fazla miktarda suya ihtiyaç duyulmaktadır. Fazla miktarda kullanılan su kısa süreli (2 günlük) dayanım değerlerini olumsuz etkilemiştir. Normal kül ile oluşturulan numunede kullanılan su miktarı 2175 gr iken 15 dk öğütülmüş ve %5 ilaveli numunede 2185 gr, %10 ilaveli numunede 2205 gr, %20 ilaveli numunede 2225 gr ve %100 ilaveli numunede ise 2370 gr'dır. Sırasıyla S/Ç oranları ise normal kül ile oluşturulan numunenin 0,99, öğütülmüş kül ilaveli numunelerin ise 1,00, 1,01, 1,03 ve 1,14'tir. Şekil 3.47'de 2 günlük kür süresi incelendiğinde en yüksek dayanım değeri normal kül ile oluşturulan numuneden 7,25 MPa ile elde edilmiştir. Öğütülmüş kül ilave oranlarından ise en yüksek dayanım 7,02 ile %5 ilaveli numuneden elde edilmiştir. Öğütülmüş uçucu kül ilave oranı arttıkça dayanım değeri düşmektedir. En düşük dayanım %100 ilaveli numuneden 5,62 MPa değeri ile elde edilmiştir. Yine 7 günlük kür süresinde en yüksek dayanım normal kül ile yapılan numuneden 14,30 MPa dayanım değeri ile elde edilmiştir. Öğütülmüş malzeme ilave oranlarında en yüksek dayanım ise %5 ilaveli numuneden 13,62 MPa değeri ile elde edilmiştir. Öğütülmüş malzeme ilave oranı arttıkça dayanım değeri 7 günlük kür süresinde de düşmektedir. En düşük dayanım değeri %100 ilave oranında 10,36 MPa değeri ile elde edilmiştir. Numunelerin uzun dönemli dayanım

değerleri incelendiğinde durum kısa süreli numunelerden farklılık arz etmektedir. Bu kür süresinde en yüksek dayanım değeri öğütülmüş malzemeden %10 ilave oranında kullanılan numuneden 39,61 MPa değeri ile elde edilmiştir. Diğer ilave oranlarında değerler birbirine yakın çıkmıştır ve bütün ilave oranlarında dayanım değeri normal kül ile yapılan numuneden yüksek çıkmıştır.

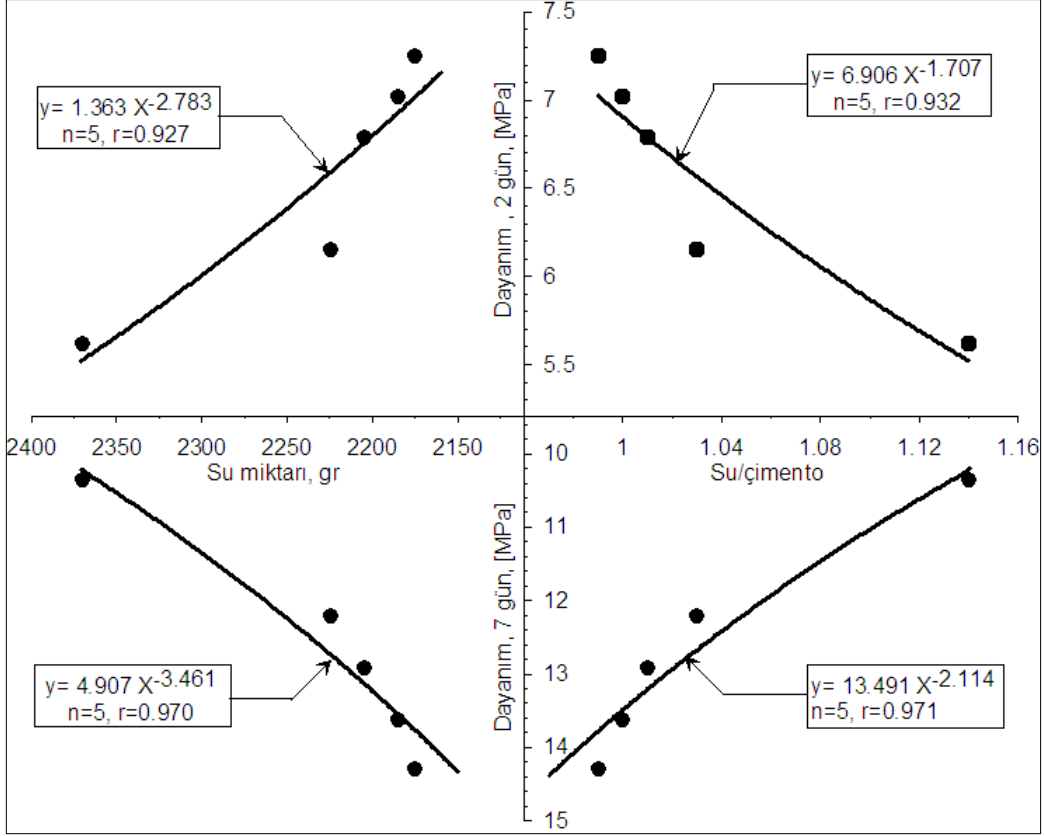


Şekil 3.47. Öğütülmüş (15 dk) malzemenin dayanıma etkisi

Uçucu kül malzemesinin çimento ve beton karışımı gibi malzemelerde ikame olarak kullanıldıklarında inceliğinin artmasıyla uzun dönemli kür sürelerinde dayanımı artırıcı etki ettiği yapılan çalışmalarda ortaya konmuştur (Kiattikomol vd., 2001; Chindaprasirt vd., 2005, Yazıcı ve Arel, 2012). İnceliğin artmasıyla beraber karışım içerisinde oluşan mikro boşluklar bu malzemeler tarafından doldurulmaktadır. Bunun sonucunda daha kompakt bir numune elde edilmesi sağlanmaktadır.

Uçucu küllerin öğütülmesi sonrasında S/Ç oranı, kullanılan su miktarları ve 2-7 gün dayanım değerleri arasında korelasyonlar kurulmuştur. 15 dk öğütülmüş külün %0-5-10-20-100 ilave oranları sonrasında S/Ç oranı-su miktarı ve 2-7 gün dayanım değerleri arasındaki ilişki Şekil 3.48'de verilmiştir. Şekilde kullanılan su miktarı ve aynı zamanda S/Ç oranı artarken dayanım değerinin düştüğü görülmektedir. Su miktarı ve dayanım değerleri arasında, S/Ç oranı ve dayanım derğerleri arasında 5 numune verisine dayanarak

yüksek korelasyon katsayıları elde edilmiştir ( $r > 90$ ). Bunun sonucunda değişkenler arasında çok kuvvetli bir ilişkinin var olduğu belirlenmiştir.



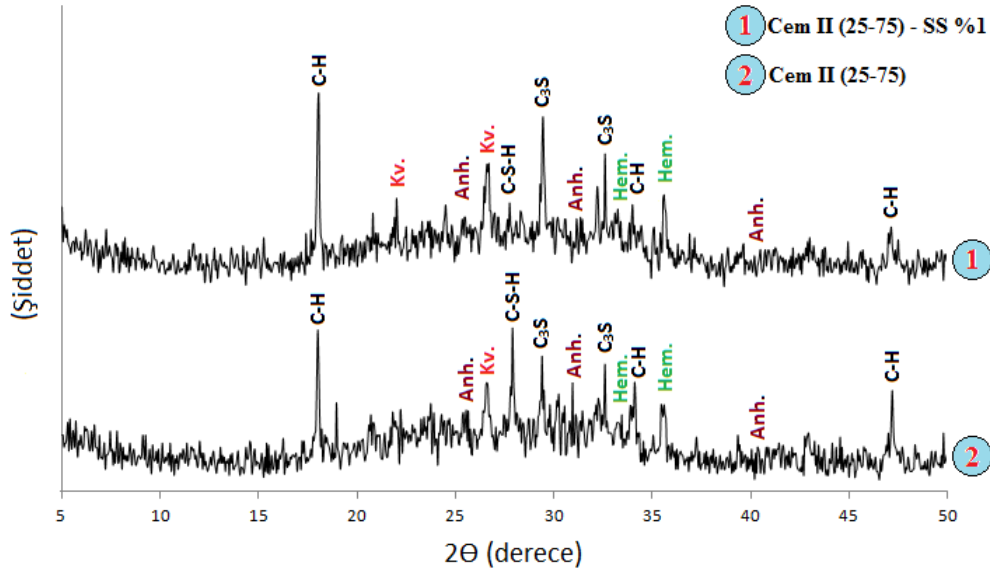
Şekil 3.48. Öğütülmüş malzeme kullanılan numunelerde S/Ç oranı ve su miktarına bağlı olarak 2 ve 7 günlük dayanım değişimi

### 3.3.2. Mikro Yapı İncelemeleri

Oluşturulan 90 ve 2 günlük karışım numunelerinden küçük parçacıklar ve toz malzeme elde etmek suretiyle XRD, SEM ve Boşluk tayini analizleri yapılmıştır. XRD analizi, 1. karışım oranlarında %1 oranında priz hızlandırıcı kullanılan ve katkı kullanılmayan 2 ve 90 günlük numunelerden elde edilen toz malzemelere yapılmıştır. SEM analizi için 1. karışım oranlarında %1 oranında priz hızlandırıcı kullanılan ve katkı kullanılmayan 90 günlük numunelere ve 2. karışım oranlarında ise %1 SA kullanılan ve %1 SA ve %1 priz hızlandırıcı kullanılan numunelerden elde edilen parçacıklara gerçekleştirilmiştir. Boşluk tayini de yine SEM analizi için örnek parçacık alınan numunelere yapılmıştır.

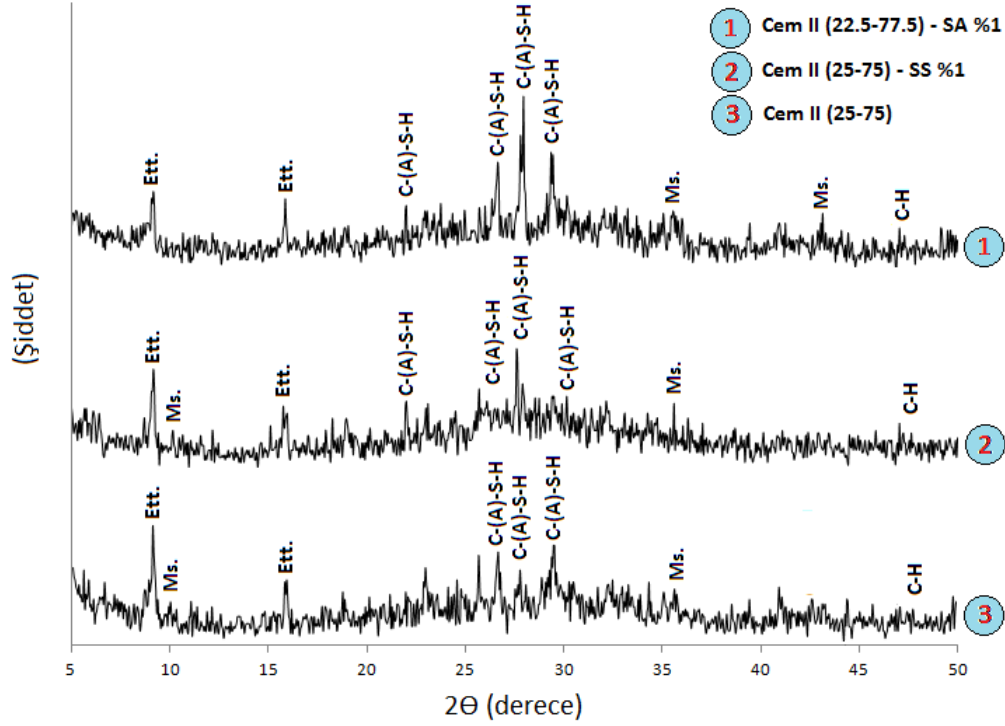
### 3.3.2.1. XRD İncelemeleri

Priz hızlandırıcı kullanılan ve kullanılmayan numunelerin 2 gün kür periyodu sonunda XRD analizleri Şekil 3.49'daki gibi gerçekleşmiştir. 1. karışım oranlarında CEM II çimentosuyla oluşturulan ve priz hızlandırıcı kullanılan ve kullanılmayan 2 günlük numunelere yapılan XRD analizi sonucunda benzer minerallere rastlanmıştır. En yüksek pik değerleri portlandit ( $CH = Ca(OH)_2$ ) ve tri kalsiyum silikat ( $C_3S = 3CaO \cdot SiO_2$ ) minerallerinde rastlanmıştır. Yine numuneler içerisinde henüz çözünmemiş anhidrit ( $Ca \cdot SO_4$ ) ve bunun yanında kuvars ( $SiO_2$ ) ve hematit ( $Fe_2O_3$ ) minerallerine de rastlanmıştır. Çimentonun hidratasyonu sürecinde oluşan ve karışım malzemesinin karakteristiğini belirleyen portlandit (CH) ve tobermorit (C-S-H) jelleri priz başlangıç evresinden sonra şekillenmeye başlamaktadır (URL 9; URL 10). Çalışmadaki 2 günlük numunelerde ise tobermorit mineral pik değerine fazla miktarda rastlanmıştır. Bununla birlikte priz hızlandırıcı kullanılan numunelerdeki portlandit minerallerinin şiddet aralığı priz hızlandırıcı kullanılmayan numunelere göre daha fazla olduğu görülmüştür. Yine kuvars ( $SiO_2$ ) pik değerleri de priz hızlandırıcı kullanılan numunelerde fazla değerde çıkmıştır. Bu durumun kullanılan priz hızlandırıcının kimyasal yapısında bulunan sıvı silika jellerinden kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 3.49. X-ışınları kırınımölçeri ile priz hızlandırıcı kullanılan ve kullanılmayan 2 günlük numunelerin mineralojik yapısının incelenmesi [Anh.= anhidrit ( $CaSO_4$ );  $C_3S$  = tri kalsiyum silika ( $3CaO \cdot SiO_2$ ); CH = portlandit ( $Ca(OH)_2$ ); Hem. = hematit ( $Fe_2O_3$ ); Kv. = kuvars ( $SiO_2$ )].

Priz hızlandırıcı kullanılan ve kullanılmayan karışımlar ile akışkanlaştırıcı kullanılan karışımlardan elde edilen 90 günlük numunelere yapılan XRD analizleri Şekil 3.50'de görülmektedir. Numunelerde görülen mineraller; kalsiyum alumina silika (C-(A)-S-H), etrenjit, portlandit (C-H) ve monosülfat (Ms.) şeklindedir.



Şekil 3.50. X-ışınları kırınımölçeri ile priz hızlandırıcı kullanılan, kullanılmayan ve akışkanlaştırıcı kullanılan 90 günlük numunelerin mineralojik yapısının incelenmesi [C-(A)-S-H = kalsiyum alumina silika hidrat, Ett.= etrenjit ( $\text{Ca}_6\cdot\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3\cdot(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ); C-H = portlandit ( $\text{Ca}\cdot(\text{OH})_2$ ); Ms. = monosülfat ( $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6(\text{SO}_4)\cdot 14\text{H}_2\text{O}$ )]

Priz hızlandırıcı kullanılan ve kullanılmayan 90 günlük numunelerin XRD değerlerini 2 günlük numuneler ile karşılaştırmasında bazı farklı minerallerin varlığı görülmüştür. 90 günlük numunelerde etrenjit ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ) mineralinin varlığına rastlanmıştır. Etrenjit minerali genellikle kalsiyum sülfatın çimento hamuru içerisinde çözünmesi ve tri kalsiyum alumina ( $\text{C}_3\text{A} = 3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ) ile tepkimeye girmesiyle birlikte hidrasyon sürecinin ilk evrelerinde ve/veya ileriki evrelerinde ortaya çıkmaktadır (Eşitlik 8).



(8)

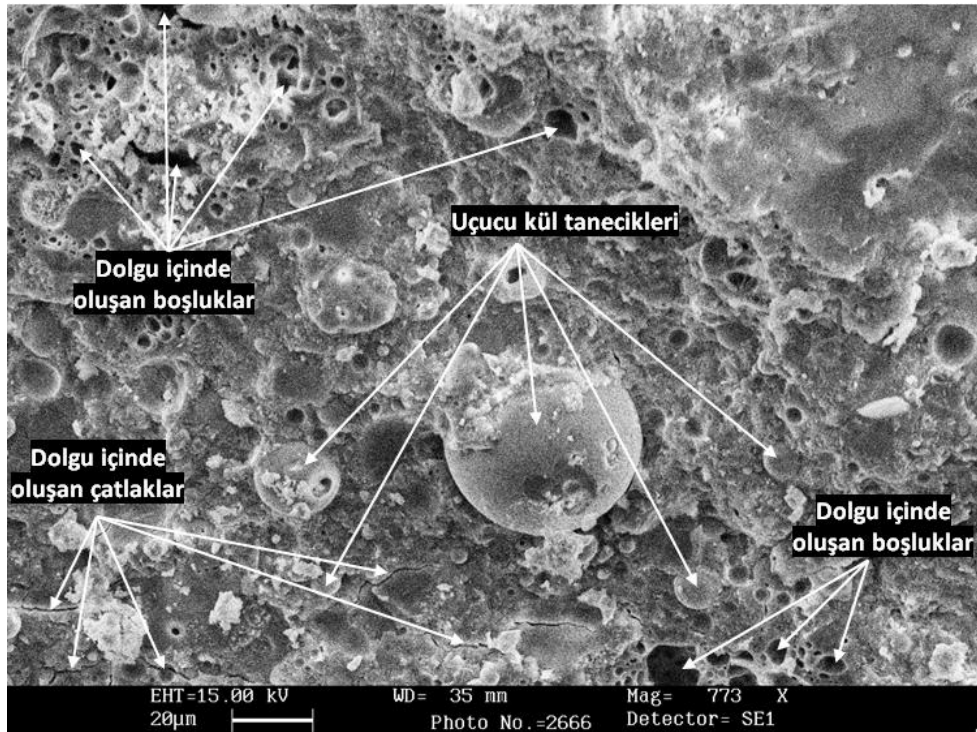
Etrenjit oluşumu sülfat etkisiyle oluşan kimyasal bir reaksiyondur. Etrenjit mineralinin oluşum zamanı, boyutu ve bulunduğu ortam özelliklerine bağlı olarak bünyesinde bir genişleme söz konusu olmaktadır. Bu genişleme malzemenin içyapısına zarar vermektedir. Oluşan bu genişleme hidrasyon sürecinin ilk evresinde yani taze halde iken oluştuğunda içyapıya zarar vermediği, ancak ilerleyen hidrasyon sürecinde oluştuğunda bünyesindeki genişleme %126 seviyesinde gerçekleştiği ve içyapıda bozunmalara sebebiyet verdiği bilinmektedir (Tosun vd., 2009). Bu durumda malzemenin dayanımı olumsuz etkilenmektedir. Süperakışkanlaştırıcı kullanılan numunelerde ise etrenjit piklerinin kullanılmayan numunelere göre daha düşük yoğunlukta olduğu görülmektedir. Bunun nedeni akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların çimentolu sistemlerde taneciklerin yüzeyine adsorbe olmasıyla bileşenlerin çözünme hızını düşürmesi ve hidrasyon süresince oluşan farklı hidrate bileşiklerin yapısını değiştirmesidir. Akışkanlaştırıcıların adsorbsiyonu aynı zamanda etrenjit çözünme sıcaklığını da düşürmektedir (Prince vd., 2003). Bu sebeple akışkanlaştırıcı katkı kullanılan numunelerde etrenjit oluşumunun yoğun olmayışı dayanım yönünden de avantaj sağlamaktadır.

Yapılan XRD analiz sonuçları literatürle paralellik arz etmektedir. Weerdt vd. (2011) çalışmalarında uçucu külü çimento ile birlikte karışımlarında denemiş ve uçucu külün mineralojik yapıya etkilerini incelemişlerdir. Yaptığı çalışmasında karışımların ana mineralinin Al modifiyeli C-S-H jeli olduğunu, bunun yanında monosülfat, hemi karbonat, mono karbonat ve etrenjit minerallerinin varlığına da rastladıklarını belirtmişlerdir.

### **3.3.2.2. SEM Analizi**

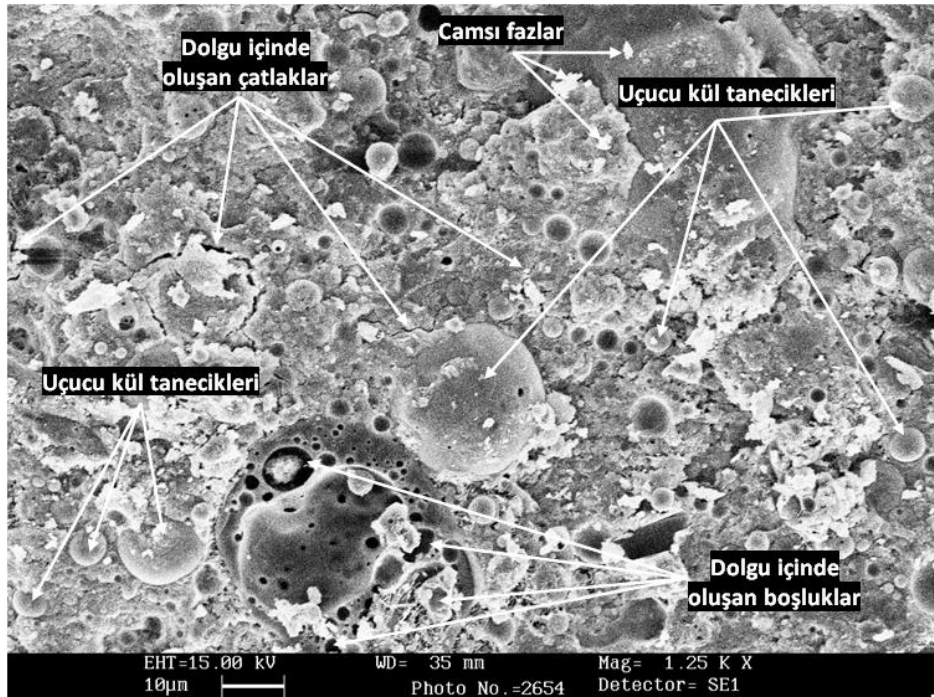
Yapılan karışımların bazılarında elde edilen parçalara SEM analizi yapılmıştır. Analizler katkı kullanılmayan ve katkı (priz hızlandırıcı ve akışkanlaştırıcı) kullanılan numuneler şeklinde ayırt edilmiştir. Ayrıca SEM cihazı üzerinde numune yüzeyinin mikroyapısını gösterecek biçimde 750-1250 kat olacak biçimde bir büyütme yapılmış ve malzemelerin içerisinde oluşabilecek boşluk, çatlak ve tane duruşlarını belirleyecek görüntüler elde edilmiştir. Diğer yandan karışım sonrası oluşan mineralojik yapının daha detaylı ortaya çıkmasını sağlamak için 3500-7500 kat olacak biçimde büyütme yapılarak jel oluşumlarının cihaza bağlı EDX yardımıyla mikro analizleri gerçekleştirilerek incelenmiştir. İncelenen bütün numuneler 90 günlük kür süresi sonunda oluşan numunelerdir.

Numune yüzeylerinin morfolojik yapısı (mikroyapı); Şekil 3.51’de herhangi bir katkı içermeyen numunenin SEM görüntüsü görülmektedir. Parçacık görüntüsü yaklaşık 775 kat büyütülerek numune yüzeyi incelenmiştir. İncelenen görüntüde hidratasyon sonucu oluşan jeller arasında uçucu kül tanecikleri, çeşitli boyutlarda boşluklar ve çatlaklar görülmektedir. Yapılan SEM incelemeleri sonucunda genel itibarıyla karışım numunelerinde kısmen reaksiyona girmiş uçucu kül tanecikleri görülmüştür. Şekilde görülen uçucu kül tanelerinin boyutları genel olarak birbirinden farklıdır. Bunun sebebi uçucu külün her tane boyundan uygun miktarlarda içermesidir. Bu durum özellikle çok küçük boyutlu uçucu kül taneciklerinin iri boyutlu taneler arasına girerek burada oluşabilecek boşlukları doldurmasına neden olmaktadır. Böylelikle daha kompakt bir dolgu oluşmaktadır. Yine numune içerisinde farklı boyutlarda boşluk oluşumları görülmüştür. Bu tip boşlukların karışımdaki fazla su miktarından meydana geldiği düşünülmektedir. Karışımlar içerisinde çok küçük aralıkta mikro boyutta çatlaklara rastlanmıştır. Bu tip çatlaklar karışım içerisindeki fazla su miktarı ve ikincil jellerin oluşumundan kaynaklı olduğu düşünülmektedir.



Şekil 3.51. CEM I çimentosuyla oluşturulan katkısız numunenin SEM görüntüsü

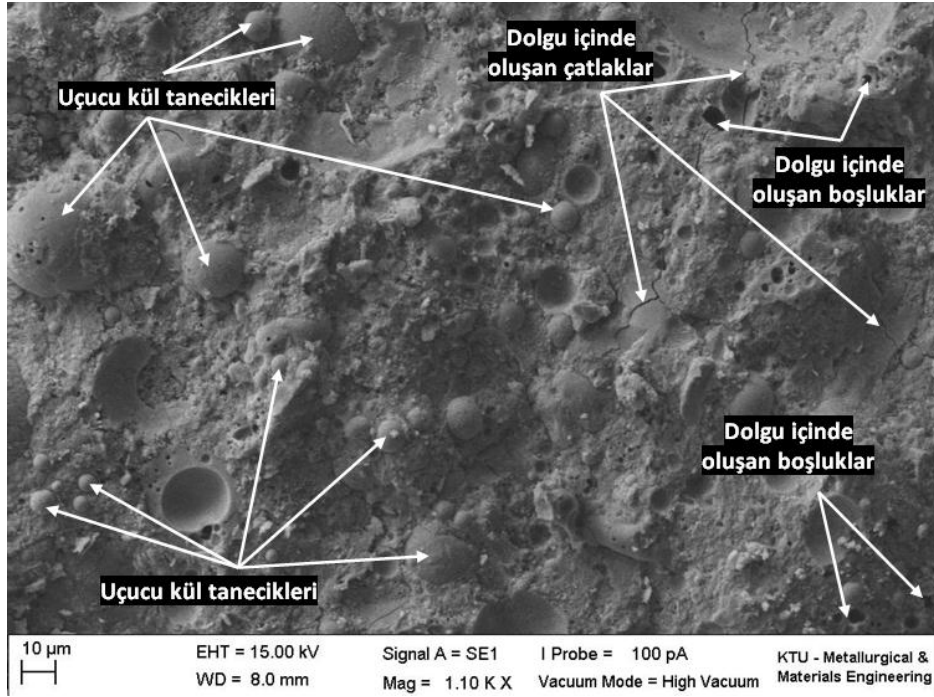
Şekil 3.52’de priz hızlandırıcı katkı içeren numunenin SEM görüntüsü görülmektedir. Priz hızlandırıcı kullanılan numuneden elde edilen parçaçık boyutu 1250 kat büyütülerek yüzey görüntüsü elde edilmiştir. Katkısız numunede olduğu gibi yine uçucu kül tanecikleri, çatlak ve boşluklar bu numunede de mevcuttur. Ancak yüzeyde hidrasyon ürünleri dışında küçük tanecikler şeklinde camsı faz yapıları görülmüştür. Bu yapılar priz hızlandırıcının bünyesinde bulunan silikalardan meydana geldiği düşünülmektedir. Uçucu küllerin numune içerisinde dağılımlarında herhangi bir fark görülmemiştir. Çok ince taneler büyük tanelerin arasında kalan boşlukları doldurma eğilimindedirler.



Şekil 3.52. CEM I çimentosuyla oluşturulan priz hızlandırıcılı numunenin SEM görüntüsü

Şekil 3.53’te akışkanlaştırıcı kullanılan numunenin SEM görüntüsü görülmektedir. Yaklaşık 1100 kat büyütülmüş görüntüde akışkanlaştırıcı kullanılan numunenin yüzey morfolojik yapısı incelenmiştir. Yine diğer numunelerde olduğu gibi akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerde de çatlak, boşluk oluşumu ve uçucu kül taneciklerinin görünümü mevcuttur. Ancak diğer numunelerden farklı olarak akışkanlaştırıcı kullanılan numunede boşluk oluşumlarının daha az miktarda görüldüğü şekillerden tespit edilmiştir. Katkı kullanılmayan ve priz hızlandırıcı kullanılan numunelerde boşluk oluşumlarının boyutları

da akışkanlaştırıcı kullanılan numuneye göre daha büyük seviyededir. Ayrıca akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerde meydana gelen çatlak oluşumlarının da daha az miktarda olduğu görülmüştür. Akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerin diğer numunelere göre daha kompakt bir yapı sergilediği morfolojik yapı incelemeleri sonrasında söylenebilir.

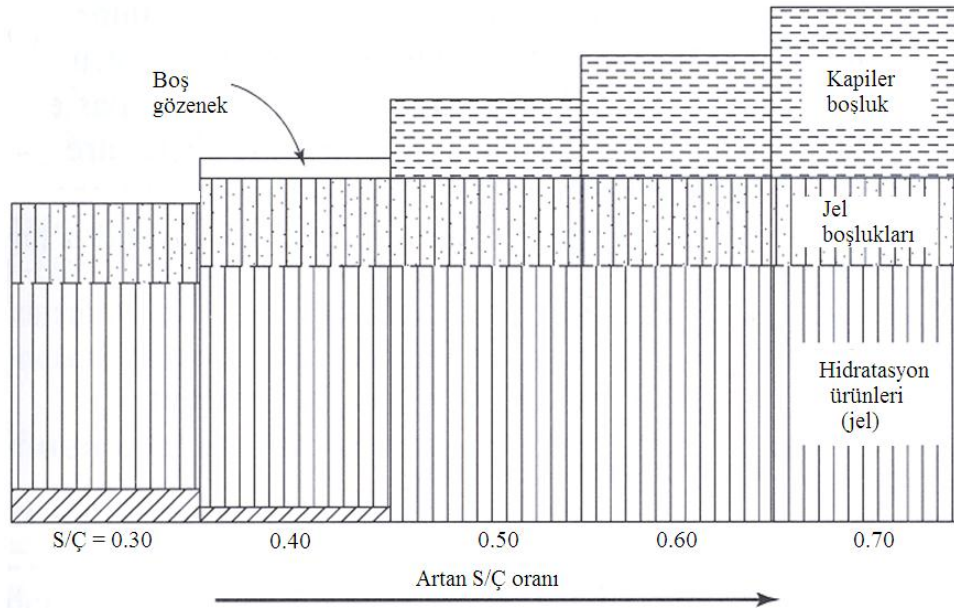


Şekil 3.53. CEM I çimentosuyla oluşturulan akışkanlaştırıcı (SA) kullanılan numunenin SEM görüntüsü

Yapılan yüzey mikro yapı incelemelerinde bütün numuneler içerisinde çeşitli boyutta boşluklara rastlanmıştır. Beton ve çimentolu malzemeler içerisinde meydana gelen ve kapiler olarak adlandırılan bu tip boşluklar çimentonun tam hidrasyonu sonrasında meydana gelmektedir. Bu boşluklar genellikle su tarafından doldurulur ancak beton içerisindeki hava ve rötre sayesinde de dolmaktadırlar. Eğer beton içerisinde S/Ç oranı artarsa suyun buharlaşması daha kolay olacağından boşluk miktarı ve boyutu da artmaktadır (Aitcin ve Mindess, 2011).

Şekil 3.54'de beton içerisinde artan S/Ç oranına bağlı olarak boşlukların gelişimi gösterilmiştir. S/Ç oranının artmasıyla boşluk miktarında bir artma görülmektedir. SEM analizi yapılan karışımlarda su miktarları yaklaşık olarak birinci karışım oranında katkı kullanılmayan numune içerisinde 2175 gr, yine birinci karışım oranında ve priz hızlandırıcı

içeren numune içerisinde 2150 gr ve ikinci karışım oranında akışkanlaştırıcı içeren numunede ise 2019 gr civarındadır. Ayrıca bu numunelerin S/Ç oranları sırasıyla 0,99, 0,99 ve 1,02 seviyesindedir. Buradan da anlaşılacağı üzere dolgu karışımlarının S/Ç oranı normal betona göre (0,3-0,7) kıyaslandığında oldukça yüksek seviyelerdedir. Bu durum oluşabilecek boşluk miktarında artışa sebebiyet vermiştir. Ancak numuneler arasında akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılan numunede boşluk miktarı ve boyutu diğer iki numuneye göre daha az seviyede gerçekleşmiştir. Bu durumu akışkanlaştırıcıların karışım içerisinde çimento ve kül taneleri arasında topaklanma sonucu hapsolmuş suyu ortaya çıkartması ve karışım içerisinde kullanılan su miktarında azalma sağlamasıyla açıklayabiliriz. Bunun sonucu olarak da akışkanlaştırıcı kimyasal katkıların dolgu dayanımlarına olumlu etkidiği söylenebilir.



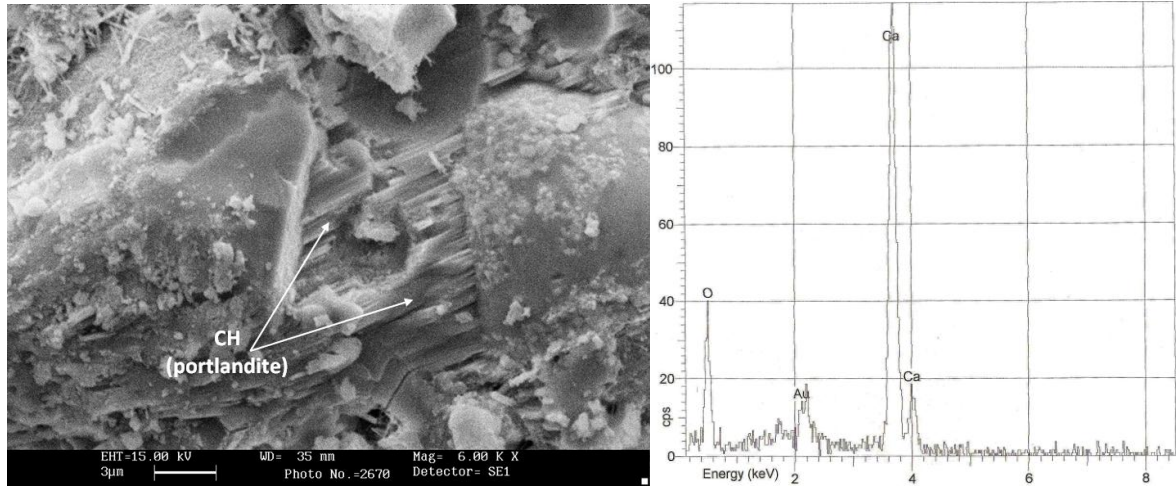
Şekil 3.54. Beton içerisinde artan S/Ç oranına bağlı olarak boşluk gelişimi (Mindess vd., 2003).

Karışımlar içerisinde çok küçük aralıkta mikro boyutta çatlaklara rastlanmıştır. Bu tip çatlaklar karışım içerisindeki fazla su miktarı ve ikincil jellerin oluşumundan kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca bu tip çatlakların beton içerisinde mekanik yükleme sonucu oluştuğu da bilinmektedir. Çatlakların içerisine fazla miktarda su girişi olması malzemenin geçirgenliğini arttırmakta ve malzeme bozunmasının daha hızlı gerçekleşmesine neden olmaktadır. Ayrıca malzemenin dayanımını da olumsuz etkilediği

bilinmektedir (Krauss vd., 1995; Yang vd., 2005). İncelenen görüntülerde akışkanlaştırıcı kullanılan numunede çatlak sayısı ve boyutu diğer numunelere göre daha az görünmektedir. Bu durum akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerin dayanım ve dürabilitesine olumlu etkilediği düşünülmektedir.

Numunelerin mineralojik yapı görüntü analizi (mikro analizli); Dolgu karışımlardan elde edilen numunelere SEM görüntüsü ile birlikte EDX analizi de yapılarak bünyede oluşan hidrasyon ürünleri ortaya konmuştur. Katkı kullanılmayan numune, priz hızlandırıcı kullanılan numune, akışkanlaştırıcı kullanılan numune ve akışkanlaştırıcı-priz hızlandırıcı kullanılan numunelerin SEM görüntüleri ve mineralojik yapıları incelenmiştir.

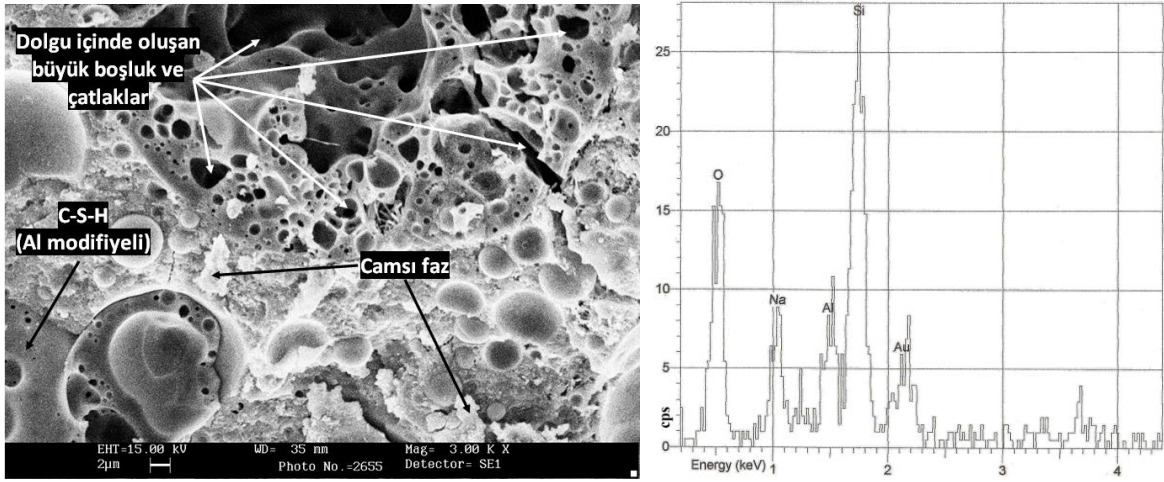
Şekil 3.55’de CEM I çimentosuyla birinci karışım oranında katkısız oluşturulan numuneye ait SEM görüntüsü ve lokal bir bölgenin EDX analiz sonucu yer almaktadır. Şekilde numune yüzeyine 6000 kat büyütme yapılarak ortaya konan jel yapısının EDX analizi sonucu temel elementlerin Ca ve O olduğu görülmüştür (EDX). Katmansı bir görünüme de sahip olan bu jel yapısı portlandit mineraline aittir. Bunun dışında C-S-H jelleri ve alüminyum modifiyeli C-S-H jelleri (C-(A)-S-H) de numunede mevcuttur.



Şekil 3.55. CEM I çimentosuyla katkısız oluşturulan numunenin SEM görüntüsü ve EDX analizi

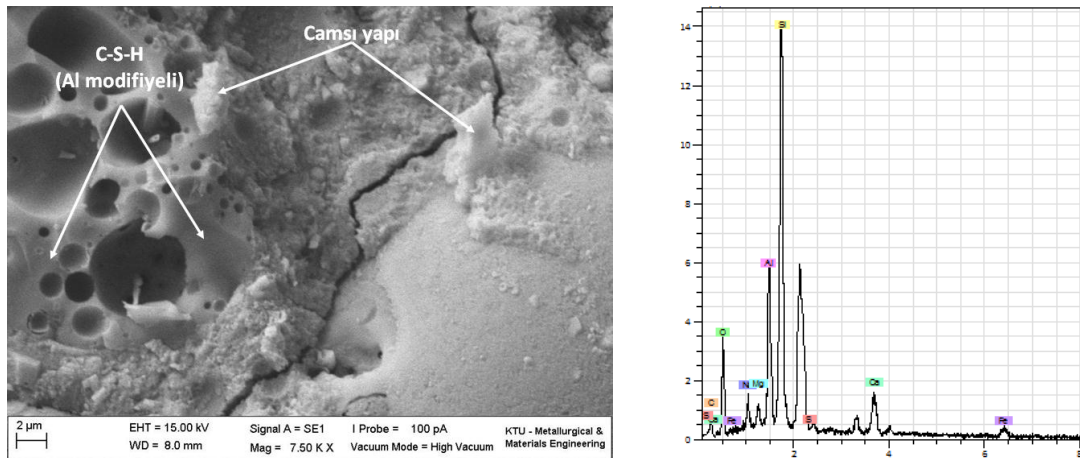
Şekil 3.56’da CEM I çimentosuyla hazırlanmış ve katkı olarak priz hızlandırıcı katkı kullanılmış numunenin SEM görüntüsü ve EDX analizi görülmektedir. 3000 kat büyütme sonucu oluşan görüntü de çok miktarda boşluk ve çatlak görülmektedir. Ayrıca yine hidrasyon sonucu oluşan jeller EDX analizi sonucu belirlenmiştir. Malzemede priz hızlandırıcı katkı kullanımı sonucu diğer numunelerde görülmeyen camsı (silikatlı) fazlar

görülmüştür (EDX). Bu camsı fazların herhangi bir jel yapısı ile bir bağları olduğu görülmemektedir. Ayrıca C-S-H jelleri ile birlikte yine alüminyum modifiyeli C-S-H (C-(A)-S-H) jelleri belirgindir.



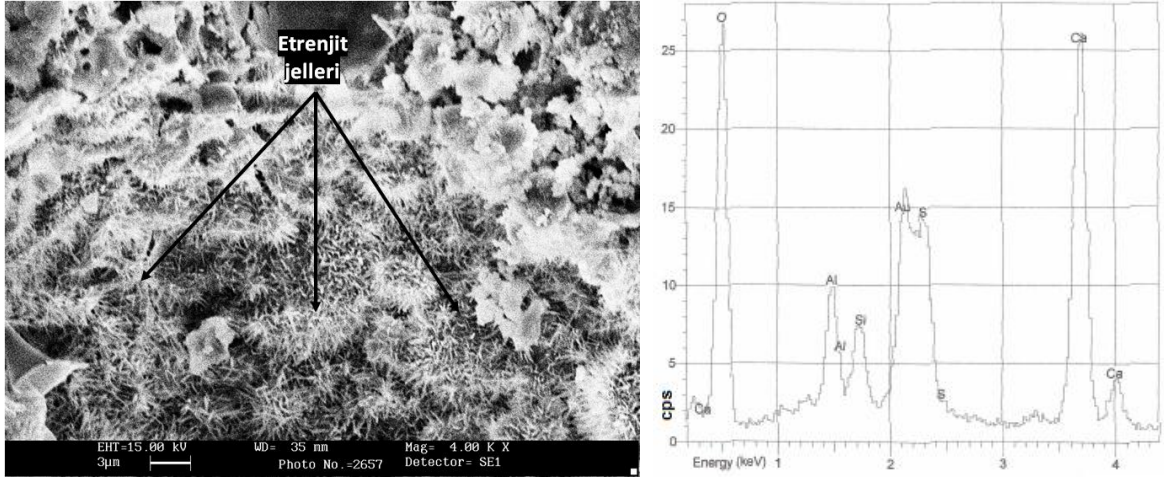
Şekil 3.56. CEM I çimentosuyla priz hızlandırıcı katkı ile oluşturulan numunenin SEM görüntüsü ve EDX analizi

Şekil 3.57’de örnek 1’de akışkanlaştırıcı (SA) ve priz hızlandırıcı kullanılan numunenin SEM görüntüsü ve EDX analizi görülmektedir. Bu analiz sonucunda yine priz hızlandırıcı kullanılan numune içerisinde görülen camsı fazlar görülmüştür. Bu fazların yapı içerisinde herhangi bir jel yapısı ile bağlarının olduğu görülmemiştir. Bu fazın dışında alüminyum modifiyeli C-S-H (C-(A)-S-H) jelleri belirgin bir şekilde görülmektedir (EDX).

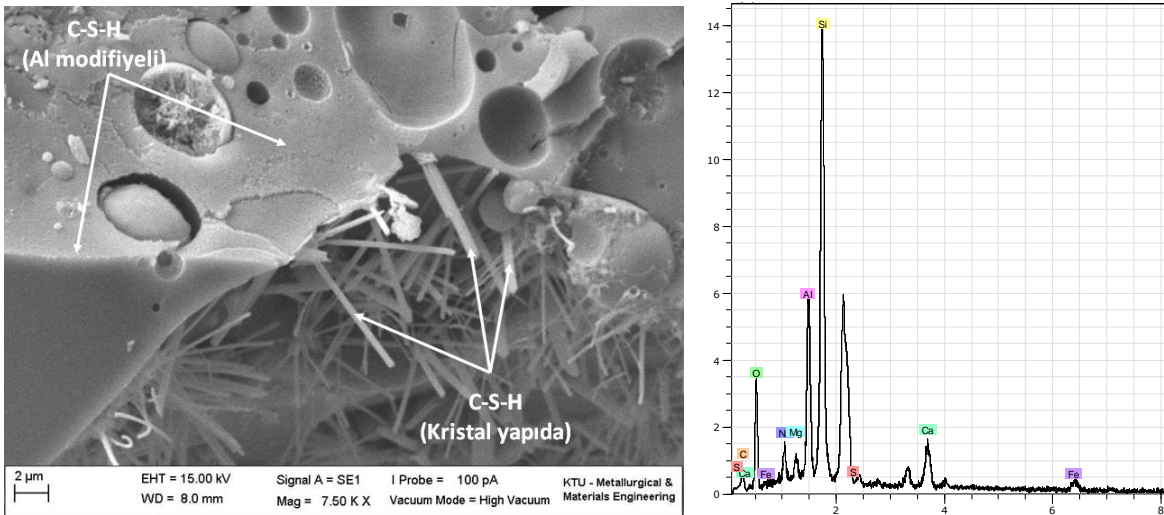


Şekil 3.57. CEM I çimentosuyla akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı kullanılan numunenin SEM görüntüsü ve EDX analizi (Örnek 1)

Akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı kullanılan diğer bir numune görüntüsü ise örnek 2'den elde edilmiştir ve Şekil 3.58'de verilmiştir. Numunenin bu görüntüsünde yüzeyde oluşan etrenjit jelleri tespit edilmiştir (EDX). Resimde görülen etrenjit jelleri iğnemi bir görünüme sahiptir.



Şekil 3.58. CEM I çimentosuyla akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı kullanılan numunenin SEM görüntüsü ve EDX analizi (Örnek 2)



Şekil 3.59. CEM I çimentosuyla akışkanlaştırıcı kullanılan numunenin SEM görüntüsü ve EDX analizi

Şekil 3.59'da akışkanlaştırıcı katkı (SA) kullanılan numunenin SEM görüntüsü ve EDX analizi görülmektedir. 7500 kat olacak biçimde büyütülerek görüntü alınan numune yüzeyinde mikro analizler yapılmıştır. Yapılan mikro analiz sonrasında akışkanlaştırıcı

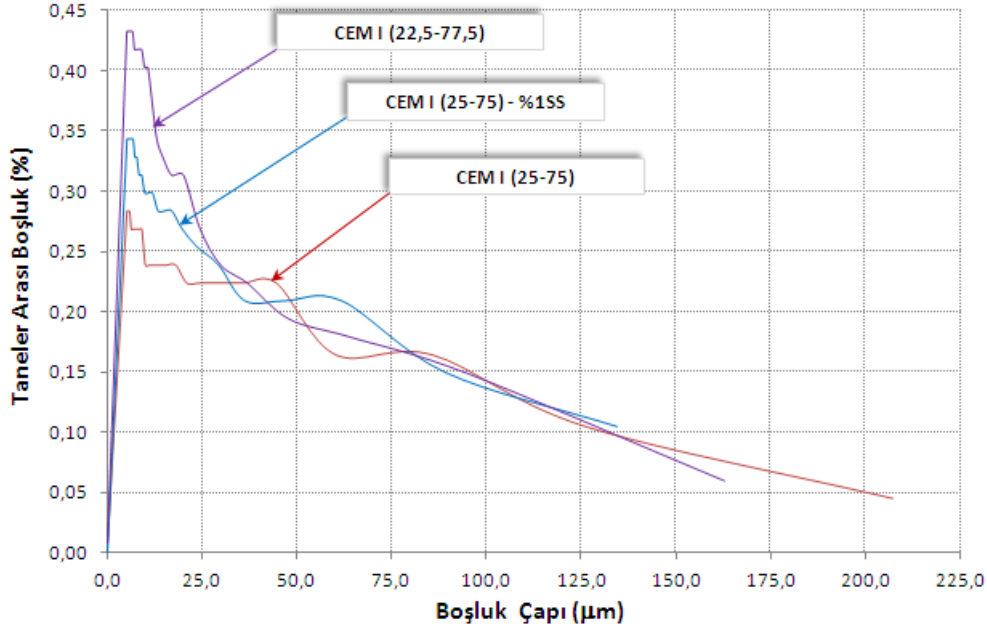
kullanılan numunede de zeminde alüminyum modifiyeli C-S-H (C-(A)-S-H) jellerinin olduğu tespit edilmiştir. Bunun dışında numune içerisinde oluşan boşlukta gelişen kristal yapılı C-S-H jelleri de mevcuttur (EDX).

Yapılan SEM ve mikro analizler sonucunda numunelerin hepsinde genel itibarıyla Al modifiyeli C-S-H (C-(A)-S-H) jelleri tespit edilmiştir. Zeminde bulunan bu jel numunelerde mineralojik yapının çoğuna hakim görünmüştür. Bu durum literatürle (Weerdt vd., 2011) paralellik arz etmektedir. Bunun dışında bazı numunelerde iğnemi yapıda etrenjit jelleri tespit edilmiştir. Priz hızlandırıcının yalnız başına ve akışkanlaştırıcı katkı ile beraber kullanıldığı numunelerde etrenjit jeline rastlanmıştır. Bu yapının uzun dönemli bekletilen numunelerde gerçekleşmesi bu numunelerde ki dayanım ve dürabiliteye olumsuz etkidiği düşünülmektedir. Ayrıca priz hızlandırıcı kullanılan numunelerde camsı fazlar tespit edilmiştir. Bu fazlar priz hızlandırıcının yapısında bulunan silikadan meydana geldiği düşünülmektedir. Ancak bu fazların diğer hidratasyon ürünleri ile herhangi bir bağ yapısı kurmadığı ve camsı faz parçacıkları şeklinde numune içerisinde yer aldığı belirlenmiştir. Kısa kür sürelerinde camsı fazların henüz dayanım kazanmaya başlayan numunelerin dayanımlarına artırıcı yönde katkı ettiği ancak uzun dönemli kür sürelerinde numune dayanımının camsı faz parçacıklarından daha güçlü yapıya sahip olmasından dolayı dayanıma olumsuz etki etmelerine neden olmaktadır. Akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerde de belirgin jel C-(A)-S-H jelidir. Ayrıca bu numuneler içerisinde oluşan mikro boyutlu boşluklarda çubuksu yapıda C-S-H jelleri oluşmuştur. Jellerin bu boşlukları doldurmasıyla numunenin dayanım ve dürabilitesinin olumlu etkilendiği söylenebilir.

### 3.3.2.3. Boşluk Tayini

Yapılan karışım numunelerinden bazılarının civa porozimetresi deneyi ile içerisindeki boşluk miktarı ortaya konmuştur. 90 günlük kür süresi sonunda elde edilen 6 farklı numuneye yapılan deneysel çalışma ile çimento miktarının, priz hızlandırıcının, akışkanlaştırıcı miktarının ve akışkanlaştırıcı-priz hızlandırıcılı numunelerin boşluk oranlarına etkisi incelenmiştir. İncelenen numuneler; 1. karışım oranında katkısız numune (CEM I 25-75), 1. karışım oranında %1 priz hızlandırıcı kullanılan numune (CEM I 25-75-%1SS), 2. karışım oranında katkısız numune (CEM I 22,5-77,5), 2. karışım oranında %1SA katkılı numune (CEM I 22,5-77,5-%1SA), 2. karışım oranında %2SA katkılı

numune (CEM I 22,5-77,5-%2SA) ve 2. karışım oranında %1 priz hızlandırıcılı %1SA katkıli numune (CEM I 22,5-77,5-%1SA-%1SS) şeklindedir.

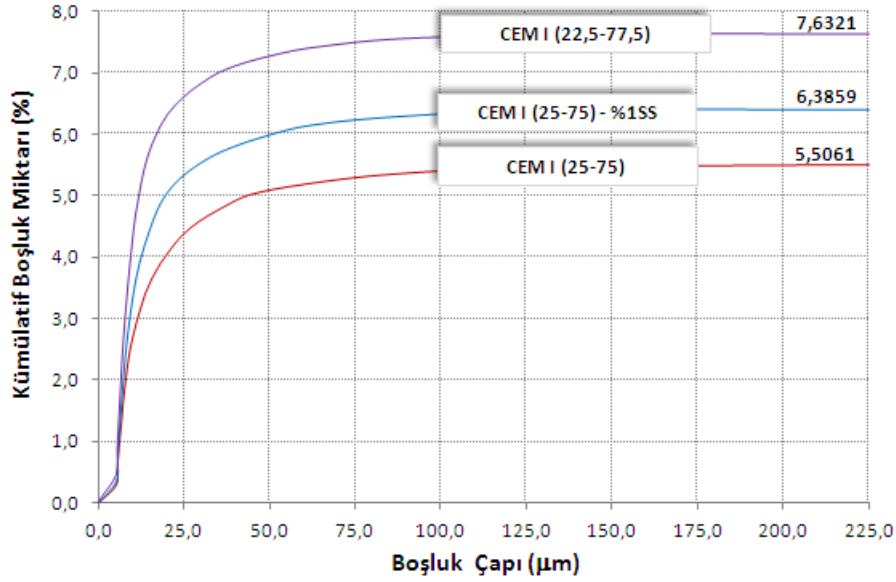


Şekil 3.60. Çimento miktarı ve priz hızlandırıcının boşluk oranına etkisi

Şekil 3.60'da CEM I çimentosuyla 1. ve 2. karışım oranlarında oluşturulan katkısız numuneler ile 1. karışım oranında %1 priz hızlandırıcı ilave edilen numunenin mikroyapısında oluşan boşluk çapları ve boşluk miktarının karşılaştırması görülmektedir. Bütün numunelerde en yüksek miktara sahip boşlukların 5-25 µm çapları arasında olduğu görülmektedir. En büyük boşluk miktarı çimento miktarının %22,5 olduğu 2. karışım oranında katkı kullanılmayan numunede %0,4327 olarak tespit edilmiştir ve 5,083-6,628 µm arası çapta oluşmuştur. Diğer numunelerde ise 1. karışım oranında katkı kullanılmayan numunede 5,121-5,826 µm arası çapta %0,2835, yine aynı karışım oranında %1 priz hızlandırıcı kullanılan numunede ise 5,152-6,763 µm arası çapta %0,3432 boşluk miktarı tespit edilmiştir (Ek Şekil 1-3). Şekilde çimento miktarının azalmasıyla aynı çap boyutunda boşluk miktarının arttığı görülmektedir. Ayrıca yine priz hızlandırıcının aynı çimento oranında kullanıldığı numunede ise priz hızlandırıcı kullanılmayan numuneye göre daha yüksek boşluk miktarına sahip olduğu görülmüştür.

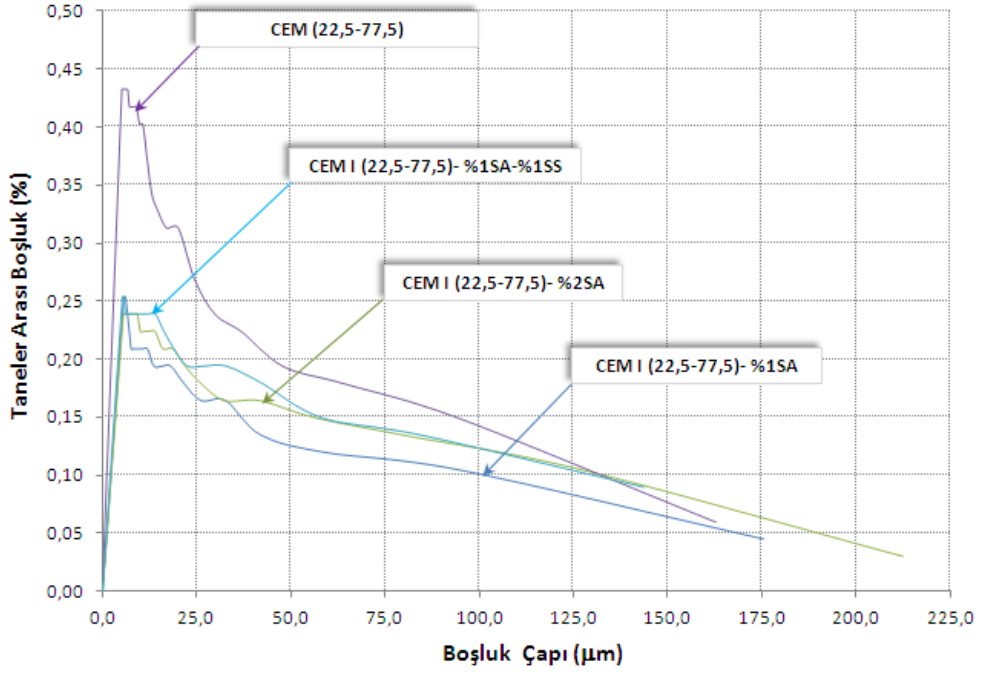
Aynı numunelere yapılan boşluk tayini deneyi sonucunda kümülatif boşluk miktarları grafiği Şekil 3.61'de verilmiştir. Kümülatif boşluk değerleri incelendiğinde

çimento miktarı düşük olan numunenin toplam boşluk miktarı %7,6321 ile en yüksek değerde çıkmıştır. Diğer malzemelerin ise 1. karışım oranında priz hızlandırıcı kullanılan numunede %6,3859, katkı kullanılmayan numunede ise %5,5061 değerindedir.

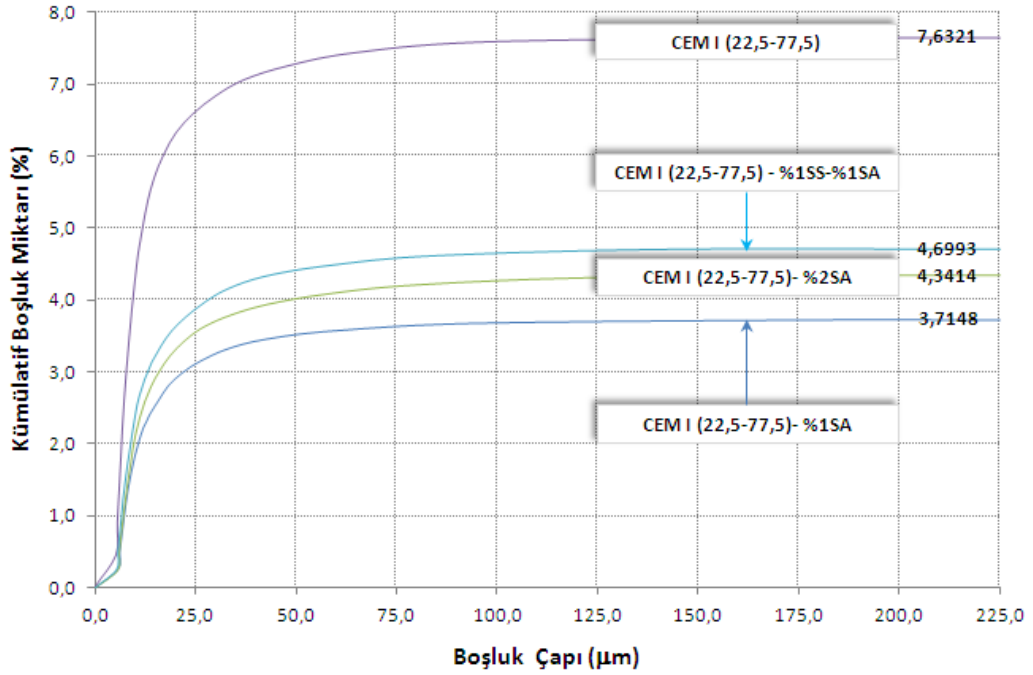


Şekil 3.61. Farklı çimento miktarı ve priz hızlandırıcı kullanılan numunelerin kümülatif boşluk oranları

Akışkanlaştırıcı (SA) katkıların, katkı kullanılmayan ve priz hızlandırıcılar ile birlikte kullanılan numunelerde boşluk miktarına etkileri incelenmiş ve Şekil 3.62’de verilmiştir. Yine bütün numunelerde en yüksek boşluk miktarının 5-25 µm arası çapta olduğu görülmektedir. En yüksek boşluk miktarı çimento miktarının %22,5 olduğu 2. karışım oranında katkı kullanılmayan numunede %0,4327 olarak tespit edilmiş ve 5,083-6,628 µm arası çapta oluşmuştur. Diğer numunelerde ise akışkanlaştırıcı (SA) ve priz hızlandırıcının %1 oranında birlikte kullanıldığı numunede 5,2480-5,5910 µm arası çapta %0,2536, %1 oranında akışkanlaştırıcı (SA) kullanılan numunede 5,631-6,040 µm arası çapta %0,2536 ve %2 oranında akışkanlaştırıcı (SA) kullanılan numunede 5,505-9,217 µm arası çapta %0,2387 miktarında boşluk değeri ölçülmüştür. Burada katkı kullanılmayan numunenin boşluk miktarı dışında diğer numunelerin boşluk çap ve oranları birbirine oldukça yakın çıkmıştır (Ek Şekil 3-6).



Şekil 3.62. Akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcının boşluk miktarına etkisi



Şekil 3.63. Akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı kullanılan numunelerin kümülatif boşluk oranları

Kimyasal katkı kullanılan ve kullanılmayan bu numunelerin kümülatif boşluk miktarları Şekil 3.63'te verilmiştir. Şekil incelendiğinde kimyasal katkıların ayrı ayrı

kullanıldığı ve birlikte kullanıldığı numunelerin kümülatif boşluk oranları birbirine yakın değerler vermiştir. Katkı kullanılmayan numunenin ise kümülatif boşluk miktarı katkı kullanılanlara göre daha yüksek çıkmıştır. Akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerin boşluk miktarları diğer numunelere göre düşük değerde çıkmıştır.

Hidrate olmuş çimento hamurunun mikroyapısında bulunan gözenekler ve gözenek boyut dağılımı çimentolu malzemenin fiziksel özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Hidrate olmuş çimentolu malzemede boşluklar iki farklı grupta oluşur (URL 11);

- Kılcal boşluklar, kısmen hidrate olmuş çimento tanelerinin arasındaki mevcut su dolu boşluk kalıntılarıdır.
- Jel boşlukları, C-S-H jelinin bir parçası olarak ilişkilendirilebilir. Jel boşluklarına C-S-H tarafından doldurulan hacimde ilave edilmiştir.

Çimentolu malzemelerde oluşan boşlukların çapları, tanımlaması ve karışıma etkileri Tablo 3.8’de verilmiştir. Tablodaki tanımlamalar incelendiğinde çalışmada tüm numunelerden elde edilen boşluk sonuçları sonrasında kılcal boşluk sınıfına girdiği görülmüştür. Kılcal boşluklar 10-0,05 mm arasında boşlukları içermektedir. Bu boşluklar numunelerde dayanım ve permeabiliteyi etkilemektedir. Diğer taraftan nm (nanometre) çap boyutunda olan jel boşluklarına bu ölçümlerde rastlanmamıştır.

Tablo 3.8. Çimento hamurundaki boşlukların tanımlanması (URL 11).

İsim	Çap	Tanımlama	Karışıma Etkisi
Kılcal Boşluklar	10-0.05 $\mu\text{m}$	Büyük	Dayanım, permeabilite
	50-10 nm	Orta	Dayanım, permeabilite, yüksek nemde rötre
Jel Boşlukları	10-2.5 nm	Küçük (jel) kılcalları	50% nemde rötre
	2.5-0.5 nm	Mikro boşluklar	Rötre ; sünme
	< 0.5 nm	Mikro boşluklar (arayüzey)	Rötre; sünme

Numuneler incelendiğinde boşluk miktarı yüksek olan numunelerin dayanım değerleri diğer numunelere göre daha düşük seviyede olduğu görülmüştür. Ayrıca boşluk miktarlarını etkileyen parametre olarak numunelerin S/Ç oranları ve numunede kullanılan

su miktarları gösterilebilir. Özellikle katkı kullanılmayan numunenin yüksek S/Ç oranına sahip olması içerisindeki boşluk miktarlarının diğer numunelere göre daha yüksek olmasına neden olmuştur (Tablo 3.9). Bunun yanında süperakışkanlaştırıcıların beton karışımlarında karışımın reolojisini etkilediği bilinmektedir. Bu etkiye benzer olarak beton içerisinde oluşabilecek boşluk hacmi ve boşluk boyut dağılımını da etkilemektedirler (Gorzelańczyk ve Hoła, 2011). Akışkanlaştırıcıların karışım içerisinde taneler arası bir itme kuvveti yaratarak hapsolmuş suyu açığa çıkartarak hidrasyona dahil etmesiyle karışım içerisinde suyun oluşturacağı boşluk miktarını da azaltmaktadır.

Tablo 3.9. Boşluk tayini deneyinde kullanılan numunelerin S/Ç oranı ve su miktarları

Kullanılan Numune Tanımı	Numunenin S/Ç Oranı	Numunede Kullanılan Su Miktarı (gr)
CEM I (25-75) - %1SS	0,99	2150,00
CEM I (25-75)-Katkısız	0,99	2173,03
CEM I (22,5-77,5) -Katkısız	1,08	2132,62
CEM I (22,5-77,5)- %1SA	1,02	2057,11
CEM I (22,5-77,5)- %2SA	1,01	2030,86
CEM I (22,5-77,5)- %1SA-%1SS	1,02	2034,93

Priz hızlandırıcı katkıları da boşluk miktarını etkilemektedirler. Razavi (2007) yaptığı çalışmada hidrolik dolgu içerisinde sodyum silikat tipi priz hızlandırıcı kullanmış ve kullanım miktarının artmasıyla dolgu içerisinde porozitenin arttığını belirtmiştir. Priz hızlandırıcı katkıları çimentolu taneciklerin çok kısa sürede birbirine bağlanmalarını sağlayarak taneler arasında hapsolmuş su miktarını artırmaktadır. Zamanla hapsolmuş suyun bir kısmı karışım içerisinde çimento ile reaksiyona girer diğer kısmı ise buharlaşma yolu ile kaybolmaktadır. Bunun sonucu olarak da malzeme içerisinde kılcal boyutta boşluklar meydana gelmektedir.

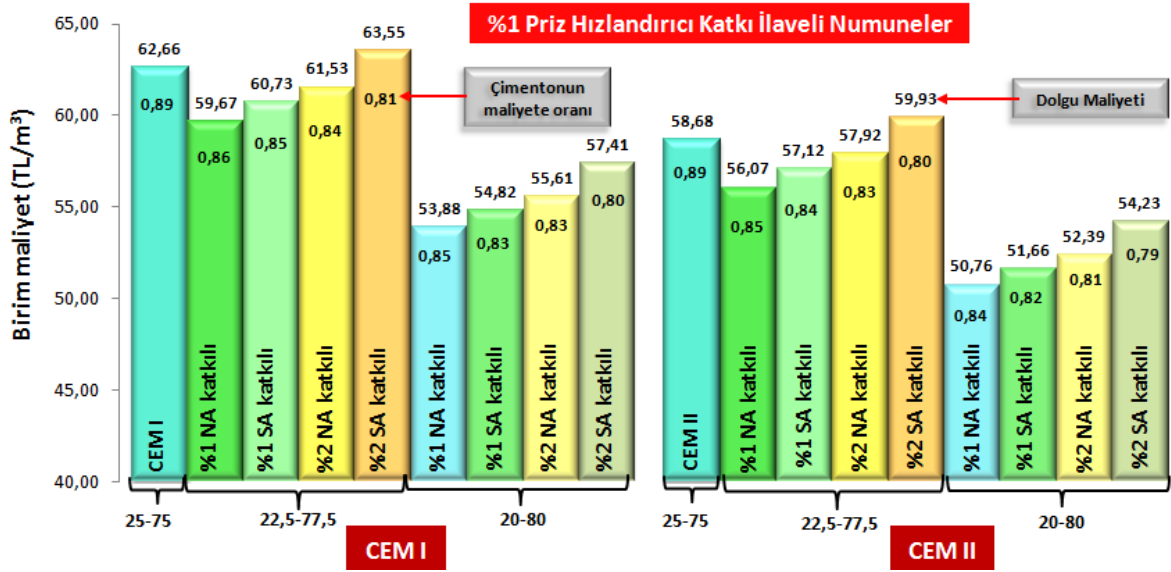
### 3.4. Dolgu Ekonomisi

Dolgu içerisinde kullanılan malzemelerden çimento ve kimyasal katkı (priz hızlandırıcı ve akışkanlaştırıcı) malzemelerin maliyete olan etkisi incelenmiştir. Kullanılan diğer malzemelerin (su ve uçucu kül) malzeme maliyetleri olmadığı için ekonomik

inceleme içerisine dahil edilmemiştir. Burada maliyeti olan malzemelerin KDV dahil fiyatları aşağıdaki şekildedir;

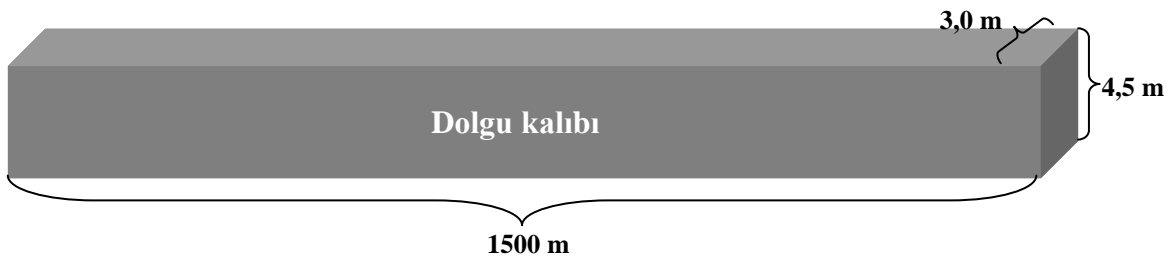
CEM I çimentosu	; 153,40 TL/ton
CEM II çimentosu	; 142,78 TL/ton
SA katkısı	; 0,8 TL/kg
NA katkısı	; 0,5 TL/kg
Priz hızlandırıcı	; 0,45 TL/kg

Malzeme fiyatlarından yola çıkarak %1 priz hızlandırıcı kullanılan ve bütün karışım oranlarında hazırlanan karışımların maliyeti Şekil 3.64’de verilmiştir. Şekilde ayrıca çimento malzemesinin tüm karışımlarda maliyete oranı da verilmiştir. Hesaplanan maliyet miktarlarına bakıldığında halen kullanılan ve 1. karışım oranında CEM II çimentosuyla ve %1 priz hızlandırıcı katkı ile hazırlanan numunenin 1 m<sup>3</sup> maliyeti 58,68 TL’dir. Bu karışım CEM I çimentosuyla hazırlandığında maliyet 62,66 TL’ye çıkmaktadır. Bu CEM I çimentosunun CEM II çimentosuna göre piyasa fiyatının yüksek olmasıyla alakalıdır. Şekil incelendiğinde çimento miktarının azalmasıyla dolgu maliyetinin düştüğü ve bunun yanında çimento maliyetinin 1 m<sup>3</sup> dolgu içerisinde tüm maliyete oranının da düştüğü görülmektedir. Akışkanlaştırıcı kullanılan karışımlara baktığımızda katkı kullanım miktarı arttığında dolgu maliyetinin arttığı görülmektedir. Ancak katkı kullanım miktarının artmasıyla çimentonun dolgu içerisinde toplam maliyete oranı düşmektedir. Şekilde en düşük dolgu maliyeti CEM II çimentosuyla 3. karışım oranında %1 NA katkısı ile hazırlanan numunede 50,76 TL olarak hesaplanmıştır. Çimento maliyetinin dolgu içerisinde toplam maliyete oranının en düşük olduğu numune ise yine CEM II çimentosuyla 3. karışım oranında %2 SA katkısı ile hazırlanan numunede %79 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.64. %1 priz hızlandırıcı katkı ile birlikte farklı oranlarda akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerin 1 m<sup>3</sup> dolgu içerisinde oluşan maliyeti

Mekanize işletmede bir panoda oluşacak toplam dolgu maliyeti; Bu kısımda yeraltı dolgusu için bir panoda üretim başlangıcından bitimine kadar yapılan dolgu kalıbının toplam hacminden yola çıkarak panoda kullanılan toplam malzeme miktarlarının maliyeti hesaplanmıştır. Bunun için Çayırhan İşletmesinde tek ayak üretim yapan herhangi bir sahasındaki kalıplardan genişlik, uzunluk ve boy ortalama değerleri şirket kontrol merkezi verilerinden alınmış ve 1500 m uzunluğundaki bir üretim panosundaki üretim sonunda toplam kalıp hacmi hesaplanmıştır. Alınan verilerde dolgu kalıp genişliği 3,0 m, yüksekliği 4,5 m ve pano boyu 1500 m'dir (Şekil 3.65).



Şekil 3.65. Mekanize ayakta 1500 m boyunda bir panoda dolgu kalıbı toplam hacmi

Bir panodaki kalıp hacmi ve malzeme miktarları ile ilgili örnek hesap Tablo 3.10'da verilmiştir. Bu hesap çizelgesinde CEM I çimentosuyla ve %1 priz hızlandırıcı katkı ile

hazırlanmış dolgu karışımının 1 m<sup>3</sup>'te ve 1 panodaki malzeme miktarı hesabı yapılmıştır. Bu karışım değerleri ile oluşturulan numunenin 1 panodaki maliyeti;

CEM I-%1 Priz hızlandırıcı; 1.268.813,12 TL şeklindedir.

Tablo 3.10. Bir panodaki malzeme miktarlarının örnek hesap tablosu

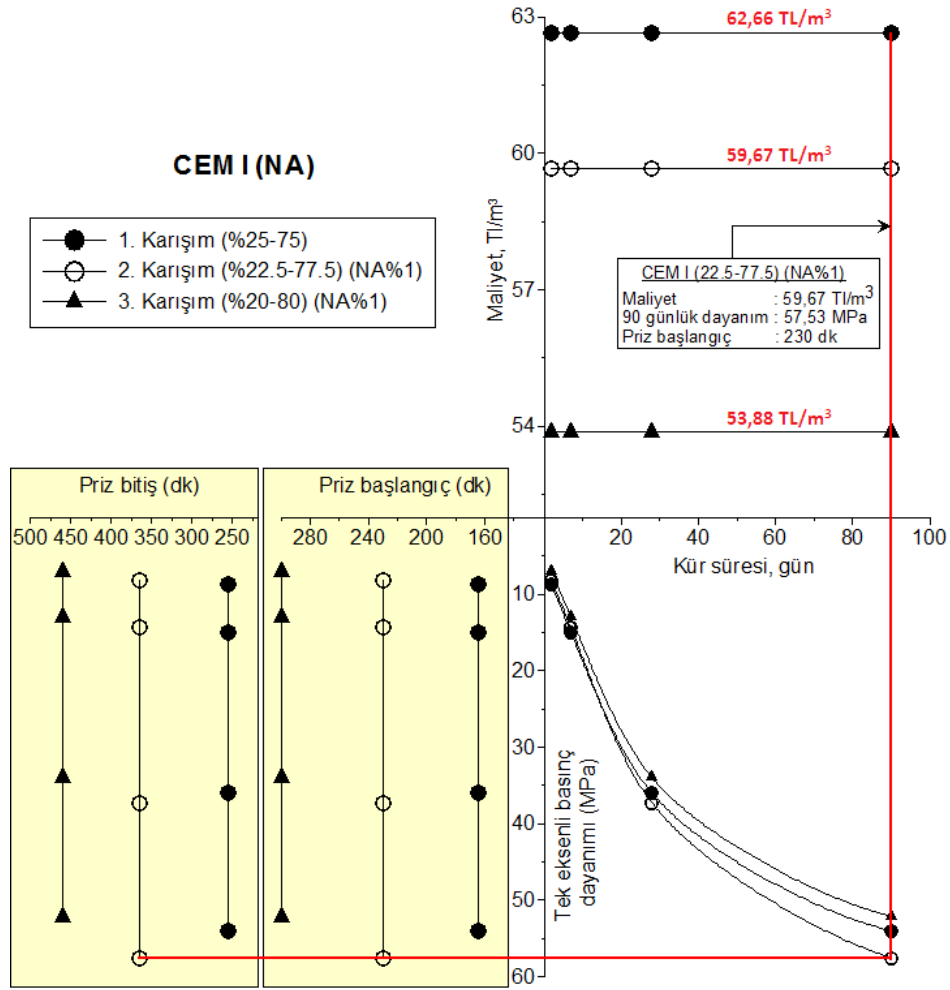
Malzeme	Malzemelerin 1m <sup>3</sup> 'teki miktarları (kg)	1 Panodaki Dolgu Hacmi (m <sup>3</sup> )	1 Panodaki Malzeme Miktarları (kg)
Çimento	365,57	Yükseklik 4,5 m	7.402.792,50
Kül	1096,72	Genişlik 3,0 m	22.208.580,00
Su	361,37	Pano Boyu 1.500 m	7.317.742,50
Priz hızlandırıcı	14,62	20.250,00	296.055,00

Laboratuar ortamında hazırlanan karışımların yeraltı dolgusunda kullanımına yönelik değerlendirme yapabilmek için maliyet-dayanım-priz süresi ilişkileri daha detaylı biçimde incelenmiştir. Mekanize üretimde uygulanan dolgu yönteminde priz süresinin öneminden dolayı bütün değerlendirmelerde %1 priz hızlandırıcı ilave edilen numune değerleri kullanılmıştır. Ayrıca birinci karışım oranında hazırlanan numuneler yeraltı şartlarında mevcut kullanım oranlarını temsil ettiği için ikinci ve üçüncü oranlarda hazırlanan numuneler ile karşılaştırması yapılmıştır. Bu karşılaştırmalarda ikinci ve üçüncü karışım oranlarının birinci karışım oranları yerine yeraltı dolgusunda kullanımına yönelik bazı kabuller yapılmış ve kararlar bu kabullere göre verilmiştir.

Yapılan kabuller aşağıdaki şekildedir;

1. Karışımın maliyet bakımında avantajlı olması gerekmektedir,
2. Dayanım değerlerinin 2 ve 7 günlük kür süresinde birinci karışım oranında hazırlanan numune dayanımına oranının en az %95 seviyesinde olması gerekmektedir,
3. Dayanım değerlerinin 28 ve 90 günlük kür sürelerinde birinci karışım oranında hazırlanan numune dayanımının %100'ünden fazla olması gerekmektedir,
4. Birinci karışım oranında hazırlanan numunenin priz başlangıç süresi diğer karışımların priz başlangıç süresinin en az %70'i kadar olmalıdır.

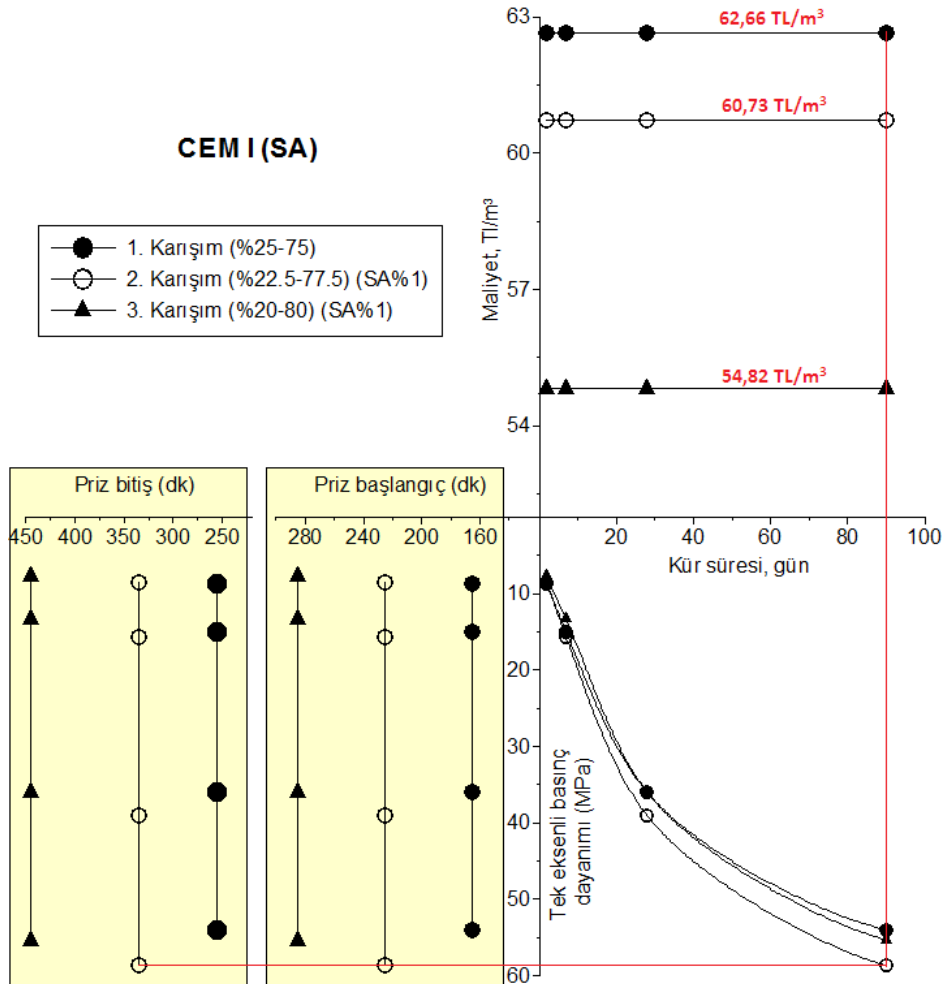
Şekil 3.66'da CEM I çimentosu ile ikinci ve üçüncü karışım oranlarında NA ve priz hızlandırıcı katkı kullanılarak oluşturulan numunelerin birinci karışım oranlarında sadece priz hızlandırıcı kullanılarak oluşturulan numune ile karşılaştırması verilmiştir. Maliyet bakımından en yüksek değer 62,66 TL/m<sup>3</sup> ile birinci karışım oranındaki numuneye aittir. Çimento miktarının düşmesiyle ikinci ve üçüncü karışım oranlarında maliyet düşmüştür. Bu oranlarda maliyetler sırasıyla 59,67 TL/m<sup>3</sup> ve 53,88 TL/m<sup>3</sup> şeklindedir. Dayanım değerleri incelendiğinde 2 ve 7 günlük kür sürelerinde ikinci karışım oranında akışkanlaştırıcı katkı ile hazırlanan numune dayanım değerlerinin birinci karışım oranında hazırlanan numune dayanım değerlerine oranı sırasıyla %93 ve %96 seviyesindedir. 28 ve 90 günlük kür sürelerinde ise sırasıyla %103 ve %106 şeklindedir. 2 ve 7 günlük kür sürelerinde üçüncü karışım oranlarında akışkanlaştırıcı katkı ile hazırlanan numune dayanım değerlerinin birinci karışım oranlarında hazırlanan numune dayanımına oranı sırasıyla %80 ve %86 seviyesindedir. 28 ve 90 günlük kür sürelerinde ise %94 ve %96 şeklinde gerçekleşmiştir. Priz sürelerine baktığımızda birinci karışım oranında hazırlanan numunenin priz başlangıç süresinin ikinci ve üçüncü karışım oranında hazırlanan numunelerin priz süreleriyle sırasıyla %72 ve %55'i oranında olduğu görülmüştür. Bu değerlerden yola çıkarak ikinci karışım oranında %1 NA katkısı ile hazırlanan numunenin yeraltı dolgusu içerisinde kullanımında herhangi bir sakınca görülmemektedir. Maliyet ve uzun dönemli kür sürelerinde birinci karışım oranında hazırlanan numuneden daha avantajlı olduğu görülmüştür. Kısa kür sürelerinde de birinci karışımın %95'i seviyesinde olduğu görülmüştür. Üçüncü karışım oranında hazırlanan numunenin ise dayanım bakımında yetersiz kaldığı düşünülmüştür. Yeraltı dolgusunda üçüncü karışım oranı ile oluşturulacak dolgu karışımı kullanımının sakıncalı olabileceği düşünülmektedir.



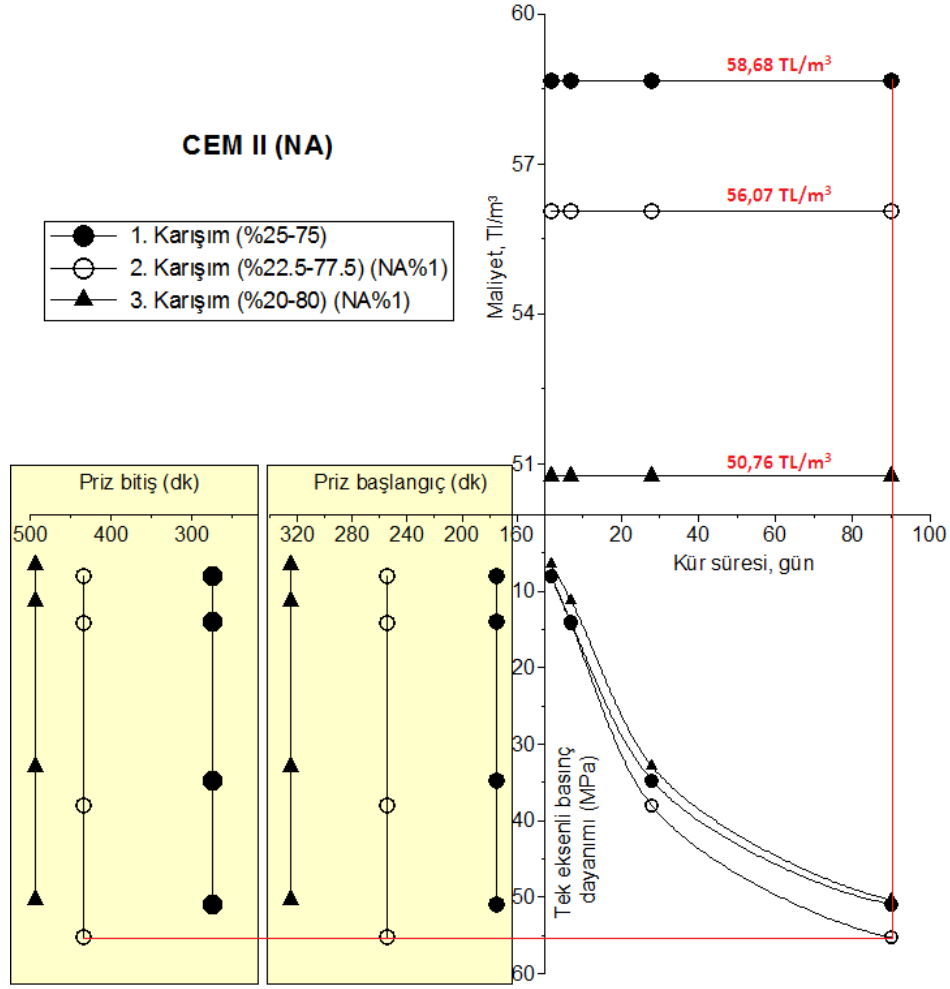
Şekil 3.66. İkinci ve üçüncü karışım oranlarında CEM I çimentosu ve %1 NA-%1 priz hızlandırıcı katkısı ile oluşturulan numunelerin birinci karışım oranında %1 priz hızlandırıcı ile oluşturulan karışım numunesi ile maliyet-dayanım-priz süreleri karşılaştırması

Şekil 3.67’de CEM I çimentosu ile ikinci ve üçüncü karışım oranlarında SA ve priz hızlandırıcı katkı kullanılarak oluşturulan numunelerin birinci karışım oranlarında sadece priz hızlandırıcı kullanılarak oluşturulan numune ile karşılaştırması verilmiştir. Maliyet değerleri incelendiğinde birinci karışım oranındaki numunenin maliyeti  $62,66 \text{ TL/m}^3$ , ikinci karışım oranındaki numunenin maliyeti  $60,73 \text{ TL/m}^3$  ve üçüncü karışım oranlarındaki numunenin maliyeti  $54,82 \text{ TL/m}^3$  şeklindedir. Çimento miktarının düşmesiyle ikinci ve üçüncü karışım oranlarında maliyetlerin düştüğü görülmüştür. Şekil 3.67’de dayanım değerleri incelendiğinde ikinci karışım oranında SA katkısı ile hazırlanan numunenin 2 ve 7 günlük kür sürelerinde dayanım değerlerinin birinci karışım oranı dayanım değerlerine oranı sırasıyla %98 ve %104 seviyesindedir. 28 ve 90 günlük kür sürelerinde ise sırasıyla %108 ve %109 seviyesinde gerçekleşmiştir. Üçüncü karışım

oranlarında SA katkısı ile hazırlanan numunenin 2 ve 7 günlük kür sürelerinde dayanım değerlerinin birinci karışım oranlarında hazırlanan numune dayanımlarına oranı %89 seviyesinde kaldığı görülmüştür. 28 ve 90 günlük kür sürelerinde ise sırasıyla %100 ve %102 seviyelerindedir. Priz süreleri incelendiğinde birinci karışım oranında hazırlanan numunenin priz başlangıç süresinin ikinci ve üçüncü karışım oranında hazırlanan numunelerin priz süreleriyle oranlandığında sırasıyla %73 ve %58 değer verdiği görülmüştür. Bu değerlerden yola çıkarak ikinci karışım oranında %1 SA katkısı ile hazırlanan numunenin yeraltı dolgusu içerisinde kullanımında herhangi bir sakınca görülmemektedir. Maliyet ve dayanım bakımından birinci karışım oranında hazırlanan numuneden daha avantajlı olduğu görülmüştür. Üçüncü karışım oranlarının yeraltı dolgusu karışımı için yetersiz olduğu düşünülmüştür.



Şekil 3.67. İkinci ve üçüncü karışım oranlarında CEM I çimentosu ve %1 SA-%1 priz hızlandırıcı katkısı ile oluşturulan numunelerin birinci karışım oranında %1 priz hızlandırıcı ile oluşturulan karışım numunesi ile maliyet-dayanım-priz süreleri karşılaştırması

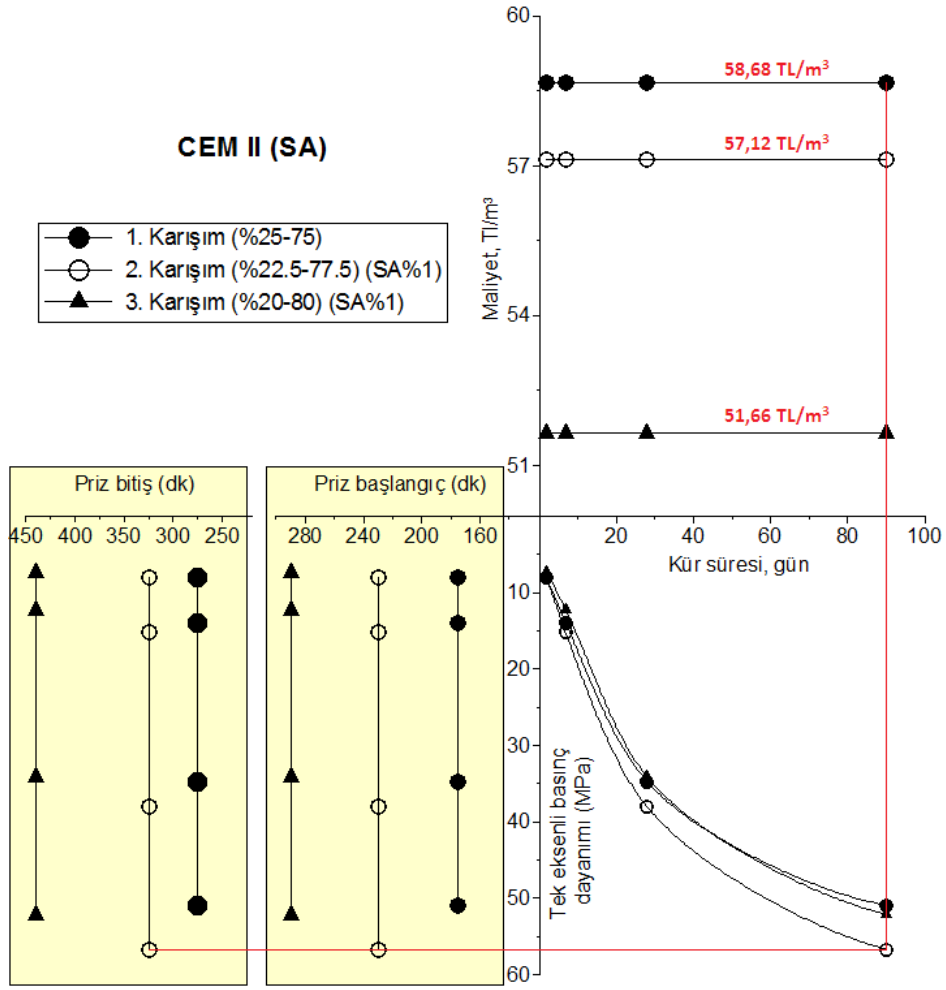


Şekil 3.68. İkinci ve üçüncü karışım oranlarında CEM II çimentosu ve %1 NA-%1 priz hızlandırıcı katkısı ile oluşturulan numunelerin birinci karışım oranında %1 priz hızlandırıcı ile oluşturulan karışım numunesi ile maliyet-dayanım-priz süreleri karşılaştırması

Şekil 3.68’de CEM II çimentosu ile ikinci ve üçüncü karışım oranlarında NA ve priz hızlandırıcı katkı kullanılarak oluşturulan numunelerin birinci karışım oranlarında sadece priz hızlandırıcı kullanılarak oluşturulan numune ile karşılaştırması verilmiştir. Maliyet değerleri incelendiğinde birinci karışım oranındaki numunenin maliyeti  $58,68 \text{ TL/m}^3$ , ikinci karışım oranındaki numunenin maliyeti  $56,07 \text{ TL/m}^3$  ve üçüncü karışım oranlarındaki numunenin maliyet ise  $50,76 \text{ TL/m}^3$  şeklindedir. 2 ve 7 günlük kür sürelerinde dayanım değerleri incelendiğinde ikinci karışım oranında NA katkısı ile hazırlanan numunenin dayanım değerlerinin birinci karışım oranı dayanım değerlerine oranı sırasıyla %100 ve %102 seviyesindedir. 28 ve 90 günlük kür sürelerinde ise %109 seviyesinde gerçekleşmiştir. 2 ve 7 günlük kür sürelerinde üçüncü karışım oranlarında NA katkısı ile hazırlanan numune dayanım değerlerinin birinci karışım oranlarında hazırlanan

numune dayanımına oranı %80 seviyesindedir. 28 ve 90 günlük kür sürelerinde ise sırasıyla %95 ve %99 seviyelerinde kalmıştır. Priz süreleri incelendiğinde birinci karışım oranında hazırlanan numunenin priz başlangıç süresinin ikinci ve üçüncü karışım oranında hazırlanan numunelerin priz süreleriyle oranlandığında sırasıyla %69 ve %54 değer verdiği görülmüştür. Bu değerlerden yola çıkarak ikinci karışım oranında %1 NA katkısı ile hazırlanan numunenin yeraltı dolgusu içerisinde kullanımında priz süresi bakımından sakınca görülmektedir. Maliyet ve dayanım bakımından ise ikinci karışım oranında hazırlanan numuneler birinci karışım oranında hazırlanan numuneden daha avantajlı olduğu görülmüştür. Üçüncü karışım oranında hazırlanan numunenin ise maliyet dışında herhangi bir avantajı olmadığından yeraltı dolgusunda kullanımının sakıncalı olacağı düşünülmüştür.

Şekil 3.69'da CEM II çimentosu ile ikinci ve üçüncü karışım oranlarında SA ve priz hızlandırıcı katkı kullanılarak oluşturulan numunelerin birinci karışım oranlarında sadece priz hızlandırıcı kullanılarak oluşturulan numune ile karşılaştırması verilmiştir. Maliyet değerleri incelendiğinde birinci karışım oranındaki maliyeti 58,68 TL/m<sup>3</sup>, ikinci karışım oranındaki numunenin 57,12 TL/m<sup>3</sup> ve üçüncü karışım oranlarındaki numunenin maliyet ise 51,66 TL/m<sup>3</sup> şeklindedir. 2 ve 7 günlük kür sürelerinde dayanım değerleri incelendiğinde ikinci karışım oranında SA katkısı ile hazırlanan numune dayanım değerlerinin birinci karışım oranı dayanım değerlerine oranı sırasıyla %100 ve %109 seviyesindedir. 28 ve 90 günlük kür sürelerinde ise sırasıyla %109 ve %112 seviyesinde gerçekleşmiştir. 2 ve 7 günlük kür sürelerinde üçüncü karışım oranlarında SA katkısı ile hazırlanan numune dayanım değerlerinin birinci karışım oranlarında hazırlanan numune dayanımına oranı %90 seviyesindedir. 28 ve 90 günlük kür sürelerinde ise sırasıyla %98 ve %102 şeklinde gerçekleşmiştir. Priz süreleri incelendiğinde birinci karışım oranında hazırlanan numunenin priz başlangıç süresinin ikinci ve üçüncü karışım oranında hazırlanan numunelerin priz süreleriyle oranlandığında sırasıyla %76 ve %60 değer verdiği görülmüştür. Bu değerlerden yola çıkarak ikinci karışım oranında %1 SA katkısı ile hazırlanan numunenin yeraltı dolgusu içerisinde kullanımının uygun olduğu tespit edilmiştir. Maliyet ve dayanım bakımından ikinci karışım oranında hazırlanan numunelerin birinci karışım oranında hazırlanan numuneden daha avantajlı olduğu görülmüştür. Üçüncü karışım oranında hazırlanan numunenin ise maliyet dışında herhangi bir avantajı olmadığından yeraltı dolgusunda kullanımının sakıncalı olacağı düşünülmüştür.



Şekil 3.69. İkinci ve üçüncü karışım oranlarında CEM II çimentosu ve %1 SA-%1 priz hızlandırıcı katkısı ile oluşturulan numunelerin birinci karışım oranında %1 priz hızlandırıcı ile oluşturulan karışım numunesi ile maliyet-dayanım-priz süreleri karşılaştırması

Yapılan ekonomi-dayanım-priz süresi grafikleri sonrasında yeraltı dolgusu içerisinde kullanımı öngörülen karışım oranlarının uygulamada kullanılarak uygunluğunun test edilmesi ve kullanımı için karar verilmesi gerekmektedir.

#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada Çayırhan yeraltı mekanize kömür işletmesinde uygulanan uçucu kül-çimento karışımı dolgu içerisinde kimyasal katkıların etkileri incelenmiştir. İşletmede uygulanan dolgunun karakteristiği yapılan laboratuvar çalışmalarıyla ortaya konmuştur. Priz hızlandırıcı katkı dolgu içerisinde çeşitli miktarlarda kullanılarak etkileri araştırılmıştır. Ayrıca çimento miktarı kademeli olarak düşürülerek karışım içerisinde akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanılmıştır. Bu kullanımlar sonrasında oluşturulan numunelerin fiziksel, kimyasal, mekanik ve mikro yapı incelemesini kapsayan çeşitli deneysel çalışmalar yanında ekonomik analiz de yapılarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Uçucu küllere yapılan kimyasal analizler sonucunda ASTM standardına göre F tipi kül olduğu tespit edilmiştir.
- Karışımlarda uçucu kül miktarının artması yani çimento miktarının düşmesiyle su/çimento (S/Ç) oranında bir artış söz konusu olmuştur.
- Akışkanlaştırıcı katkıların dolgu karışımlarında %3-7 arasında su azalttıkları belirlenmiştir.
- Priz hızlandırıcı katkıların S/Ç oranına etkisinin olmadığı görülmüştür. Ancak malzemede bir kıvam kaybına sebebiyet verdiği görülmüştür.
- Çimento miktarının düşmesiyle priz sürelerinde bir düşüş yaşanmıştır. CEM I çimentosunun CEM II çimentosuna göre bütün karışım oranlarında priz sürelerinin daha kısa zamanlarda oluştuğu tespit edilmiştir. Çimentoların C<sub>3</sub>S ve C<sub>3</sub>A miktarlarının farklılık göstermesi priz sürelerinin değişimi üzerinde etkin olmuştur.
- Priz hızlandırıcı katkının priz sürelerinde kısalma etkisi gerçekleştirdiği belirlenmiştir. Ölçülen en erken priz başlangıç süresi 1. karışım oranında (25-75) CEM I çimentosuyla %1,5 priz hızlandırıcı katkıyla hazırlanan numuneden 155 dk ile elde edilmiştir. Priz bitiş süresi ise yine aynı karışım oranında 245 dk olarak ölçülmüştür.
- Akışkanlaştırıcı katkıların priz sürelerinde geciktirici bir etki ettiği belirlenmiştir. Süperakışkanlaştırıcı (SA) katkının normal akışkanlaştırıcı (NA) katkıya göre priz sürelerinde neden olduğu gecikme zamanının daha düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun NA katkısı için verilen kullanım oranlarının üzerinde karışımlara ilave edilmesiyle alakalı olduğu belirlenmiştir.

- Malzeme inceliğinin priz süreleri üzerine sabit kıvamda geciktirici etki ettiği tespit edilmiştir. Priz süresindeki gecikmenin öğütülme sonucunda artan yüzey alanına bağlı olarak malzemenin su gereksiniminin artmasıyla alakalı olduğu görülmüştür.

- Bağlayıcı tipinin dayanıma olan etkilerinin birbirine yakın olduğu ancak CEM I çimentosunun CEM II çimentosuna göre biraz daha yüksek değerler verdiği belirlenmiştir. 2 günlük kür süresinde en yüksek dayanım 1. karışım oranında CEM I çimentosuyla hazırlanan numuneden 7,65 MPa değeri ile elde edilmiştir. 90 günlük kür süresinde ise 58,92 MPa ile yine aynı karışımdan elde edilmiştir.

- Çimento miktarlarının ise dayanım üzerinde etkisinin yüksek olduğu belirlenmiştir. 2. karışım oranlarında (22,5-77,5) hazırlanan numunelerin 1. karışım oranlarına (25-75) göre bütün kür sürelerinde dayanım değeri kaybı CEM I çimentosunda %9-15, CEM II çimentosunda %9-19'dur. 3. Karışım oranlarında (20-80) hazırlanan numunelerin 1. karışım oranında (25-75) hazırlanan numunelere göre dayanım kaybı CEM I çimentosunda %17-25, CEM II çimentosunda ise %16-32 olarak belirlenmiştir.

- Akışkanlaştırıcı katkıların bütün kür sürelerinde katkı kullanılmayan numunelere göre daha yüksek dayanım verdiği tespit edilmiştir. Ancak NA katkısının 2 günlük kür sürelerinde bütün karışım oranlarında düşük dayanım verdiği belirlenmiştir. Bunun sebebi katkı için belirlenen kullanım oranlarından daha yüksek oranlarda kullanılmasıyla alakalıdır. Akışkanlaştırıcı katkıların katkı kullanılmayan numunelere göre 90 günlük kür süresinde %7,5-32,5 arasında dayanımda bir artış sağladığı tespit edilmiştir.

- Priz hızlandırıcı katkının 2 günlük kür süresinde katkı kullanılmayan numuneye göre dayanımda bir artış, 28-90 günlük kür sürelerinde ise dayanımlarda bir düşüşe sebebiyet verdiği belirlenmiştir. Priz hızlandırıcıların boşluk oranı üzerinde artırıcı etki etmesi uzun dönemli dayanımlarda düşüşe sebebiyet vermiştir.

- 2. (22,5-77,5) ve 3. (20-80) karışım oranlarında akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı katkıların bir arada kullanıldığı numunelerin priz hızlandırıcı kullanılmayan numunelere göre kısa kür sürelerinde (2-7 gün) dayanımda bir artış meydana geldiği, ancak uzun kür sürelerinde (28-90 gün) ise dayanımda bir düşüş yaşandığı tespit edilmiştir.

- Öğütülmüş kül kullanımının kısa kür süresinde (2-7 gün) normal kül kullanılan numuneye göre düşük dayanım verdiği ancak uzun kür (28 gün) süresinde eşit veya daha yüksek dayanım verdiği tespit belirlenmiştir.

- Karışımların mikro yapıları incelenmiş ve mineralojik yapının büyük kısmını Al modifiyeli C-S-H jelinin (C-(A)-S-H) oluşturduğu belirlenmiştir. Priz hızlandırıcı katkı

kullanılan ve hiç katkı kullanılmayan numunelerin mikro yapılarında ikincil jel (etrenjit) oluşumlarının akışkanlaştırıcı katkı kullanılan numunelere göre daha fazla olduğu belirlenmiştir. Ayrıca akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerin mikro yapısındaki C-S-H jellerinin boşlukları doldurduğu ve dayanıma olumlu etki ettiği tespit edilmiştir.

- Akışkanlaştırıcı ve priz hızlandırıcı katkıların mikro yapıdaki boşluk boyut dağılımı ve kümülatif boşluk miktarına etki ettiği görülmüştür. Priz hızlandırıcı kullanılan numunelerin akışkanlaştırıcı kullanılan numunelere göre boşluk miktarı daha fazla gerçekleşmiştir. Boşluk miktarı fazla olan numunelerin dayanım değerlerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Ayrıca incelenen numunelerde mikro boşlukların kılcal boşluk boyutu aralığında olduğu belirlenmiştir.

- Priz hızlandırıcının %1 oranında kullanıldığı numunelerin ekonomik incelemesi yapılmış ve bütün karışım oranlarında çimentonun dolgu maliyetinin %79-89'unu oluşturduğu belirlenmiştir. Çimento miktarının düşürüldüğü ve akışkanlaştırıcı katkı ilave edilen karışımların maliyetinin daha düşük olduğu belirlenmiştir. 2. karışım oranında %1 priz hızlandırıcı katkı ile birlikte %1 oranında NA ve SA tipi akışkanlaştırıcı kullanılan numunelerin dayanım ve ekonomik açıdan 1. karışım oranına göre daha avantajlı olduğu belirlenmiştir.

## 5. ÖNERİLER

Bu kısımda öneriler iki şekilde yapılmıştır; birincisi laboratuvar çalışmalarına yönelik ve ikincisi mekanize üretimde dolgu uygulamalarına yönelik şeklindedir.

Laboratuvar çalışmalarına yönelik öneriler;

- Uygulamada yapılan dolgudan karot numuneleri alınıp yeraltı dolgusunun karakteristiğinin ortaya konulması gerekmektedir.

- Uygulama alanında yan kayaçlardan karot numuneleri alınıp bu numuneler üzerinde mekanik deneyler yapılarak yeraltı dolgusu için oluşan açıklıkların analitik ve sayısal modelleri araştırılmalıdır.

- Çalışmada kullanılan çimento tiplerinden farklı çimentoların kullanılıp dayanıma olan etkileri araştırılmalıdır.

- Farklı tipte akışkanlaştırıcı (özellikle polikarboksilat tipi) ve çok çeşitli oranlarda kullanılmalarıyla dolgu içerisindeki etkilerinin daha detaylı araştırılması gerekmektedir.

- Sodyum silikat tipi priz hızlandırıcının farklı modül oranlarında dolgu içerisinde kullanılarak etkileri araştırılmalıdır.

- Uçucu külde farklı öğütme zamanları ve daha fazla ikame oranları belirleyerek dolgu içerisindeki etkileri araştırılmalıdır.

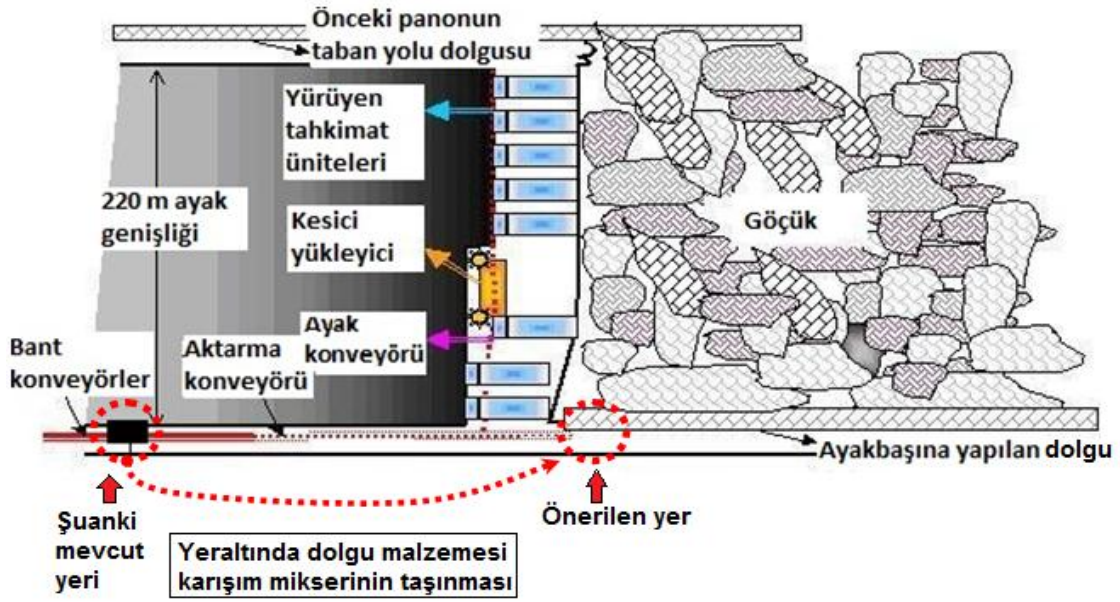
- Farklı zamanlarda karıştırma süreleri belirleyerek karıştırma zamanının dolgu performansına etkisinin araştırılması gerekmektedir.

- Farklı yapıya sahip uçucu küllerin deneysel çalışmalarla karşılaştırmalı etkileri araştırılmalıdır.

Mekanize üretimde dolgu uygulamalarına yönelik öneriler;

- Yeraltı dolgu işleyişinde malzeme karışımını sağlayan mikserin dolgu kalıbına yani ayakbaşına olan mesafesinin uzun (100–1000 m) olmasından dolayı dolgu malzemesi içerisine fazla miktarda su kullanılarak malzemenin kalıba transferi mümkün olmaktadır. Dolgu karışımlarında fazla su kullanımının dolgu dayanımının düşmesine sebebiyet verdiği yapılan deneysel çalışmalarla ortaya konmuştur. Dolgu içerisinde fazla suyun kullanılmaması için karışım mikseri yerinin Şekil 5.1’de gösterildiği gibi aktarma konveyörünün geri kısmına taşınması önerilmektedir. Dolgu malzemelerinin yerüstünden yeraltı dolgu karışım mikserine kadar kuru transfer edildiğinden mikserin önerilen yere taşınmasında bir sakınca görülmemektedir. Yeraltı dolgusunun önerilen biçimde

gerçekleştirilmesi durumunda karışım içerisinde mesafeden kaynaklı kullanılan fazla suyun azalacağı ve dolayısıyla dolgu S/Ç oranının düşeceği öngörülmektedir. Böylelikle S/Ç oranının azalması hem dayanımda bir artış sağlayacak hem de püskürtme esnasında karışıma ilave edilen priz hızlandırıcı kullanım oranında bir azalma sağlayacaktır. Ayrıca dolgu için yeterli dayanım daha düşük çimento miktarlarında sağlanabilecek ve dolgu ekonomisi düşen çimento miktarınca azalacaktır.



Şekil 5.1. Mekanize üretimde yeraltı malzeme karışım mikseri için yeni önerilen yer

- Deneysel çalışmalar sonrasında her iki çimento tipinde 2. karışım oranında %1 NA-SA ve %2 SA kullanılan karışımların yeraltı dolgularında kullanılabileceği öngörülmüştür. Bu oranlarda kullanılan karışımların 2 ve 7 günlük dayanım değerlerinin halen yeraltında uygulanan dolgu karışımının dayanım değerlerine yakın veya yüksek olduğu, 28 ve 90 günlük dayanım değerlerinin ise oldukça yüksek olduğu yapılan deneysel çalışmalarla belirlenmiştir. Dolguda uzun dönemli dayanım değerlerinin yüksek olması alt taban yolunun yeni üretim panosunda da kullanılması ve taban yolu arkası tahkimat ünitelerinin geri kazanımı için önem arz etmektedir. Üretim yönteminde bir panonun üretimi bittiğinde o panonun alt taban yolu yeni üretim panosunun üst taban yolu olarak kullanılmaktadır. Yeni panoya geçiş yapma zamanına kadar dolgu dayanımının yüksek olması taban yolundaki tahkimat ünitesinin korunmasına neden olmaktadır. Üretimin tamamen bitirildiği üretim panosunda üst taban yolundaki tahkimat üniteleri ise sökülerek

yeniden kullanılmaktadır. Dolguda dayanım kaybından meydana gelen bozulmalar tahkimat ünitelerinde bozulmalara sebebiyet vermektedir (Şekil 5.2). Bundan dolayı dolgu içerisinde dayanımı arttırıcı akışkanlaştırıcı kimyasal katkı kullanımının faydalı olacağı aşıkardır.



Şekil 5.2. Dolguda yetersiz dayanımın neden olduğu tahkimat elemanında bozulmalar (Çavuşoğlu, 2007).

## 6. KAYNAKLAR

- Abbasy, F., 2009. Thermal Conductivity of Mine Backfill, MSc. Thesis, University of Concordia, Monreal, Canada, 1-156.
- Ahmad, S., Nawaz, M. and Elahi, A.,. Effect of Superplasticizers on Workability and Strength of Concrete, 30th Conference on Our Worl in Concrete & Structure, Singapore, <http://cipremier.com/1000300>, 14 Haziran 2012.
- Ahmaruzzaman, M., 2010. A Review on The Utilization of Fly Ash, Progress in Energy and Combustion Science, 36, 327-363.
- Aiad, I., 2003. Influence of Time Addition of Superplasticizers on The Rheological Properties of Fresh Cement Pastes, Cement and Concrete Research, 33, 1229-1234.
- Aitcin, P., C. ve Mindess, S., 2011. Sustainability of Concrete, Modern Concrete Technology 17, Taylor & Francis Group Press, 301.
- Akman, M., S., 2007. "8. CANMET/ACI Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete" Konferansı, 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu ve Sergisi, Ankara, 213-236.
- Al-Shawabkeh, A., Matsuda, H. ve Hasatani, M., 1995. Comparative Reactivity of Treated FBC- and PCC-Fy Ash for SO<sub>2</sub> Removal, The Canadian Journal of Chemical Engineering, 73, 678-685.
- Amaratunga, L., M. ve Hmidi, N., 1997. Cold-Bond Agglomeration of Gold Mill Tailings for Backfill Using Gypsum Beta-Hemihydrate and Cement as Low Cost Binders, Canadian Metallurgical Quarterly, 36, 283-288.
- Anon, 1995. Longwall Mining, Energy Information Administration Office of Coal, Nuclear, Electric and Alternate Fuels U.S. Department of Energy Washington DC, 1-63p.
- Anon, 2003. Flyash Facts for Highway Engineers, American Coal Ash Association, Technical Report Documentation, 1-75.
- Archibald, F., F., Lausch, P. ve He, Z., X., 1993. Quality Control Problems Associated with Backfill Use in Mines, Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, 86, 972, 53-57.
- Archibald, J., F., Chew, J., L. and Lausch, P., 1999. Use of Ground Waste Glass and Normal Portland Cement Mixtures for Improving Slurry and Paste Backfill Support Performance, CIM Bulletin, 92, 74-80.
- Archibald, J., F., Degagne, D., O., Lausch, P. ve De Souza, E., M., 1995. Ground Waste Glass as a Pozzolanic Consolidation Agent for Mine Backfill., CIM Bulletin, 995, 80-87.
- Arslantürk, C. ve Erdoğan, Ş., 2007. İşlenebilirliği İyileştirmede Süper Akışkanlaştırıcı Kullanımı, 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu ve Sergisi, Ankara, 237-247.

- Aruntaş, H., Y., 2006. Uçucu Küllerin İnşaat Sektöründe Kullanım Potansiyeli, Gazi Üniv. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 21, 1, 193-203.
- Ashraf, W., B. ve Noor, M., A., 2011. An Experimental Comparative Study on The Effects of Cement Types on Concrete Properties, 31st Cement and Concrete Science Conference Novel Developments and Innovation in Cementitious Materials, Imperial College London, United Kingdom, 1-20.
- Askew, J.,E., McCarthy, P., L. ve Fitzgerald, D.J., 1978. Backfill Research for Pillar Extraction at ZC/NBHC. Proceedings, 12th Canadian RockMechanics Symposium on Mining with Backfill, The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 100-110.
- ASTM C494, 2002. Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM C260, 2002. Standard Specification for Air - Entraining Admixtures for Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- ASTM, C618-05, 2005. Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete, Annual Book of ASTM Standards.
- Atkinson, R., J., Hannaford, A., L., Harris, L., ve Philip, T., P., 1989. Using Smelter Slag in Mine Backfill, Mining Magazine, 118-123.
- Aydın, Y. ve Kaygusuz, Y., 2000. Modern Teknolojiyle Donatılan Park Teknik Çayırhan Kömür İşletmesinin Tanıtılması, Türkiye 12. Kömür Kongresi Bildiriler Kitabı, Zonguldak, 117-128.
- Avcı, S., 2005. Türkiye’de Termik Santraller ve Çevresel Etkileri, İstanbul Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Coğrafya Bölümü, Coğrafya Dergisi, İstanbul, 13, 1-26.
- Baba, A., 2001. Yatağan (Muğla) Termik Santral Atık Depolama Sahasının Yeraltı Sularına Etkisi, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 25, 2, 1-19.
- Benzaazoua, M., Belem, T. ve Bussièrè B., 2002. Chemical Factors That Influence the Performance of Mine Sulphidic Paste Backfill, Cement and Concrete Research, 32, 1133-1144.
- Benzaazoua, M., Fall, M. ve Belem, T., 2004. Acontribution To Understanding The Hardening Process of Cemented Pastefill, Minerals Engineering, 17, 2, 141–152.
- Benzaazoua, M., Ouellet, J., Servant, S., Newman, P. ve Verburg, R., 1999. Cementitious Backfill with High Sulfur Content Physical, Chemical and Mineralogical Characterization, Cement and Concrete Research, 29, 5, 719-725.
- Bernier, L., R., Li, M., G. ve Moerman, A., 1999. Effects of Tailings and Binder Geochemistry on The Physical Strength of Paste Backfill, Proceedings of Sudbury’99, Mining and The Environment II, Sudbury, Canada, 1113-1122.
- Bhatty, J., I., Gajda, J. ve Miller, F., M., 2002. High-Carbon Fly Ash in Cement Manufacturing: A Commercial Demonstration, Proceedings of the International Technical Conference on Coal Utilization & Fuel Systems, 2, 27, 887-898.
- Bhatty, J., I., Gajda, J. ve Miller, F., M., 2003. Commercial Demonstration of High-Carbon Fly Ash Technology in Cement Manufacturing, International Ash Utilization Symposium, Center for Applied Energy Research, Kentucky, 1-38.

- Blissett, R., S. ve Rowson, N., A., 2012. A Review of The Multi-Component Utilization of Coal Fly Ash, The Science and Technology of Fuel and Energy, 1, 1-23.
- Bloss, M., L., 1992. Prediction of Cemented Rock Fill Stability-Design Procedures and Modelling Techniques, PhD Thesis, University of Quesland.
- Bondar, D., Lynsdale C., J., Milestone, N., B., Hassani, N. ve Ramezaniapour, A., A., 2011. Effect of Type, Form, and Dosage of Activators on Strength of Alkali-Activated Natural Pozzolans, Cement and Concrete Composites, 33, 2, 251-260.
- Brakebusch, F., W., 1994. Basics of Paste Backfill Systems, Mining Engineering, 46, 1175-1178.
- Brooks, J., J., Johari, M., M., A. ve Mazloom, M., 2000. Effect of Admixtures on The Setting Times of High-Strength Concrete, Cement & Concrete Composites, 22, 293-301.
- Bumrongjaroen, W. ve Livingstone, R., A.,. A Figure of Merite for Fly Ash Replacement of Portland Cement, World of Coal Ash (WOCA) Conference, Lexington, USA, <http://www.flyash.info/>, 12 Haziran 2009.
- Chandra, S. ve Björnström, J., 2002. Influence of Cement and Superplasticizers Type and Dosage on The Fluidity of Cement Mortars –Part I, Cement and Concrete Research, 32, 1605-1611.
- Charif, H., Jaccoud, J.,-P. ve Alou, F., 1990. Reduction of Deformations with The Use of Concrete Admixtures, 5. Proceedings of The International RILEM Symposium-Admixtures for Concrete Improvement of Properties, 439-467.
- Cheung, J., Jeknavorian, A., Roberts, L. ve Silva, D., 2011. Impact of Admixtures on The Hydration Kinetics of Portland Cement, Cement and Concrete Research, 41, 12, 1289-1309.
- Chindaprasirt, P., Chai, J. ve Sinsiri, T., 2005. Effect of Fly Ash Fineness on Compressive Strength and Pore Size of Blended Cement Paste, Cement and Concrete Resource, 27, 425–428.
- Chindaprasirt, P., Chai, J. ve Sinsiri, T., 2007. Effect of Fly Ash Fineness on Microstructure of Blended Cement Paste, Construction and Building Materials, 21, 7, 1534-1541.
- Chugh, Y., P., Deb, D., Dutta, D. ve Caldwell, M., 2000. Underground Placement of Coal Processing Waste and Coal Combustion By-Products Based Paste Backfill for Enhanced Mining Economics, *Ibid*, 143-150.
- Chugh, Y., P., Deb, D. ve Biswas, D., 2003. Underground Placement of Coal Processing Waste and Coal Combustion Byproducts Based Paste Backfill for Enhanced Mining Economics, Proceedings 19th World Mining Congress, 1327-1342.
- CIMFR,. Development and Demonstration Of High Concentration Fill Technology on Utilization of Fly Ash as A Filling Material For Underground Coal Mines, Central Institute of Mining and Fuel Research, <http://www.cmriindia.nic.in/stowing.pdf>, 15 Haziran 2012.

- Colleparidi, M., M., 1995. Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science, and Technology; Chapter 6: Water Reducers/Retarders, Second Edition Edited by V.S. Ramachandran, Institute for Research in Construction National Research Council Canada Ottawa, Canada.
- Colleparidi, M., 1998. Admixtures Used to Enhance Placing Characteristics of Concrete, Cement and Concrete Composites, 20, 103-112.
- Contini, B., Iabichino, G., Mancini, R. ve Pelizza, S., 1983. A Study on The Possible Uses of Waste Calcium Sulphate from Chemical Industry as A Mine Fill Material, Proceedings, 3rd International Symposium on Mining with Backfill, 9-20.
- Çavuşoğlu, İ., 2007. Park Termik Yeraltı Dolgu Uygulamaları, Yayınlanmamış Teknik Not, 1-10.
- Çavuşoğlu, İ., 2008. Uçucu Küllerin Dolgu Malzemesi Olarak Kullanılması: Örnek Bir Uygulama (Çayırhan), Madencilik Dergisi, 47, 3, 3-13.
- Çavuşoğlu, İ., Şenfilo, L., Tarhan Ş. ve Turan, H., H., 2009. Çayırhan Yeraltı İşletmelerinde Yüksek Arınlı Mekanize Uzunayakların Üretim Hızının İncelenmesi, Türkiye 2. Maden Makinaları Sempozyumu, 06 Kasım, Zonguldak-Türkiye (Çağrılı Bildiri), 129-142.
- Çavuşoğlu, İ., Çapık, M., Yılmaz, A., O. ve Zengin, T., 2011. Yeraltı Ocak Sularının Macun Dolguda Kullanımı, Türkiye 22. Uluslararası Madencilik Kongresi ve Sergisi, Ankara, 163-170.
- De Souza, E., Archibald, J.F. ve De Gagne, D., 1997. Glassfill-An Environmental Alternative for Waste Glass Disposal, CIM Bulletin, 1010, 58-64.
- De Souza E., Archibald J., F. ve Dirige A., P., 2003. Economics and Perspectives of Underground Backfill Practices in Canadian Mining, 105th Annual General Meeting of The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal (Quebec), Canada.
- Didari, V., 1992. O.A.L. İşletmesi Müessesesi Yeraltı Ocaklarında Taban Yolu Kenar Dolgusu Yapımında Çayırhan Termik Santral Artığı Malzemenin Kullanım Olanaklarının Araştırılması: Proje Sonuç Raporu, Hacettepe Üniversitesi Zonguldak Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü, 1-66.
- Dorricott, M., G. ve Grice, A., G., 2002. Backfill-The Environmentally Friendly Tailings Disposal System, Proceedings Green Processing (The Australasian Institute of Mining and Metallurgy: Melbourne), Australia, 265-270.
- Durekovic, A., 1995. Cement Pastes of Low Water to Solid Ratio: An Investigation of The Porosity Characteristics Under The Influence of a Superplasticizer and Silica Fume, Cement and Concrete Research, 25, 2, 365-375.
- Eijk, R., J., van., 2001. Hydration of Cement Mixtures Containing Contaminants: Design and Application of the Solidified Product, PhD. Thesis, University of Twente, The Netherlands, 200.
- EN 450-1, 2005. Fly ash for concrete. Definition, Specifications and Conformity Criteria.
- ENVIS, 2007. Utility Bonanza from Dust, State Environment Related Issues, Vol. 2, No:6, 1-8.

- Erçıkdı, B., 2009. Mineral ve Kimyasal Katkı Maddelerinin Macun Dolgu Performansına Etkisi, Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 1-124.
- Erçıkdı, B., Cihangir, F., Kesimal, A., Deveci, H. ve Alp, İ., 2010. Utilization of Water-Reducing Admixtures in Cemented Paste Backfill of Sulphide-Rich Mill Tailings, Journal of Hazardous Materials, 179, 940-946.
- Erdoğan, S., T. ve Erdoğan, T., Y., 2007. Kimyasal Katkı Maddeleri ve Tarihi Geçmişleri, 2. Yapılarda Kimyasal Katkılar Sempozyumu ve Sergisi, Ankara, 21-34.
- Erdoğan, T., 2003. Beton, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Yayınları, Ankara, 1-741.
- Erdoğan, T., Y., 1997. Admixtures for Concrete, Middle East Technical University Press, Ankara, 1-188.
- Erdoğdu, Ş., 2000. Compability of Superplasticizers with Cements Different in Composition, Cement and Concrete Research, 30, 767-773.
- Erol, M., Küçükbayrak, S. ve Meriçboyu, A., E., 2008. Characterization of Sintered Coal Fly Ashes, Fuel, 87, 1334-1340.
- Fall, M., Benzaazoua M. ve Ouellet S., 2004. Effect of Tailings Properties on Paste Backfill Performance, Minefill 2004 Symposia (The Eighth International Symposia on Mining with Backfill), Beijing, China, 193-202.
- Fall, M., Benzaazoua M. ve Saa, E., G., 2008. Mix Proportioning of Underground Cemented Tailings Backfill, Tunnelling and Underground Space Technology, 23, 80-90.
- Fall, M., Benzaazoua, M. ve Ouellet, S., 2005. Experimental Characterization of the Influence of Tailings Fineness and Density on The Quality of Cemented Paste Backfill, Minerals Engineering, 18, 41-44.
- Farzam, H., Rispin, M. ve Karlson, R., 1998. The Use of Unique Admixture Technologies in Mine Backfill-Technology Description and Case Histories, Proceedings of the 6th International Symposium on Mining with Backfill (MINEFILL'98), The Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication Series, Australia, 17-28.
- Felekoğlu, B., Türkel, S. ve Kalyoncu, H., 2009. Optimization of Fineness to Maximize The Strength Activity of High-Calcium Ground Fly Ash – Portland Cement Composites, Construction and Building Materials, 23, 2053-2061.
- Ferreira, C., Ribeiro, A. ve Ottosen, L., 2003. Possible Applications for Municipal Solid Waste Fly Ash, Journal of Hazardous Materials, 96, 201-216.
- Flat, R., J., Houst, Y., F., Oesch, R., Bowen, P., Hoffman, H., Widmer, J., Sulser, U., Maeder, U. ve Bürge, T., A., 1998. Analysis of Superplasticizers Used in Concrete, EDP Sciences, Wiley-VCH, Analisis Magazine, 26, 28-35.
- Font, O., Querol, X., Juan, R., Casado, R., Ruiz, C., R., López-Soler, A., Coca, P. ve Peña, F., G., 2007. Recovery of Gallium and Vanadium from Gasification Fly Ash, Journal of Hazardous Materials, 139, 413-423.
- Grice, A., 1998. Underground Mining with Backfill, The 2nd Annual Summit-Mine Tailing Disposal Systems, Brisbane, Australia, 5-15.

- Grice, A., G., Finn, T. ve Smith, P., A., 1999. Backfilling in Australian Mines: A New Application in Underground Coal Operations, *Australian Coal Review*, 10-14.
- González, A., Navia, R. ve Moreno, N., 2009. Fly Ashes from Coal and Petroleum Coke Combustion: Current and Innovative Potential Applications, *Waste Management & Research*, 27, 976-987.
- Gorzelańczyk, T. ve Hoła, J., 2011. Pore Structure of Self-Compacting Concretes Made Using Different Superplasticizers, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 11, 3, 611-621.
- Gül, R. ve Aydın, A., C., 2008. Akışkanlaştırıcı (Süper veya Normal) Katkı Maddelerinin Kullanılmasında Göz Önünde Bulundurulması Gereken Hususlar, *Teknik Not: Atatürk Üniversitesi İnşaat Müh. Bölümü, Erzurum*.
- Gündeşli, U., 2008. Uçucu Kül, Silis Dumanı ve Yüksek Fırın Cürufunun Beton ve Çimento Katkısı Olarak Kullanımı Üzerine Bir Kaynak Taraması, *Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana*, 1-71.
- Haktanır, K. ve Karaca, A., 1996. Afşin Elbistan Termik Santrali Emisyonlarının Çevre Topraklarının Fiziksel, Kimyasal ve Biyolojik Özellikleri Üzerine Etkileri, TÜBİTAK Yer Deniz Atmosfer Bilimleri ve Çevre Araştırma Grubu, Proje Kod No:KTÇAG125, Ankara, 1-200.
- Hassani, F. ve Archibald, J., 1998. Mine Backfill, *The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum*, 1-308.
- Hassani, F., P., Ouellet, J. ve Hossein, M., 2001. Strength Development in Underground High Sulphate Paste Backfill Operation, *CIM Bulletin*, 94, 57-62.
- Hassani, F., Benzaazoua, M. ve Nokken, M., 2011. Evaluation of The Effect of Sodium Silicate Addition to Mine Backfill, Gelfill, 22nd World Mining Congress and Expo, İstanbul, 317-324.
- Hassani, F., Razavi, S.M. ve Isagon, I., 2007. A Study of Physical and Mechanical Behaviour of Gelfill, Minefill, *CIM Bulletin*, 1-28.
- Huynh, L., Beattie, D., A., Fornasiero, D. ve Ralston, J., 2006. Effect of Polyphosphate and Naphthalene Sulfonate Formaldehyde Condensate on the Rheological Properties of Dewatered Tailings and Cemented Paste Backfill, *Journal of Minerals Engineering*, 19, 1, 28-36.
- Iyer, R., S. ve Scott, J., A., 2001. Power Station Fly Ash – A Review of Value-Added Utilization Outside of The Construction Industry, *Resources, Conservation and Recycling*, 31, 217-228.
- İstanbuluoğlu, S., 1995. O.A.L.İ. Müessesinde Pnömatik Dolgu Uygulaması, 1-40.
- İbuk, A., 2006. Park Teknik Çayırhan Yeraltı İşletmesi, Yayınlanmamış Teknik Not, 1-50.
- Jixiong, Z., Nan, Z., Yanli, H. ve Qiang, Z., 2011a. Impact Law of The Bulk Ratio of Backfilling Body to Overlying Strata Movement in Fully Mechanized Backfilling Mining, *Journal of Mining Science*, 47, 1, 73-84.
- Jixiong, Z., Qiang, Z., Yanli, H., Jinwei, L., Nan, Z. ve Dongfeng, Z., 2011b. Strata Movement Controlling Effect of Waste and Fly Ash Backfillings in Fully Mechanized Coal Mining with Backfilling Face, *Mining Science and Technology*, 21, 721-726.

- Jolicoeur, C. ve Simard, M., A., 1998. Chemical Admixture Cement Interactions: Phenomenology and Physico-Chemical Concepts, Cement and Concrete Composites, 20, 87–101.
- Kahraman, E., Erarslan, O., Çavuşoğlu, İ. ve Yılmaz A., O., 2011. Mekanize Uzun Ayaklarda Kömür Damar Eğiminin Ayak Söküm Süresine Etkisi, Madencilik Dergisi, 50, 4, 29-37.
- Karapınar, N., 2009. Maden Atık Yönetimi; Macun Teknolojisi Kullanımı, Madencilik Dergisi, 48, 1, 31-42.
- Kermani, M., F., 2008. An Investigation into A New Binder for Hydraulic Backfill, Msc Thesis, McGill University, Montreal, Canada, 133.
- Kesimal, A., Yılmaz, E., Erçıkıdı, B., Alp, İ. ve Deveci, H., 2005. Effect of Properties of Tailings and Binder on The Short and Long-Term Strength and Stability of Cemented Paste Backfill, Material Letters, 59, 28, 3703-3709.
- Khatib, J., M. ve Mangat, P., S., 1999. Influence of Superplasticizers and Curing on Porosity and Pore Structure of Cement Paste, Cement & Concrete Composites, 21, 431-437.
- Kiattikomol K., Jaturapitakkul, C., Songpiriyakij, S. ve Chutubtim, S., 2001. A Study of Ground Coarse Fly Ashes with Different Fineness from Various Sources as Pozzolanic Materials, Cement and Concrete Composites, 23, 335–343.
- Klein, K., ve Simon, D., 2006. Effect of specimen composition on the strength development in cemented paste backfill, Canadian Geotechnical Journal, 43, 3, 310-324.
- Koçak, Y., 2010. A Study on The Effect of Fly Ash and Silica Fume Substituted Cement Paste and Mortars, Scientific Research and Essays, 5, 9, 990-998,
- Kosmatka, S., H., Kerkhoff, B. ve Panarese, W., 1995. Design and Control of Concrete Mixtures, Canadian Portlant Cement Association, 6th Edition, 1-221.
- Krauss, P., D., Rogalla, E., A., Sherman, M., R., McDonald, D., B., Osborn, A., E., N. and Pfeifer, D.W., 1995. Trasverse Cracking in Newly Constructed Bridge Decks, NCHRP Report 380, 12-37.
- Krishnamoorthy, T.S., Gopalakrishnan, S., Balasubramanian, K., Bharatkumar, B., H. ve Rao, P., R., M., 2002. Investigations on the Cementitious Grouts Containing Supplementary Cementitious Materials, Cement and Concrete Research, 32, 6, 1395-1405.
- Lazniewska-Piekarczyk, B., 2012. The Influence of Selected New Generation Admixtures on The Workability, Air-Voids Parameters and Frost-Resistance of Self Compacting Concrete, Construction and Building Materials, 310-319.
- Lee, S., H., Kim, H., J., Sakai, E. ve Daimon M., 2003. Effect of Particle Size Distribution of Fly Ash–Cement System on The Fluidity of Cement Pastes, Cement and Concrete Research, 33, 5, 763-768.
- Lokeshappa, B. ve Dikshit, A., K., 2011. Disposal and Management of Flyash, International Conference on Life Science and Technology (IPCBEE), IACSIT Press, Singapore, 3, 11-14.

- Manca, P., P., Massacci, G., Massidda, L. ve Rossi, G., 1983. Mill Tailings and Various Binder Mixtures for Cemented Backfill: Analysis of Properties Related to Mining Problems, Proceedings 3rd International Symposium on Mining with Backfill, 39-47.
- Manmohan, D. ve Mehta, P., K., 1981. Influence of Pozzolanic Slag, and Chemical Admixtures on Pore Size Distribution and Permeability of Hardened Cement Pastes, Journal of Cement, Concrete and Aggregates, 3, 63–67.
- Manz O., E., 1999. Coal Fly Ash: A Retrospective and Future Look, Fuel, 78, 133–6.
- Matsui, K., Shimada, H., Sasaoka, T., Ichinose, M. ve Kubota, S., 2000. Highwall Mining System with Backfilling, Mine Planning and Equipment Selection (MPES'00), Balkema, Rotterdam, 333-338.
- Matsui, K., Shimada, H., Kramadibrata, S. ve Rai., M., S., 2001. Some Considerations of Highwall Mining Systems in Coal Mines, 17. International Mining Congress and Exhibition of Turkey- IMCET2001, Ankara-Turkey, 269-276.
- Mattigod S., V., Dhanpat, R., Eary, L., E. ve Ainsworth, C., C., 1990. Geochemical Factors Controlling The Mobilization of Inorganic Constituents from Fossil Fuel Combustion Residues: I. Review of The Major Elements, Journal of Environmental Quality, 19, 188–201.
- McGuire, A., J., 1978. Falconbridge Slag as a Cementing Agent in Backfill, Proceedings 12th Canadian Rock Mechanics Symposium on Mining with Backfill, The Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 133-138p.
- Meegoda, J., N., Gao, S., Al-Joulani, N., M., A. ve Hu, L., 2011. Solid Waste and Ecological Issues of Coal to Energy, Journal of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste, 15, 2, 99-107.
- MEGEP, 2006. İnşaat Teknolojisi Beton Deneylemi-2, Milli Eğitim Bakanlığı Meslekî Eğitim ve Öğretim Sisteminin Güçlendirilmesi Projesi, Ankara.
- Memon, A., H., Radin, S., S., Zain, M., F., M. ve Trottier, J., F., 2002. Effect of Mineral and Chemical Admixtures on High-Strength Concrete in Seawater, Cement and Concrete Research, 32, 373– 377.
- MEND, 2006. Paste Backfill Geochemistry-Environmental Effects of Leaching Weathering, Mine Environmental Neutral Drainage Program, Report 10.2., Vancouver, B.C., USA, s:1-73.
- Mindess, S., Young, J., F. ve Darwin, D., 2003. Concrete, Edition 2, Prentice Hall, Pearson Education, USA, 1-644.
- Mishra, M., K. ve Karanam, U., M., R., 2006. Geotechnical Characterization of Flyash Composites for Backfilling Mine Voids, Geotechnical and Geological Engineering, 24, 6, 1749-1765.
- Mohamed, A., M., O., Hossein, M. ve Hassani, F., P., 2002. Hydro-Mechanical Evaluation of Stabilized Mine Tailings, Environmental Geology, 41, 749-759.
- Moreno, N., Querol, X., Andres, J.M., Stanton, K., Towler, M. ve Nugteren, H., 2005. Physico-Chemical Characteristics of European Pulverized Coal Combustion Fly Ashes, Fuel, 84, 1351–1363.

- Mudakavi, J., R., Narayana B., V. ve Kiran R., 1999. Characterization and Utilization of Iron-Rich Dry Ash from an Electric Arc Furnace, Current Science, 76, 473–475.
- Neville, A.M., 1996. Properties of concrete, John Wiley and Sons Incorporated 4th Edition, New York.
- Oner, A., Akyuz, S. ve Yildiz, R., 2005. An Experimental Study on Strength Development of Concrete Containing Fly Ash and Optimum Usage of Fly Ash in Concrete, Cement and Concrete Research, 35, 1165–1171.
- Ouellet, S., Bussière B., Aubertin M. ve Benzaazoua M., 2007. Microstructural Evolution of Cemented Paste Backfill: Mercury Intrusion Porosimetry Test Results, Cement and Concrete Research, 37, 1654-1665.
- Özel, C., 2007. Katkılı Betonların Reolojik Özelliklerinin Taze Beton Deney Yöntemlerine Göre Belirlenmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Bölümü, Isparta, 1-249.
- Palarski, J., 1998. Design And Use of Backfill for Support in Polish Coal Mines, Proceedings of the Sixth International Symposium on Mining with Backfill (ed. M. Bloss), Brisbane, Australasian Institute of Mining and Metallurgy Publication 1/98, 139-145.
- Pan, J., R., Huang C., Kuo J., J. ve Lin S., H., 2008. Recycling MSWI Bottom and Fly Ash as Raw Materials for Portland Cement, Waste Management, 28, 1113–1118.
- Pan, S., C., Tseng, D., H., Lee, C., C. ve Lee, C., 2003. Influence of The Fineness of Sewage Sludge Ash on The Mortar Properties, Cement and Concrete Research, 33, 1749-1754.
- Pandey, S., P. ve Sharma, R., L., 2000. The Influence of Mineral Additives on The Strength and Porosity of OPC Mortar, Cement and Concrete Research, 30, 1, 19-23.
- Papadakis, V., G. ve Tsimas, S., 2002. Supplementary Cementing Materials in Concrete: Part I. Efficiency and Design, Cement and Concrete Research, 32, 1525–1532.
- Papayianni, J., 1993. Use of a High-Calcium Fly Ash in Blended Type Cement Production, Cement and Concrete Composites, 15, 4, 231-235.
- Peng, S., S., 2006. Longwall Mining, Department of Mining Engineering College of Engineering and Mineral Resources West Virginia University, Second Edition, 1-621.
- Peterson, S., M., 1996. Cemented Rockfill Optimization in Vertical Block Mining, Master of Science Thesis, Department of Mining Engineering, University of Alberta, Canada, 1-232.
- Petrolito, J., Anderson, R., M. ve Pigdon, S., P., 2005. A Review of Binder Materials Used in Stabilized Backfills, CIM Bulletin, Technical Paper, 98, 1-7.
- Ping, G., Ping, X., Beaudoin, J. ve J., Jolicoeur, C., 1994. Investigation of The Retarding Effect of Superplasticizers on Cement Hydration by Impedance Spectroscopy and Other Methods, Cement and Concrete Research, 24, 3, 433-442.
- Poon vd., Wong, Y., L. ve Lam, L., 1997. The Influence of Different Curing Conditions on The Pore Structure and Related Properties of Fly-Ash Cement Pastes and Mortars, Construction and Building Materials, 11, 7–8, 383-393.

- Prince, W., Espagne, M. ve Aitcin, P., C., 2003. Ettringite Formation: A Crucial Step in Cement Superplasticizer Compatibility, Cement and Concrete Research, 33, 635-641.
- Prudencio (Jr.), L., R., 1998. Accelerating Admixtures for Shotcrete, Cement and Concrete Composites, 20, 213-219.
- Puertas, F., Santos, H., Palacios, M. ve Martinez-Ramirez, S., 2005. Polycarboxylate Superplasticizers Admixtures: Effect on Hydration, Microstructure and Rheological Behaviour in Cement Pastes, Advances in Cement Research, 17, 2, 77-89.
- Qiang, Z., Jixiong, Z., Yanli, H. ve Feng, Ju., 2012. Backfilling Technology and Strata Behaviors in Fully Mechanized Coal Mining Working Face, International Journal of Mining Science and Technology, 22, 151-157.
- Ramachandran, V., S., 1995. Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science, and Technology; Chapter 5: Accelerators, Second Edition Edited by V.S. Ramachandran, Institute for Research in Construction National Research Council Canada Ottawa, Canada.
- Ramachandran, V., S. ve Malhotra, V., M., 1995. Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science, and Technology; Chapter 7: Superplasticizers, Second Edition Edited by V.S. Ramachandran, Institute for Research in Construction National Research Council Canada Ottawa, Canada.
- Ramyar, K., Aydın, S. ve Aytaç, A., H., 2008. Portland Çimentosu Kompozisyonunun Naftalin Sülfonat Esaslı Süperakışkanlaştırıcı Katkı Performansına Etkisi, TÜBİTAK Hızlı Destek Projesi, Kod No: MAG-HD-12.
- Rankine, K., S., 2002. Permeability and Drainage Characteristics of Hydraulic Fills in Underground Mines, Thesis; Bachelor of Civil Engineering, James Cook University, Civil Engineering, 1-126.
- Razavi, S., M., 2007. An Investigation into The Influence of Sodium Silicate on The Physical and Mechanical Properties of Minefill, PhD Thesis, Department of Mining and Materials Engineering McGill University, Canada, 1-171.
- Reinhardt, H., W. ve Gaber, K., 1990. From Pore Size Distribution to an Equivalent Pore Size of Cement Mortar, Materials and Structures, 23, 1, 3-15.
- Rixom, R. ve Mailvaganam N., 1999. Chemical Admixtures for Concrete, 3rd Edition, E&FN Spon (Taylor&Francis Group), London.
- Rubel, A., Andrews, R., Gonzalez, R., Groppo, J. ve Robl, T., 2005. Adsorption of Hg And NO<sub>x</sub> on Coal by-Products, Fuel, 84, 911-916.
- Sağlam, A., R., Parlak, N. ve Özkul, M., H., 2007. Polikarboksilat Esaslı Kimyasal Katkıların Beton Üretiminde Kullanılmaları, 2. Yapılarda Kimyasal Katkıları Sempozyumu ve Sergisi, Ankara, 107-120.
- Sakai, E., Kasuga, T., Sugiyama, T., Asaga, K. ve Daimon, M., 2006. Influence of Superplasticizers on The Hydration of Cement and The Pore Structure of Hardened Cement, Cement and Concrete Research, 36, 2049-2053.

- Sasaoka, T., Shimada, H., Ichinose, M., Kubota, S. ve Matsui, K., 2001. Utilization of Flyash as a Backfilling Material in Highwall Mining System, 3rd Asian Symposium Engineering Geology and the Environment, Yogyakarta Indonesia, 263-272.
- Sasaoka, T., Shimada, H. ve Matsui, K., 2002. The Utilization of Flyash as a Backfilling Materials in Mining and Civil Engineering Field, Proceeding of 7th International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production, Cagliari Italy, 1119-1125.
- Schindler A. K., 2004. Prediction of Concrete Setting, Proceedings of the RILEM International Symposium on Advances in Concrete through Science and Engineering, Edited by J. Weiss, K. Kovler, J. Marchand, and S. Mindess, RILEM Publications SARL, Illinois.
- Scrivener, K., L. ve Nonat, A., 2011. Hydration of Cementitious Materials, Present and Future, *Cement and Concrete Research*, 41, 7, 651-665.
- Shi, C., Krivenko, P., V. ve Roy, D., 2006. Alkali-Activated Cements and Concretes, Taylor and Francis Group, London, 1-376.
- Shi, C. ve Li, Y., 1989, Investigation on Some Factors Affecting the Characteristics of Alkali-Phosphorus Slag Cement, *Cement and Concrete Research*, 19 (4), 527-533.
- Shimada, H., Sasaoka, T., Kubota, S., Matsui, K. ve Yoshida, Y., 2003. The Application of Flyash Cement in Mining Backfill Material, Proceeding of 12th International Symposium on Mine Planning & Equipment Selection (MPES'03), Kalgoorlie-Australia, 199-204.
- Shrestha, B., K., 2008. Properties of Cemented Rockfill at Diavik Mine, Master of Science Thesis, Department of Mining Engineering, University of Alberta, Canada, 174p.
- Singh, N., B., Sarvahi, R. ve Singh, N., P., 1992. Effect of Superplasticizers on The Hydration of Cement, *Cement and Concrete Research*, 22, 2, 725-735.
- Sika. Sika ViscoCrete: Kendiliğinden Yerleşen Beton (KYB), Sika Yapı Kimyasalları, <http://www.sika.com.tr> , 25 Haziran 2008.
- Simada, H., Sasaoka, T., Kubota, S., Matsui, K. ve Yoshida, Y., 2003. The Application of Flyash Cement in Mining Backfill Material, Twelfth International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection (MPES'2003), 1-9.
- Sivakugan, N., Rankine, R., M., Rankine, K., J. ve Rankine, K., S., 2006a. Geotechnical Considerations in Mine Backfilling in Australia, *Journal of Cleaner Production*, 14, 1168-1175.
- Sivakugan, N., Rankine, K. ve Rankine, R., 2006b. Permeability of Hydraulic Fills and Barricade Bricks, *Geotechnical and Geological Engineering*, 24, 661-673.
- Şengül, Ü., 2002. Kangal Termik Santralinde Uçucu Kül Atımının Çevresel Etkileri, *Çevre Koruma Dergisi*, 11, 44, 21-24.
- Taylor, H., 1992. *Cement Chemistry*, Academic Press, London, 1-233.
- Tariq, A. ve Nehdi, M., 2007. Developing Durable Paste Backfill from Sulphidic Tailings, *Waste and Resource Management*, 160, 4, 155-166.

- Termkhajornkit, P., Nawa, T. ve Kurumisawa, K., 2006. Effect of Water Curing Conditions on The Hydration Degree and Compressive Strengths of Fly Ash-Cement Paste, Cement and Concrete Composites, 28, 9, 781-789.
- Thomas, E.G., 1971. Cemented Fill Practice and Research at Mt Isa, Proceedings The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, 33-51.
- Thompson, L., J., Gill, P., Scheetz, B., E. ve Silsbee, M., R.,. Sodium Silicate Applications for Cement and Concrete, <http://www.pqcorp.com/>, Haziran, 2012.
- Thompson, L., J., Silsbee, M., R., Gill, P. ve Scheetz, B., E., 1997. Characterization of Silicate Sealers on Concrete, Cement and Concrete Research, 27, 10, 1561-1567.
- Topçu, İ., B. ve Canbaz, M., 2001. Uçucu Kül Kullanımının Betondaki Etkileri, Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Dergisi, 15, 2, 11-23.
- Tosun, K., Felekoğlu B., Baradan, B. ve Altun İ., A., 2009. Portland Kalkerli Çimento Bölüm II - Sülfat Dayanıklılığı, İMO Teknik Dergi, 4737-4757.
- Toutanji, H., Delatte, N., Aggoun, S., Duval, R. ve Danson A., 2004. Effect of Supplementary Cementitious Materials on The Compressive Strength and Durability of Short-Term Cured Concrete, Cement and Concrete Resource, 34, 311-319.
- Trezza, M., A., 2007. Hydration Study of Ordinary Portland Cement in the Presence of Zinc Ions, Materials Research, 10, 4, 331-334.
- TS EN 12350-2, 2010. Beton - Taze Beton Deneyleri - Bölüm 2: Çökme (Slump) Deneyi, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 13409, 2005. Perdah ve/veya Tesviye İşlerinde Kullanılan ve Hidrolik Priz Alabilen Bileşiklere Uygulanacak Deney Metotları - Priz Süresinin Tayini, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-1, 2002. Çimento Deney Metotları- Bölüm 1: Dayanım, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 196-2, 2002. Çimento Deney Metodları- Bölüm 2: Çimentonun Kimyasal Analizi, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 197-1, 2002. Çimento- Bölüm 1: Genel Çimentolar- Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 450-1/A1, 2008. Uçucu Kül - Betonda Kullanılan - Bölüm 1: Tarif, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 934-2, 2011, Kimyasal Katkılar - Beton, Harç ve Şerbet İçin - Bölüm 2: Beton Kimyasal Katkıları - Tarifler, Gereklere, Uygunluk, İşaretleme ve Etiketleme, Türk Standardları Enstitüsü, Ankara.
- Türker, P., Erdoğan, B., Katnaş, F. ve Yeğinobalı, A., 2009. Türkiye'deki Uçucu Küllerin Sınıflandırılması ve Özellikleri, TÇMB (Türkiye Çimento Müstahsilleri Birliği) Yayını, Ar-ge/Y03.03, Ankara, 1-112.
- Udd, J., E., 1989. Backfill Research in Canadian Mines Limited, Proceeding 4th International Symposium on Mining with Backfill, 3-13.

- Udd, J., E. ve Annor, A., 1993. Backfill Research in Canada, Proceedings Fifth International Symposium on Mining with Backfill, The South African Institute of Mining and Metallurgy, 361-368.
- URL 1, [http://www.neundorfer.com/knowledge\\_base/electrostatic\\_precipitators.aspx](http://www.neundorfer.com/knowledge_base/electrostatic_precipitators.aspx), Aralık, 2012.
- URL 2, <http://rmrc.wisc.edu/coal-fly-ash/>, Aralık, 2012.
- URL 3, <http://www.kutahyacimento.com/en>, Mayıs, 2012.
- URL 4, <http://www.southafricacrusher.com/optional-equipment/fly-ash-grinding.php>, Mayıs, 2012.
- URL 5, <http://hamptonroads.com/2008/07/fly-ash-piles-challenge-rises-safe-disposal>, Mayıs, 2012.
- URL 6, <http://intertrans.en.busytrade.com/products/info/930706/Fly-Ash-From-Coal-Thermo-electric-Plant-In-Vietnam.html>, Mayıs, 2012.
- URL 7, <http://www.webhatti.com/cografya/65294-enerji-ve-cevre.html>, Ekim, 2010.
- URL 8, [http://iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph5\\_1.html](http://iti.northwestern.edu/cement/monograph/Monograph5_1.html), Ekim, 2012.
- URL 9, <http://www.ce.berkeley.edu/~paulmont/CE60New/cement.pdf>, Aralık, 2012.
- URL 10, <http://www.cptechcenter.org/publications>, Aralık, 2012.
- URL 11, <http://theconstructor.org/concrete/setting-of-cement-microstructure-of-hcp/957/>, Aralık 2012.
- URL12, <http://www.circainfo.ca/CIRCA/WebPages/Use%20in%20Portland%20Cement%20Concrete%20b.htm>, Ocak 2013.
- Ülker, E., 2010. Comparison of Compressive Strength Test Procedures for Blended Cements, Master Of Science Thesis, Middle East Technical University, Cement Engineering Department, 1-103.
- Ünver, Ö., 1996. Çayırhan Kömür İşletmesinde Süper Uzunayak, Madencilik Dergisi, 25, 2, 27-39.
- Üstüner, D., T., 2009. Effectiveness of Set Accelerating Admixtures with Different Cement Types, Msc. Thesis, Middle East Technical University, Cement Engineering Department, 131s.
- Vassilev, S, V. ve Vassileva, C., G., 2007. A New Approach for The Classification of Coal Fly Ashes Based on Their Origin, Composition, Properties, and Behaviour, Fuel, 86, 1490–1512.
- Vassilev, S., V., Vassileva, C., G., Karayığit, A., İ., Bulut, Y., Alastuey, A. ve Querol, X., 2005. Phase-Mineral and Chemical Composition of Composite Samples from Feed Coals, Bottom Ashes and Fly Ashes at The Soma Power Station, Turkey, International Journal of Coal Geology, 61, 35-63.
- Verburg, R., B., M., 2001. Use of Paste Technology for Tailings Disposal: Potential Environmental Benefits and Requirements for Geochemical Characterization, Proceedings IMWA Symposium Belo Horizonte, Brasil, 1-13.

- Vocka, R., Galle, C., Dubois, M. ve Lovera, P., 2000. Mercury Intrusion Porosimetry and Hierarchical Structure of Cement Pastes, Cement and Concrete Research, 30, 521-527.
- Wagner, H. ve Galvin, J., M., 1979. Use of Hydraulically Placed PFA to Improve Stability in Bord and Pillar Workings in South African Collieries, Symposium on the Utilization of Pulverized Fuel Ash, Pretoria, South Africa, 1-27.
- Wang, S. ve Wu, H., 2006. Environmental-Benign Utilization of Fly Ash as Low-Cost Adsorbents, Journal of Hazardous Materials, 136, 482–501.
- Ward, C., R., French, D., Jankowski, J., Riley, K. ve Li, Z., 2006. Use of Coal Ash in Mine Backfill and Related Applications, Cooperative Research Centre for Coal in Sustainable Development, Research Report 62, 1-62p.
- Weerdt, K., D., Haha, M., B., Saout, G., L., Kjellsen, K., O., Justnes, H. ve Lothenbach, B., 2011. Hydration Mechanisms of Ternary Portland Cements Containing Limestone Powder and Fly Ash, Cement and Concrete Research, 41, 279–291.
- Wen-biao, S. ve Xue-sheng, D., 2011. Research on Physics and Mechanics Performance of Paste-Like Backfill Material in Coal Mines, Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), s.1-3.
- Wu, Q., 1999. Effect of The Ratio of Water Glass on Properties of Alkali-Activated Slag Cement, Cement Engineering, 5, 10–11.
- Xie-xing, M., Ji-xiong, Z. ve Mei-mei, F., 2008. Waste-Filling in Fully-Mechanized Coal Mining and Its Application, Journal of China Univ Mining & Technology, 18, 479–482.
- Xu, Q., 2004. Effect of an Alkaline Shotcrete Accelerator on Cement Properties, 6. Doktorantentagung an der Universitate Brno-Juniorstav, Brno, pp. 269-275.
- Yamada, K., Takahashi, T., Henahara, S. ve Matsuhira, M., 2000. Effects of The Chemical Structure on The Properties of Poly-Carboxylate-Type Superplasticizer, Cement and Concrete Research, 30, 2, 197–207.
- Yamada, K. ve Hanehara, S., 2001. Interaction Mechanism of Cement and Superplasticizers - The Role of Polymer Adsorption and Ionic Conditions of Aqueous Phase, Concrete Science Engineering, 3, 11, 135–145.
- Yang, Z., Weiss, W., J. ve Olek, J., 2005. Interaction Between Micro-Cracking, Cracking and Reduced Durability of Concrete: Developing Methods for Quantifying the Influence of Cumulative Damage in Life-Cycle Modeling, JTRP Technical Reports Joint Transportation Research Program, Purdue University, 1-250.
- Yanli, H., Jixionga, Z., Zhanc, L. ve Qianga, Z., 2010. Underground Backfilling Technology for Waste Dump Disposal in Coal Mining District, International-Conference on Digital Manufacturing & Automation, 872-875.
- Yazıcı, H., 2004. Termik Santral Atığı Yapay Alçı-Uçucu Kül-Taban Külü Esaslı Yapı Malzemesi Geliştirilmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 437s.
- Yazıcı, S. ve Arel, H., 2012. Effects of Fly Ash Fineness on The Mechanical Properties of Concrete, Sadhana, 37, 3, 389-403.

- Yazıcı, Ş., 2003. Süper Akışkanlaştırıcıların Betondaki Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklere Etkisi, DEÜ Mühendislik Fakültesi, Fen ve Mühendislik Dergisi, 5, 1, 103-114.
- Yıldırım, H., Uyan, M. ve Kemerli, M., K., 1998. Priz Hızlandırıcı Püskürtme Beton Katkılarının Dayanıma Etkisi, Hazır Beton Dergisi, Kasım-Aralık Sayısı, 60-64.
- Yılmaz, A., O. ve Uslu, T., 2007. The Role of Coal in Energy Production-Consumption and Sustainable Development of Turkey, Energy Policy, 35, 2, 1117-1128.
- Yılmaz, A., O., 2008. Renewable Energy and Coal Use in Turkey, Renewable Energy, 33, 5, 950-959.
- Yılmaz, E., 2003. Sülfid İçeren Maden Atıklarından Hazırlanan Çimentolu Macun Dolgu Örneklerinin Dayanım Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 1-117.
- Yijin, L., Shiqiong, Z., Jian, Y. ve Yingli, G., 2004. The Effect of Fly Ash on the Fluidity of Cement Paste, Mortar, and Concrete, International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology, Beijing, p. 339-345.
- Yu, T.,R. ve Counter, D., B., 1983. Backfill Practice and Technology at Kidd Creek Mine, CIM Bulletin, 56-65.
- Yu, Y., Xie-xing, M., Wen-sheng, L. ve Xing-hua, L., 2008. Deformation of Mining Caving Zone Grouting Compound Rock Under Overlying Strata Pressure, Journal of Coal Science and Engineering, 14, 4, 594-596.
- Zhou, H., Qu, Q., Hou, C., Zhao, C., Chen, D. ve Zhao, Q., 2004. Paste Backfill Study for None-Village-Relocation Coal Mining, Proceedings of the 5th International Symposium on Mining Science and Technology, 91-94.

## 7. EKLER

### Ek Şekil 1: CEM I (25-75) – Katkısız numunenin civa porozimetresi deney sonucu

Report date: 02/15/2013 Page 1 Analysis date: 03/16/2012  
Quantachrome Corporation  
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report  
version 7.01

Sample ID icavusoglu File Name cemI.prm  
Sample Weight 0.3566 grams Bulk Sample Volume 1.0000 cc  
Sample Description cemI-katkısız 25-75  
Comments  
Hg Surface Tension 480.00 erg/cm<sup>2</sup> Hg Contact Angle (I)140.00°, (E)140.00°  
Minimum Delta Vol. 0.000 % FS Moving Point Avg. 11 (Scan Mode)  
Operator Mercury volume normalized by sample weight.

#### Interparticle Porosity

Printing one out of every 10 data points.

Pore Diameter [µm]	Intruded Volume [cc/g]	Interparticle Porosity [%]
8.595E-03	134721.2031	5.6150
5.121E+00	0.0028	0.2835
5.461E+00	0.0028	0.2835
5.826E+00	0.0028	0.2835
6.269E+00	0.0027	0.2685
6.740E+00	0.0027	0.2685
7.170E+00	0.0027	0.2685
7.712E+00	0.0027	0.2685
8.311E+00	0.0027	0.2685
9.067E+00	0.0027	0.2685
9.973E+00	0.0024	0.2387
1.106E+01	0.0024	0.2387
1.231E+01	0.0024	0.2387
1.371E+01	0.0024	0.2387
1.561E+01	0.0024	0.2387
1.803E+01	0.0024	0.2387
2.092E+01	0.0022	0.2238
2.426E+01	0.0022	0.2238
2.909E+01	0.0022	0.2238
3.582E+01	0.0022	0.2238
4.454E+01	0.0022	0.2238
6.019E+01	0.0016	0.1641
8.565E+01	0.0016	0.1641
1.262E+02	0.0010	0.1044
2.071E+02	0.0004	0.0448

Total interparticle porosity = 0.2835 [%]  
Total porosity = 0.2835 [%]  
Sample (bulk) volume = 1.0000 [cc]  
Total intruded volume = 0.0028 [cc]

## Ek Şekil 2: CEM I (25-75) – %1SS numunenin civa porozimetresi deney sonucu

Report date: 03/14/2012

Page 1

Analysis date: 01/04/2012

Quantachrome Corporation  
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report  
version 7.01

Sample ID	icavusoglu	File Name	ICK.PRM
Sample Weight	0.4674 grams	Bulk Sample Volume	1.0000 cc
Sample Description	cemI-SS%125-75		
Comments			
Hg Surface Tension	480.00 erg/cm <sup>2</sup>	Hg Contact Angle	(I)140.00°, (E)140.00°
Minimum Delta Vol.	0.000 % FS	Moving Point Avg.	11 (Scan Mode)
Operator	duygu-aysu	Mercury volume normalized by sample weight.	

## Interparticle Porosity

Printing one out of every 10 data points.

Pore Diameter [µm]	Intruded Volume [cc/g]	Interparticle Porosity [%]
-4.472E-23	34.6090	0.0000
5.152E+00	0.0034	0.3432
5.477E+00	0.0034	0.3432
5.863E+00	0.0034	0.3432
6.339E+00	0.0034	0.3432
6.763E+00	0.0034	0.3432
7.217E+00	0.0033	0.3282
7.734E+00	0.0033	0.3282
8.353E+00	0.0031	0.3133
9.035E+00	0.0031	0.3133
9.814E+00	0.0030	0.2984
1.072E+01	0.0030	0.2984
1.189E+01	0.0030	0.2984
1.335E+01	0.0028	0.2835
1.503E+01	0.0028	0.2835
1.699E+01	0.0028	0.2835
1.967E+01	0.0027	0.2686
2.365E+01	0.0025	0.2536
2.931E+01	0.0024	0.2387
3.622E+01	0.0021	0.2089
4.677E+01	0.0021	0.2089
6.181E+01	0.0021	0.2089
8.925E+01	0.0015	0.1492
1.345E+02	0.0010	0.1044

Total interparticle porosity =	0.3581 [%]
Total porosity =	0.3581 [%]
Sample (bulk) volume =	1.0000 [cc]
Total intruded volume =	0.0036 [cc]



**Ek Şekil 4: CEM I (22,5-77,5) – %1SA katkılı numunenin civa porozimetresi deney sonucu**

Report date: 03/14/2012

Page 1

Analysis date: 01/09/2012

Quantachrome Corporation  
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report  
version 7.01

Sample ID icavusoglu File Name ICK11.PRM  
Sample Weight 0.3423 grams Bulk Sample Volume 1.0000 cc  
Sample Description cemI- Sa%1 225-775  
Comments  
Hg Surface Tension 480.00 erg/cm<sup>2</sup> Hg Contact Angle (I)140.00°, (E)140.00°  
Minimum Delta Vol. 0.000 % FS Moving Point Avg. 11 (Scan Mode)  
Operator Mercury volume normalized by sample weight.

## Interparticle Porosity

Printing one out of every 10 data points.

Pore Diameter [µm]	Intruded Volume [cc/g]	Interparticle Porosity [%]
1.314E-07	0.0000	0.0000
5.631E+00	0.0025	0.2536
6.040E+00	0.0025	0.2536
6.575E+00	0.0024	0.2387
7.073E+00	0.0022	0.2238
7.567E+00	0.0021	0.2089
8.147E+00	0.0021	0.2089
8.856E+00	0.0021	0.2089
9.700E+00	0.0021	0.2089
1.071E+01	0.0021	0.2089
1.191E+01	0.0021	0.2089
1.361E+01	0.0019	0.1939
1.579E+01	0.0019	0.1939
1.813E+01	0.0019	0.1939
2.160E+01	0.0018	0.1790
2.620E+01	0.0016	0.1641
3.272E+01	0.0016	0.1641
4.214E+01	0.0013	0.1343
5.949E+01	0.0012	0.1193
9.480E+01	0.0010	0.1044
1.757E+02	0.0004	0.0448

Total interparticle porosity = 0.2536 [%]  
Total porosity = 0.2536 [%]  
Sample (bulk) volume = 1.0000 [cc]  
Total intruded volume = 0.0025 [cc]

**Ek Şekil 5: CEM I (22,5-77,5) – %1SA-%1SS katkılı numunenin civa porozimetresi deney sonucu**

Report date: 03/14/2012

Page 1

Analysis date: 01/09/2012

Quantachrome Corporation  
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report  
version 7.01

Sample ID icavusoglu File Name ICK213.PRM  
Sample Weight 0.5980 grams Bulk Sample Volume 1.0000 cc  
Sample Description cemI-Sa%1-SS%1  
Comments 225-775  
Hg Surface Tension 480.00 erg/cm<sup>2</sup> Hg Contact Angle (I)140.00°, (E)140.00°  
Minimum Delta Vol. 0.000 % FS Moving Point Avg. 11 (Scan Mode)  
Operator Mercury volume normalized by sample weight.

## Interparticle Porosity

Printing one out of every 10 data points.

Pore Diameter [µm]	Intruded Volume [cc/g]	Interparticle Porosity [%]
1.131E-03	0.0000	0.0000
5.248E+00	0.0025	0.2536
5.591E+00	0.0025	0.2536
5.989E+00	0.0024	0.2387
6.433E+00	0.0024	0.2387
6.847E+00	0.0024	0.2387
7.353E+00	0.0024	0.2387
7.915E+00	0.0024	0.2387
8.580E+00	0.0024	0.2387
9.232E+00	0.0024	0.2387
9.926E+00	0.0024	0.2387
1.085E+01	0.0024	0.2387
1.224E+01	0.0024	0.2387
1.401E+01	0.0024	0.2387
1.628E+01	0.0022	0.2238
1.892E+01	0.0021	0.2089
2.245E+01	0.0019	0.1939
2.691E+01	0.0019	0.1939
3.284E+01	0.0019	0.1939
4.236E+01	0.0018	0.1790
5.830E+01	0.0015	0.1492
8.473E+01	0.0013	0.1343
1.439E+02	0.0009	0.0895

Total interparticle porosity = 0.2536 [%]  
Total porosity = 0.2536 [%]  
Sample (bulk) volume = 1.0000 [cc]  
Total intruded volume = 0.0025 [cc]

**Ek Şekil 6: CEM I (22,5-77,5) – %2SA katkılı numunenin civa porozimetresi deney sonucu**

Report date: 03/14/2012

Page 1

Analysis date: 01/04/2012

Quantachrome Corporation  
Quantachrome Poremaster for Windows® Data Report  
version 7.01

Sample ID icavusoglu File Name S2104051.PRM  
Sample Weight 0.3668 grams Bulk Sample Volume 1.0000 cc  
Sample Description cemI- Sa%2 225-775  
Comments  
Hg Surface Tension 480.00 erg/cm<sup>2</sup> Hg Contact Angle (I)140.00°, (E)140.00°  
Minimum Delta Vol. 0.000 % FS Moving Point Avg. 11 (Scan Mode)  
Operator duygu Mercury volume normalized by sample weight.

## Interparticle Porosity

Printing one out of every 10 data points.

Pore Diameter [µm]	Intruded Volume [cc/g]	Interparticle Porosity [%]
3.477E-43	0.0003	0.0000
5.505E+00	0.0024	0.2387
5.871E+00	0.0024	0.2387
6.329E+00	0.0024	0.2387
6.835E+00	0.0024	0.2387
7.379E+00	0.0024	0.2387
7.953E+00	0.0024	0.2387
8.586E+00	0.0024	0.2387
9.217E+00	0.0024	0.2387
9.965E+00	0.0022	0.2238
1.097E+01	0.0022	0.2238
1.222E+01	0.0022	0.2238
1.388E+01	0.0022	0.2238
1.594E+01	0.0021	0.2089
1.853E+01	0.0021	0.2089
2.189E+01	0.0019	0.1939
2.607E+01	0.0018	0.1790
3.229E+01	0.0016	0.1641
4.178E+01	0.0016	0.1641
5.655E+01	0.0015	0.1492
7.992E+01	0.0013	0.1343
1.273E+02	0.0010	0.1044
2.124E+02	0.0003	0.0298

Total interparticle porosity = 0.2387 [%]  
Total porosity = 0.2387 [%]  
Sample (bulk) volume = 1.0000 [cc]  
Total intruded volume = 0.0024 [cc]

## ÖZGEÇMİŞ

İbrahim ÇAVUŞOĞLU, Trabzon'un Araklı ilçesinde dünyaya geldi. İlkokulu Araklı ilçesi Merkez İlköğretim Okulunda, Ortaokul ve Lise öğrenimini Araklı Lisesi'nde tamamladı. 1995 yılında kazandığı Karadeniz Teknik Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nden 2001 yılında mezun oldu. Aynı yıl Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Y. Lisans eğitimine başladı. 2005 yılında Y.lisans eğitimini tamamlayarak Doktora eğitimine aynı yıl devam etti. Temmuz 2006 yılında Ankara'nın Nallıhan ilçesine bağlı Çayırhan beldesinde bulunan Park Termik A.Ş. şirketinde yeraltı vardiya mühendisi olarak çalışmaya başladı. 2008 yılında şirket bünyesinde Proje Grubu'nda proje mühendisi olarak çalışmasına devam etti. Şubat 2010 yılında Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde Araştırma Görevliliği sınavını kazanarak göreve başladı.

İbrahim ÇAVUŞOĞLU, halen Gümüşhane Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde Araş. Gör. olarak görevine devam etmekte olup iyi derecede İngilizce bilmektedir.